

## ВИКОРИСТАННЯ АМІАЧНОГО ПАЛИВА ЯК ЗАХІД ЗІ ЗНИЖЕННЯ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ

У представленій роботі висвітлено можливості використання аміаку як альтернативного палива з метою досягнення низьковуглецевого розвитку держави та посилення боротьби з парниковими газами. З часів промислової революції спалювання було основним методом перетворення енергії для людської діяльності, включаючи виробництво електроенергії та транспорт. На сьогоднішній день ці сектори продовжують значною мірою покладатися на вуглеводневе паливо. Як наслідок, найбільший абсолютний приріст викидів вуглекислого газу у 2022 році був від виробництва електричної та теплової енергії. При збільшенні глобального попиту на електроенергію на 2,7%, викиди в енергетичному секторі зросли на 1,8% (або 261 Мт), досягнувши історичного максимуму в 14,6 Гт. Таким чином, значна частина викидів CO<sub>2</sub> виробляється через ці сектори, що є головним винуватцем глобального потепління, підриваючи боротьбу зі зміною клімату. Необхідність декарбонізації враховується програмними документами, у тому числі державними стратегіями, які не лише застерігають, а й забороняють надмірне утворення забруднюючих речовин та стимулюють популяризацію безвуглецевих технологій в енергетичних секторах. Загальновідомо, що інноваційний розвиток технологій спалювання палива необхідний для досягнення майбутніх цілей вуглецево-нейтральної системи. Незважаючи на докладені значні зусилля для зменшення викидів парникових газів при спалюванні вуглеводнів, наприклад, шляхом підвищення ефективності згоряння, цього недостатньо для досягнення низьких викидів парникових газів. Проведено аналіз досягнень у цій галузі та з'ясовано, що аміаку приділяється все більша увага як одному з найпривабливіших енергоносіїв через його безвуглецеву природу. Однак використання аміаку при спалюванні не позбавлене проблем, включаючи низьку швидкість полум'я, вузькі межі займистості, схильність до утворення NO<sub>x</sub>. Таким чином, подальше впровадження аміаку в якості палива в енергетиці та промисловості потребує проведення комплексних досліджень робочого процесу горіння. Дослідження мають ґрунтуватися на визначенні впливу основних технологічних факторів, можливості застосування сумішевих палив, а також встановлення оптимальних геометричних та режимних параметрів паливосталювальної системи.

**Ключові слова:** парникові гази, безвуглецеве паливо, аміак, декарбонізація, спільне спалювання аміаку, вуглекислий газ, оксиди азоту.

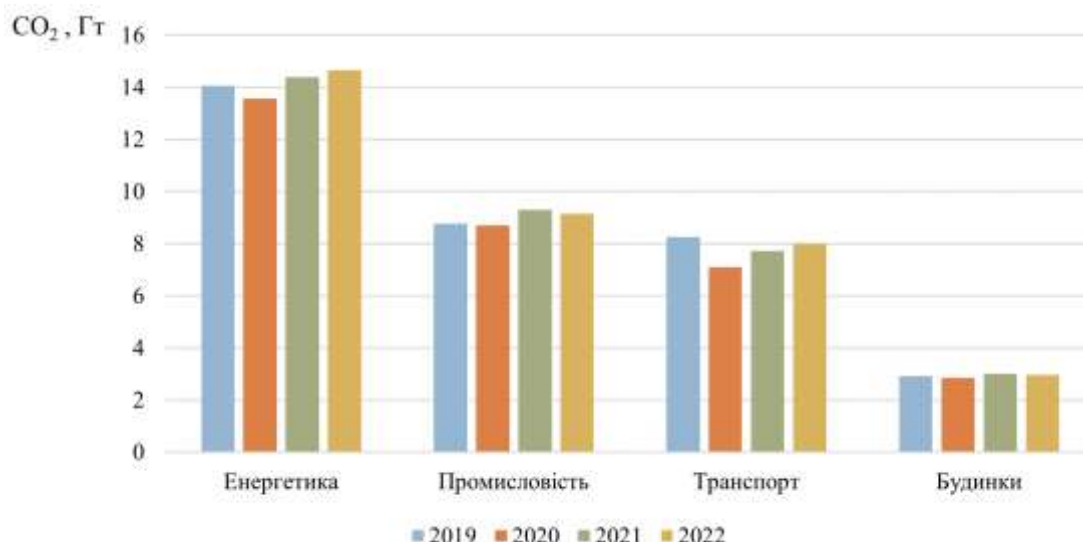
### Вступ

З часів промислової революції спалювання було основним методом перетворення енергії для людської діяльності, включаючи виробництво електроенергії та транспорт. На сьогоднішній день ці сектори продовжують значною мірою покладатися на вуглеводневе паливо [1]. Таким чином, значна частина викидів вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>) виробляється через ці сектори, що є головним винуватцем глобального потепління, підриваючи боротьбу зі зміною клімату.

Найбільший абсолютний приріст викидів CO<sub>2</sub> у 2022 році був від виробництва електричної та теплової енергії [2]. При збільшенні глобального попиту на електроенергію на 2,7%, викиди в енергетичному секторі зросли на 1,8% (або 261 Мт), досягнувши історичного максимуму в 14,6 Гт (рис. 1). Перехід з газу на вугілля в багатьох регіонах був головною рушійною силою цього зростання: викиди CO<sub>2</sub> від вугільної генерації електроенергії зросли на 2,1%.

Загальновідомо, що інноваційний розвиток технологій спалювання палива необхідний для досягнення майбутніх цілей вуглецево-нейтральної системи. Водночас інновації в галузі перетворення енергії просуваються швидше, ніж у минулому, і для підтримки цих технологій необхідні суттєві науково-дослідні роботи.

Незважаючи на те, що значні зусилля були розширені для зменшення викидів парникових газів, наприклад, шляхом підвищення ефективності згоряння, цих зусиль недостатньо для досягнення низьких викидів парникових газів [3]. Декарбонізація основних процесів у промисловому та енергетичному секторі видається важливим рушієм для подолання назрілої проблеми та виконання екологічних зобов'язань щодо викидів парникових газів.

Рисунок 1 – Глобальні викиди CO<sub>2</sub> за секторами, 2019-2022 [2]

Декарбонізація промисловості призводить до поступового скорочення споживання вуглецю та його заміни іншими видами. Програмним документом, який враховує необхідність декарбонізації, є нова Енергетична стратегія України на період до 2050 року [4], згідно якої енергетичний сектор має бути максимально наближений до кліматичної нейтральності.

Енергетичний перехід і досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року вимагає структурних змін і трансформації цілих сегментів економіки. Майбутнє безвуглецеве виробництво електроенергії залежить, головним чином, від використання відновлюваних, низьковуглецевих або безвуглецевих видів палива, які можуть задовольнити збільшення потреби в енергії, мінімізуючи вплив на навколишнє середовище [5]. Потреба в декарбонізації робить вкрай важливим пошук нових методів використання хімічних речовин, таких як аміак, які можна використовувати без викидів CO<sub>2</sub>.

Аміаку (NH<sub>3</sub>) приділяється все більша увага як одному з найпривабливіших енергоносіїв через його безвуглецеву природу та створену надійну інфраструктуру для його зберігання та розподілу.

Спочатку аміак розглядався як носій і постачальник водневої енергії, лінія подачі в цьому контексті включає його розкладання на водень і азот в точці доставки [6]. Однак в останні кілька років використання аміаку тепер включає його безпосереднє використання в якості палива [3, 5, 6]. Переосмислення ролі аміаку, зокрема в енергетичному секторі, стало одним із світових трендів.

Аміак має здатність горіти і, оскільки молекула NH<sub>3</sub> не містить вуглецю, горить без викидів CO<sub>2</sub>, таким чином відновлюючи інтерес до аміаку з точки зору енергоресурсу. Це можна побачити зі стрімкого збільшення наукових публікацій, пов'язаних із спалюванням аміаку, після оглядової статті Hideaki Kobayashi та ін. [3].

Зокрема, описується дорожня карта до економіки на основі аміаку в працях Natalia Morlanés та ін. [5], де технології застосування аміаку розглядаються з акцентом на поточні обмеження та останні досягнення. Douglas MacFarlane та ін. [6] передбачають виробництво відновлюваного аміаку в масштабах, які є значними з точки зору глобального використання викопного палива. Крім того, у вітчизняній літературі вагомий внесок стосовно аміаку як безвуглецевого майбутнього України зроблено Інститутом теплоенергетичних технологій. Одне з досліджень присвячено особливостям виробництва зеленого аміаку для України [7], де наводиться зелений енергетичний перехід, що передбачає низку енергетичних трансформацій, включаючи декарбонізацію, а також здійснено оцінку необхідної кількості енергії для виробництва зеленого аміаку.

#### Мета та завдання

Головним завданням даної роботи є висвітлення можливості використання аміаку як альтернативного палива, у тому числі для забезпечення потреб муніципальної енергетики, з метою досягнення низьковуглецевого розвитку держави та посилення боротьби з парниковими газами.

#### Матеріал і результати дослідження

Аміак є важливим вектором енергетичної безпеки під час декарбонізації різних енергетичних секторів кінцевих споживачів.

Хоча технології виробництва та транспортування аміаку добре відомі, наукова спільнота з проблем горіння постійно досліджує невикористані рішення щодо бар'єрів аміаку для його прямого спалювання.

Спалювання аміаку ускладнене, головним чином через його низьку реакційну здатність, але при цьому утворюється азот і вода:



Низька реакційна здатність пояснюється низькою швидкістю горіння ламінарного полум'я, температурою полум'я та межею займистості порівняно зі звичайним вуглеводневим паливом.

Аміак має дуже різні характеристики горіння порівняно з іншими видами палива, і важливо розуміти, чим вони відрізняються від метану чи водню. Для порівняння у таблиці 1 наведено теплові властивості та основні характеристики горіння аміаку та інших газоподібних видів палива [3].

Таблиця 1 – Термодинамічні характеристики аміаку та інших вуглеводневих палив [3]

Паливо	NH <sub>3</sub>	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
Нижча теплотворна здатність, МДж/кг	18.6	120	50	46.4
Межа займистості (коефіцієнт надлишку палива)	0.63-1.4	0.10-7.1	0.50-1.7	0.51-2.5
Адіабатична температура полум'я, °C	1800	2110	1950	2000
Максимальна швидкість ламінарного горіння, м/с	0.07	2.91	0.37	0.43
Мінімальна температура самозаймання, °C	650	520	630	450

Як показано, теплотворна здатність і максимальна швидкість ламінарного горіння чистого аміачно-повітряного полум'я дуже низькі порівняно з типовим вуглеводневим паливом. Через відсутність CO<sub>2</sub> в продуктах згорання аміаку, тепловіддача випромінюванням і температура факелу низькі відносно вуглеводневого полум'я.

У галузі виробництва електричної і теплової енергії вивчаються характеристики горіння аміаку та його застосування в газових турбінах і вугільних котлах.

Дослідницькій групі в Японії вдалося створити газотурбінну установку потужністю 41,8 кВт, використовуючи аміак у якості основного палива [8]. Були проведені дослідно-конструкторські роботи над газовою турбіною, ремонтні роботи постачання аміаку та демонстраційне випробування виробництва електроенергії з використанням аміачного палива. Основними цілями ефективності було збереження сумісності з існуючою системою виробництва електроенергії та мінімізація викидів оксидів азоту (NO<sub>x</sub>).

У газовій турбіні починали зі спалювання гасу (рис. 2) [8], збільшуючи виробіток електроенергії і досягнувши стабільної потужності, подавали газоподібний аміак з поступово зростаючою витратою. Вихідну потужність 41,8 кВт було досягнуто за рахунок спалювання чистого NH<sub>3</sub>. Водночас подача аміаку різко збільшує NO<sub>x</sub> у вихлопних газах порівняно з чистим метаном. Хоча концентрація NO<sub>x</sub> у вихлопних газах від спалювання аміаку перевищувала 500 ppm, як показано на рисунку 2, обладнання для видалення NO<sub>x</sub> – селективне каталітичне відновлення (СКВ) – може знизити концентрацію NO<sub>x</sub> нижче 10 ppm.

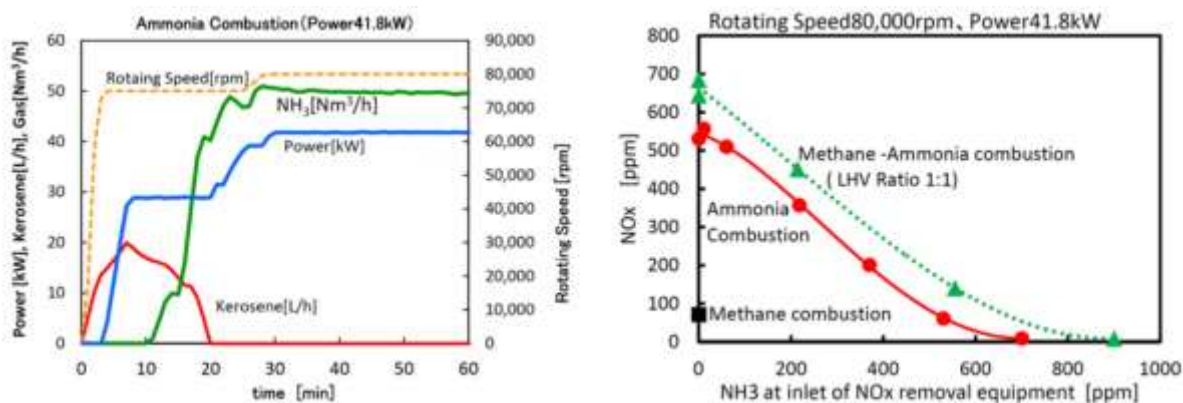


Рисунок 2 – Вихідна потужність 41,8 кВт і викиди NO<sub>x</sub> під час спалювання NH<sub>3</sub> у газовій турбіні [8]

Спалювання чистого аміаку супроводжується нижчими викидами  $\text{NO}_x$ , ніж спільне спалювання метану з аміаком [8], що дозволяє розглядати можливість зменшення емісій оксидів шляхом вдосконалення конструкції пальника.

Крім цього, вченими проводилися експерименти на випробувальному стенді мікрогазової турбіни в Інституті відновлюваної енергетики Фукусіми [9]. Ними було проведено дослідження спалювання рідкого аміаку шляхом його прямого розпилення в камеру згорання.

Однак, через відмінності у властивостях горіння аміаку відносно вуглеводню, можуть знадобитися певні модифікації. Незважаючи на численні переваги, аміак має кілька бар'єрів і прогалин у дослідженнях, які необхідно подолати, перш ніж його використовувати в пристроях для спалювання. Ці обмеження полягають у наступному: 1) низька якість запалювання (октанове число  $\sim 130$ ) [10], 2) низька швидкість горіння, 3) вузькі межі займистості (16-25 % за об'ємом у повітрі) та 4) високі викиди оксидів азоту.

Зважаючи на окреслені проблеми, наявних досягнень недостатньо та потрібні розробки, які пом'якшують перешкоди для ефективного та успішного прямого спалювання аміаку.

Розробляються великі газові турбіни класу МВт. На відміну від систем малого та середнього розміру, очікується, що великі газові турбіни матимуть суворіші обмеження щодо розміру камери згорання для повного згорання аміаку та складніший контроль  $\text{NO}_x$  в умовах високотемпературного горіння. Компанія Mitsubishi Power оголосила про початок розробки аміачної газової турбіни потужністю 40 МВт у березні 2021 року та має на меті вивести її на комерційне виробництво у 2025 році після проходження робочих процесів горіння та відповідних випробувань [11]. Знову ж таки, технічною проблемою є утворення  $\text{NO}_x$  через азотний компонент палива, і Mitsubishi намагається вирішити цю проблему за допомогою нової камери згорання аміаку та СКВ у газовій турбіні серії H-25.

Не тільки викиди  $\text{CO}_2$ , але й накопичення золи в печі, утилізацію золи та сульфідну корозію можна зменшити шляхом заміни частини палива, що використовується на вугільній електростанції, аміаком.

Компанія Chugoku Electric Power спробувала побудувати вугільно-аміачну електростанцію на 2-му блоці японської електростанції Mizushima (потужність 156 МВт) [12]. У цьому демонстраційному тесті викиди  $\text{CO}_2$  були зменшені за рахунок кількості аміаку, що спалюється разом з вугіллям, і не було жодних змін у температурі металу теплообмінника. Аміачне паливо повністю згорало і не викидалося назовні. Підтверджено, що екологічні стандарти були задоволені без будь-якої різниці. Рівень спільного спалювання становив від 0,6% до 0,8% через обмеження потужності випарника аміаку; однак, перш за все, було підтверджено, що технологію спільного спалювання вугілля й аміаку можна застосовувати на електростанціях в комерційній експлуатації, як засіб зменшення викидів парникових газів.

Іншою енергетичною компанією проведено техніко-економічне обґрунтування спільного спалювання аміаку в існуючому великому вугільному енергетичному котлі [13]. Установки спалювання вугілля були оцінені шляхом розгляду різних даних про продуктивність для вивчення питань, що виникають у зв'язку із застосуванням спільного спалювання аміаку – наприклад, чи можна використовувати установки як вони є, або потрібні доповнення/зміни – разом із можливими рішеннями.

Техніко-економічне обґрунтування було проведено для вугільного енергетичного котла потужністю 1000 МВт [13]. Аміак змішували з вугіллям – основним паливом – до 20% відносно теплової потужності котла. Під час випробування горіння було продемонстровано, що навіть при спільному спалюванні аміаку викиди  $\text{NO}_x$  можна обмежити до того самого рівня, що й при спалюванні вугілля, і підтримувати стабільне горіння шляхом подачі аміаку з центру пальника, працюючого на вугіллі.

Пряме використання безвуглецевих видів палива викликає інтерес у контексті розробки нових технологій згорання, приділяючи пильну увагу зменшенню викидів оксидів азоту та незгорілого аміаку.

На підставі нещодавніх спостережень, згідно яких умови збагаченого попереднього змішування пом'якшують надмірні викиди  $\text{NO}_x$  від згорання  $\text{NH}_3$ , і рівномірно змішані аміачно-водневі паливно-повітряні суміші мають тенденцію експоненціально збільшувати утворення  $\text{NO}_x$ , Jin U. та Kim K. T. [14] пропонують гібридну конфігурацію збагаченого воднем кінетичного аміачно-повітряного полум'я (внутрішня стадія) та збідненого полум'я чистого водню (зовнішня стадія) у радіально розшарованій первинній реакційній зоні. Ця схема розподілу палива, як стверджують автори, пропонує механізм зменшення викидів  $\text{NO}_x$ , контрольованого хімічною кінетикою.

Експериментальна установка, яка використовувалася в дослідженні [15], була переналаштована для забезпечення гнучкості операцій поводження з чистим аміачним паливом або аміачно-водневими сумішами. Установка для випробування складається з секції вхідного потоку, вузла форсунок внутрішніми діаметрами 6,5 мм, циліндричної секції кварцової труби для візуалізації полум'я, жарової труби змінної довжини та мокрого скрубера розпилювального типу для видалення незгорілого аміаку. Кожен елемент інжектора оснащений шестилопатевою осью завихрювачем під кутом  $44^\circ$  проти годинникової стрілки. Зовнішня поверхня кварцової труби та наступні секції жарової труби активно охолоджуються за допомогою високошвидкісного повітряного струменя. Додаткові відомості про цю експериментальну установку та інструменти можна знайти в [14, 15].

Зауважено, що суттєво різні неоднорідні реакційні області можуть бути встановлені у відносно компактному об'ємі згоряння без створення негативних ефектів стабілізації полум'я, таких як згасання менш реакційноздатного полум'я аміаку та спалах більш реакційноздатного водневого полум'я [14]. Порівняно з базовими умовами однорідної суміші показано, що гібридний метод розподілу суттєво зменшує загальні викиди оксидів азоту: від 7764 до 310 ppmvd (частин на мільйон за об'ємом у сухих газах), тобто зменшення на 96 %. Отримані результати свідчать про те, що мінімальний рівень викидів  $\text{NO}_x$  можна ще знизити шляхом збільшення часу перебування в умовах підвищеного тиску. Водночас існує думка про незмінне обмеження рівня емісії, пов'язане з хімією азоту у складі палива.

Не менш вагомий внесок здійснено вітчизняними вченими [16], зокрема розробка і впровадження у промислового масштабу струменево-нішевої технології спалювання. Результати промислового впровадження технології дозволили накопичити значний обсяг технічної інформації та дали можливість попередньої екологічної оцінки при модернізації газоспалювального обладнання. Як показує практика, на сучасному етапі основним напрямком удосконалення технології є підвищення її екологічних показників. Визначено можливості зниження оксидів азоту первинними технологічними методами, найпростішим і ефективним з яких є введення рециркуляційних газів у топковий простір.

Встановлено, що ефективність введення рециркуляційних газів залежить від потужності агрегату та від їх сумарного об'єму при баластуванні окисника [16]. Відсоток зменшення оксидів азоту на один відсоток рециркуляційних газів становить  $C_{\text{NO}_x}=2-8\%$ , залежно від типу котлоагрегату та вищевказаних умов. Найбільша ефективність процесу досягається при часткових навантаженнях, коли повітря забаластоване газами не більше 5–7% за об'ємом. Розроблена схема рециркуляції реалізована в котлах на основі струменево-нішевої технології. Практичні результати говорять про те, що воно дає змогу на 1/3 підвищити ККД порівняно з технологіями вихрового спалювання за рахунок раціонального розподілу палива в об'ємі окисника.

#### **Висновки**

Теплові електростанції, включаючи вугільні електростанції та газові турбіни, є великим джерелом викидів  $\text{CO}_2$ , і ефект скорочення викидів вуглецю може бути максимізований, якщо в системах спалювання використовується аміак.

Щоб сприяти декарбонізації енергетичного сектора, використання аміаку як палива безпосередньо, або змішаного з іншими видами палива, може мати значні переваги. Завдяки високій об'ємній щільності енергії (порівняно з воднем) і добре налагодженій виробничій і транспортній інфраструктурі аміак є привабливим стійким енергоносієм. Однак використання аміаку при спалюванні не позбавлене проблем, включаючи низьку швидкість полум'я, вузькі межі займистості, схильність до утворення  $\text{NO}_x$ .

Оскільки спалювання аміаку характеризується високими викидами  $\text{NO}_x$  і низькою стабільністю полум'я, потрібне ретельне дослідження перед широким застосуванням аміаку у паливоспалюючому обладнанні. Механізми чистого або спільного з іншими видами палива згоряння аміаку мають бути детально з'ясовані з точки зору хімічної кінетики. Така інформація важлива для запобігання надмірному утворенню  $\text{NO}_x$  і покращення стабілізації полум'я.

У фундаментальних дослідженнях слабка займистість аміачно-повітряного полум'я може бути посилена шляхом додавання більш реакційноздатних палив, попереднім нагріванням вхідних газів і підвищенням концентрації кисню. Однак важко ввести додаткові паливні гази або чистий кисень у систему спалювання для виробництва електроенергії. Спільне спалювання певного палива з аміаком потребує додаткових витрат, оскільки супроводжується об'єктами газопостачання, трубопроводами, системою контролю та безпеки.

Поточний рівень викидів  $\text{NO}_x$  під час згоряння аміаку в експериментах з газовими турбінами становить кілька сотень часток на мільйон, а викиди  $\text{NO}_x$ , що утворюються в результаті згоряння, відокремлюються через установку далі по ходу продуктів спалювання. Строго кажучи, такий підхід нівелює переваги використання безвуглецевого аміачного палива. Проблема можна вирішити, якщо розробити технологію спалювання з мінімальними викидами  $\text{NO}_x$  без очисного обладнання, наприклад, шляхом отримання реакції СНКВ під час згоряння. Найбільш поширеними способами для практичного зменшення викидів  $\text{NO}_x$  є багатоступеневе спалювання та рециркуляція димових газів.

У техніко-економічному обґрунтуванні для великих вугільних енергетичних котлів вченими було встановлено, що єдині модифікації, необхідні для спільного спалювання аміаку, стосуються системи подачі аміаку, а всі інші об'єкти можна використовувати згідно з існуючими специфікаціями. Однак результат був отриманий шляхом оцінки лише за одного набору конкретних умов, тому потрібне продовження розгляду через залежність результату від типу вугілля, рівня спільного спалювання аміаку тощо. У майбутньому, щоб підвищити можливість суспільного впровадження, планується оцінити можливість спільного спалювання аміаку з меншим підведенням тепла та розробити пальник, який може спалювати пиловугільну суміш з вмістом аміаку понад 20%.

**Список використаної літератури:**

1. Data and statistics – IEA. Режим доступу: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser/?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&>
2. CO<sub>2</sub> Emissions in 2022 – Analysis – IEA. Режим доступу: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>
3. Science and technology of ammonia combustion / H. Kobayashi та ін. Proceedings of the Combustion Institute. 2019. Т. 37, № 1. С. 109–133. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.09.029>
4. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 21.04.2023 № 373-р. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-p#Text>
5. A technological roadmap to the ammonia energy economy: Current state and missing technologies / N. Morlanés та ін. Chemical Engineering Journal. 2020. С. 127310. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127310>
6. A Roadmap to the Ammonia Economy / D. R. MacFarlane та ін. Joule. 2020. Т. 4, № 6. С. 1186–1205. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.04.004>
7. Volchyn I. A., Rashchepkin V., Cherervatskyi D. Green ammonia production for green deal of Ukraine. The Problems of General Energy. 2022. Т. 2022, № 1-2. С. 127–138. <https://doi.org/10.15407/pge2022.01-02.127>
8. Micro gas turbine firing ammonia / N. Iki та ін. In Proceedings of the 12th Annual NH<sub>3</sub> Fuel Conference, м. Chicago, IL, 20–23 вер. 2015 р.
9. Liquid ammonia spray combustion in two-stage micro gas turbine combustors at 0.25 MPa; Relevance of combustion enhancement to flame stability and NO<sub>x</sub> control / E. C. Okafor та ін. Applications in Energy and Combustion Science. 2021. Т. 7. С. 100038. <https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2021.100038>
10. Feibelman PJ, Stumpf R. Comments on potential roles of ammonia in a hydrogen economy – a study of issues related to the use of ammonia for on-board vehicular hydrogen storage. Sandia Natl Lab 2006.
11. Mitsubishi Power Commences Development of World's First Ammonia-fired 40MW Class Gas Turbine System – Targets to Expand Lineup of Carbon-free Power Generation Options, with Commercialization around 2025. Mitsubishi Power. <https://power.mhi.com/news/20210301.html>
12. Yoshizaki T. Test of the co-firing of ammonia and coal at Mizushima power station. J. Combust. Jpn. 2019. № 61. С. 309–312.
13. JERA and IHI to Start a Demonstration Project Related to Ammonia Co-firing at a Large-Scale Commercial Coal-Fired Power Plant | Press Release (2021) | JERA. [https://www.jera.co.jp/en/news/information/20210524\\_677](https://www.jera.co.jp/en/news/information/20210524_677)
14. Jin U., Kim K. T. Hybrid rich- and lean-premixed ammonia-hydrogen combustion for mitigation of NO<sub>x</sub> emissions and thermoacoustic instabilities. Combustion and Flame. 2024. Т. 262. С. 113366. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2024.113366>
15. Jin U., Kim K. T. Influence of radial fuel staging on combustion instabilities and exhaust emissions from lean-premixed multi-element hydrogen/methane/air flames. Combustion and Flame. 2022. Т. 242. С. 112184. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.112184>
16. Abdulin M. Z., Siryi O. A., Kobylianska O. O. Energy-ecological assessment of the boiler equipment modernized with the jet-niche technology. Journal of Mechanical Engineering. 2022. Т. 25, № 3. С. 46–55. <https://doi.org/10.15407/pmach2022.03.046>

**I. Shakhbazov**<sup>1,2</sup>, Ph. D. student, ORCID 0009-0003-8450-8564

**O. Siryi**<sup>1,2</sup>, Ph. D. (Engin.), Assoc. Pr., ORCID 0000-0001-5811-9037

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

<sup>2</sup>Thermal Energy Technology Institute of the NAS of Ukraine

## **USING AMMONIA FUEL AS A MEASURE TO REDUCE GREENHOUSE GASES**

*The presented work highlights the possibilities of using ammonia as an alternative fuel in order to achieve low-carbon development of the state and strengthen the fight against greenhouse gases. Since the Industrial Revolution, combustion has been the primary method of energy conversion for human activities, including power generation and transportation. Today, these sectors continue to rely heavily on hydrocarbon fuels. As a result, the largest absolute increase in carbon dioxide emissions in 2022 was from electricity and heat production. With global electricity demand increasing by 2.7%, emissions in the energy sector increased by 1.8% (or 261 Mt), reaching an all-time high of 14.6 Gt. Thus, a large part of CO<sub>2</sub> emissions is produced through these sectors, which is the main culprit of global warming, undermining the fight against climate change. The need for decarbonization is taken into account by program documents, including government strategies, which not only warn but also prohibit the excessive formation of pollutants and stimulate the promotion of carbon-free technologies in energy*

sectors. It is common knowledge that the innovative development of fuel combustion technologies is necessary to achieve the future goals of a carbon-neutral system. Despite the considerable efforts made to reduce greenhouse gas emissions during the combustion of hydrocarbons, for example, by increasing the combustion efficiency, these efforts are not enough to achieve low greenhouse gas emissions. The progress in this field is analyzed and it is found that ammonia is receiving increasing attention as one of the most attractive energy carriers due to its carbon-free nature. However, the use of ammonia in combustion is not without problems, including low flame speed, narrow flammability limits, and tendency to NO<sub>x</sub> formation. Therefore, the further introduction of ammonia as a fuel in energy and industry requires comprehensive studies of the combustion working process. Research should be based on determining the influence of the main technological factors, the possibility of using mixed fuels, as well as establishing the optimal geometric and mode parameters of the fuel combustion system.

**Keywords:** greenhouse gases, carbon-free fuel, ammonia, decarbonization, co-combustion of ammonia, carbon dioxide, nitrogen oxides.

#### References

1. Data and statistics – IEA. [Online]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser/?country=WORLD&fuel=Energy%20supply>
2. CO<sub>2</sub> Emissions in 2022 – Analysis – IEA. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>
3. H. Kobayashi, A. Hayakawa, K. D. K. A. Somarathne, and E. C. Okafor, “Science and technology of ammonia combustion”, *Proc. Combustion Inst.*, vol. 37, no. 1, pp. 109–133, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.09.029>
4. On the approval of the Energy Strategy of Ukraine for the period up to 2050. Order of the Ministers Cabinet of Ukraine dated April 21, 2023 No. 373. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-p#Text>
5. N. Morlanés et al., “A technological roadmap to the ammonia energy economy: Current state and missing technologies”, *Chem. Eng. J.*, p. 127310, Oct. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127310>
6. D. R. MacFarlane et al., “A Roadmap to the Ammonia Economy”, *Joule*, vol. 4, no. 6, pp. 1186–1205, Jun. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.04.004>
7. I. A. Volchyn, V. Rashchepkin, and D. Cherervatskyi, “Green ammonia production for green deal of Ukraine”, *Probl. Gen. Energy*, vol. 2022, no. 1-2, pp. 127–138, May 2022. <https://doi.org/10.15407/pge2022.01-02.127>
8. N. Iki et al., “Micro Gas Turbine Firing Ammonia”, in *ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Tech. Conf. Expo.*, Seoul, South Korea, Jun. 13–17, 2016. ASME, 2016. <https://doi.org/10.1115/gt2016-56954>
9. E. C. Okafor et al., “Liquid ammonia spray combustion in two-stage micro gas turbine combustors at 0.25 MPa; Relevance of combustion enhancement to flame stability and NO<sub>x</sub> control”, *Appl. Energy Combustion Sci.*, vol. 7, p. 100038, Sep. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2021.100038>
10. PJ Feibelman, R Stumpf. Comments on potential roles of ammonia in a hydrogen economy – a study of issues related to the use of ammonia for on-board vehicular hydrogen storage. Sandia Natl Lab 2006.
11. Mitsubishi Power Commences Development of World's First Ammonia-fired 40MW Class Gas Turbine System – Targets to Expand Lineup of Carbon-free Power Generation Options, with Commercialization around 2025” Mitsubishi Power. [Online]. Available: <https://power.mhi.com/news/20210301.html>
12. T. Yoshizaki. Test of the co-firing of ammonia and coal at Mizushima power station. *J. Combust. Jpn.* no. 61, pp. 309–312, 2019.
13. JERA and IHI to Start a Demonstration Project Related to Ammonia Co-firing at a Large-Scale Commercial Coal-Fired Power Plant | Press Release (2021) | JERA.” JERA. [Online]. Available: [https://www.jera.co.jp/en/news/information/20210524\\_677](https://www.jera.co.jp/en/news/information/20210524_677)
14. U. Jin and K. T. Kim, “Hybrid rich- and lean-premixed ammonia-hydrogen combustion for mitigation of NO<sub>x</sub> emissions and thermoacoustic instabilities”, *Combust. Flame*, vol. 262, p. 113366, Apr. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2024.113366>
15. U. Jin and K. T. Kim, “Influence of radial fuel staging on combustion instabilities and exhaust emissions from lean-premixed multi-element hydrogen/methane/air flames”, *Combust. Flame*, vol. 242, p. 112184, Aug. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.112184>
16. M. Z. Abdulin, O. A. Siryi, and O. O. Kobylianska, “Energy-ecological assessment of the boiler equipment modernized with the jet-niche technology”, *J. Mech. Eng.*, vol. 25, no. 3, pp. 46–55, Sep. 2022. <https://doi.org/10.15407/pmach2022.03.046>

Надійшла: 21.03.2024

Received: 21.03.2024