

**Дульський А.І.**

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

**Сторожук М.С.**

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

## АЛЬТЕРНАТИВНІ ПАЛИВА В ЕНЕРГЕТИЦІ, ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

*Сучасний світ стикається з викликами, пов'язаними зі зростаючим споживанням традиційних енергетичних ресурсів та негативними екологічними наслідками цього процесу. Поступовий перехід до альтернативних та відновлювальних джерел енергії є основним перспективним напрямком розвитку світової енергетики. Зменшення відсотку традиційних енергоресурсів в енергобалансі країни на користь сталих та екологічно безпечних відновлювальних джерел енергії зменшить негативний вплив на навколишнє середовище. Одними з найбільш перспективних напрямів розвитку енергетики нашої країни є енергія сонця, вітру, гідроенергія, біопаливо та воднева енергетика.*

*Різновиди альтернативних палив можуть відрізнятися за джерелом та процесом їх виробництва. Незважаючи на це, всі вони виготовляються чистим методом, що не супроводжується додатковими викидами вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>). Синтез альтернативних палив відбувається шляхом застосування двох ключових підходів: пряма утилізація надлишків електроенергії, так зване виробництво «електропалива» (ЕП) та термохімічне перетворення вихідних матеріалів (ТХП).*

*В роботі виконано огляд літературних джерел із зарубіжної практики стосовно використання альтернативних палив в енергетиці. Розглянуто основні особливості виробництва ЕП таких як: метанол, диметилловий ефір, етанол, метан та приведено їх основні властивості. Підбито висновки щодо перспектив використання даних палив, та зазначено, що ЕП навряд чи займе основну нішу джерела енергії для потреб промислового виробництва. Описано різновиди палив ТХП, серед яких основні: водень, аміак та біодизель (БД). Приведено основні методи виробництва даних видів палив, таких як піроліз, газифікація біомаси, електроліз води, та описано перешкоди, які на даному етапі запобігають широкому їх впровадженню.*

*Важливим елементом технологічного процесу використання будь-якого палива енергетичним устаткуванням є належна організація технології горіння. В статті виконано огляд вітчизняних технологій горіння розроблених на базі наукових досліджень Київського політехнічного інституту. На сьогоднішній день однією з найбільш поширених вітчизняних технологій спалювання є Струменево-нішева технологія (СНТ), технічні особливості якої дозволяють адаптувати вогнетехнічне обладнання для спалювання традиційних та альтернативних палив.*

**Ключові слова:** альтернативні палива, ЕП, біомаса, водень, аміак, етанол, технологія горіння, пальниковий пристрій.

**Постановка проблеми.** Енергія відіграє вирішальне значення для функціонування продуктивності людини, а технологічний прогрес став можливим завдяки ефективному використанню енергії. Ефективне енергоспоживання підвищує якість життя, економічний та технологічний розвиток, збільшує обсяги виробництва.

Однак ресурси викопного палива, від яких значною мірою залежить промисловість, мають негативний вплив на екологію, обмежені в доступній кількості і будуть близькі до вичерпання в майбутньому. Безпрецедентна популярність і успішне використання нафтових ресурсів, що спостеріга-

лися у ХХ столітті, будуть знижуватися у ХХІ столітті через нестачу ресурсів і збільшення викидів вуглекислого газу. З точки зору сталого розвитку людства: буде інтенсифікуватися використання альтернативних палив об'єктами промисловості та енергетики [1].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні дослідження добре висвітлюють використання відновлюваних та альтернативних видів палива. Однак важливо розуміти, що ці терміни не є взаємозамінними, оскільки не обов'язково стосуються одних і тих самих видів палива. Відновлювані палива використовують відновлювані

ресурси для свого виробництва, включаючи біомаси та інші відновлювані джерела енергії. Альтернативні види палива, з іншого боку, визначаються як будь-яка альтернатива традиційним видам палива, які можна виробляти без обмежень щодо типу сировинного ресурсу, а значить вони можуть бути отримані як з відновлюваних, так і з викопних ресурсів.

Альтернативні види палива можуть відрізнятися за походженням та процесом виробництва. Однак, незалежно від цього, всі вони виробляються за допомогою «стійкої» та «чистої» процедури, без додаткових викидів вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ). Синтез альтернативних видів палива відбувається за допомогою двох основних методів: пряма утилізація надлишків електроенергії та термохімічне перетворення сировини. Для першого з них останнім часом введено термін «ЕП», щоб чітко підкреслити шлях виробництва та використання електроенергії. ЕП – це вуглецево-нейтральне паливо, синтезоване з надлишку електроенергії відновлювальних енергетичних систем (ВЕС) у газовій або рідкій формі, причому вуглецева нейтральність досягається шляхом замикання циклу таким чином, що використаний  $\text{CO}_2$  вловлюється з вихлопних газів або безпосередньо з повітря. Крім того, електроліз, який є ключовою технологією для синтезу ЕП, може експлуатуватися в гнучкому режимі відповідно до виробництва відновлюваних джерел енергії, що підвищує загальну ефективність системи і водночас дозволяє підвищити рівень впровадження ВЕС. Другим шляхом синтезу альтернативних видів палива є термохімічне перетворення сировини в корисні газоподібні або рідкі види палива. Ці процеси

широко досліджуються в наш час, оскільки вони можуть перетворювати різні відходи або сировину в цінні альтернативні види палива або хімічні речовини [2].

**Метою роботи** є аналіз особливостей використання альтернативного палива та оцінка можливості застосування вітчизняних розробок для перспективного впровадження на енергетичних об'єктах національної економіки.

### Виклад основного матеріалу

#### 1. Паливо, отримане з використанням електроенергії (ЕП)

##### 1.1 Загальна характеристика

ЕП – це вид синтетичного палива, що виробляється за допомогою електроенергії (часто відновлюваної енергії) для перетворення вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ) в рідке або газоподібне паливо. Згідно [3, 4] процес виробництва ЕП зазвичай включає наступні етапи (див. рис. 1):

– Уловлювання вуглецю:  $\text{CO}_2$  вловлюється з атмосфери або з промислових джерел, таких як електростанції або цементні заводи та ін.

– Електроліз: Відновлювана електроенергія, така як сонячна або вітрова, використовується для розщеплення молекул води на водень ( $\text{H}_2$ ) і кисень ( $\text{O}_2$ ).

– Синтез: Уловлений  $\text{CO}_2$  поєднується з воднем, отриманим на етапі 2, за допомогою хімічної реакції з утворенням синтетичних вуглеводнів, таких як метанол, диметилловий ефір (ДМЕ) або метан.

##### 1.2 Різновиди ЕП

Нижче представлено основні ЕП та їх характерні особливості.

**Метанол ( $\text{CH}_3\text{OH}$ )** – це простий спирт прозора безбарвна легкозаймиста рідина з характерним

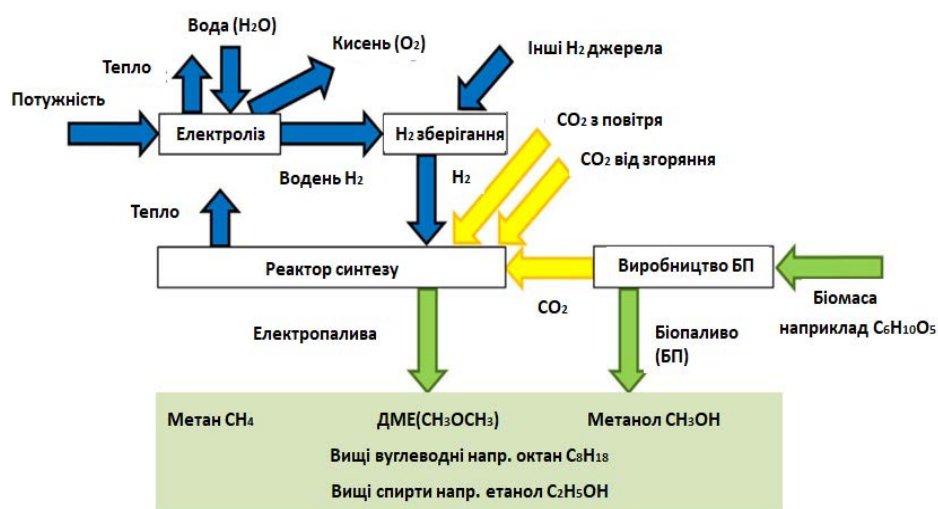


Рис. 1. Етапи процесу виробництва ЕП [3]

Енергетичні характеристики основних електропалив [5]

Властивості	Диметилловий ефір	Метанол	Етанол	Метан
Теплотворна здатність, МДж/кг	28,8	19,5	25,0	50,0
Густина, г/см <sup>3</sup>	0,66	0,79	0,81	0,000657
Температура спалаху, °С	-41	13	13	187
Температура самозаймання	421	464	365	537,8
Відношення повітря/паливо	9,0	6,5	9,0	17,2
Температура кипіння, °С	-25	65	78	-162

запахом. Метанол є токсичною речовиною, яка може бути небезпечною для людського здоров'я. При вдиханні парів метанолу можуть виникнути головний біль, запаморочення, нудота, блювота та інші проблеми зі здоров'ям. При випадковому ковтанні метанолу може виникнути серйозне отруєння, що може призвести до смерті [3]. Токсичність, високий корозійний потенціал, і низька енергетична щільність – є основними недоліками метанолу [2].

**Диметилловий ефір (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O)** – є безбарвною газоподібною речовиною, горить видимим блакитним полум'ям і має солодкуватий запах, що є важливим питанням безпеки [3]. Транспортується у вигляді зрідженого газу під тиском парів. Контакт з рідиною може спричинити обмороження. Він легко займається. Його пари важчі за повітря. Будь-який витік може бути як рідиною, так і парою. Може викликати задуху через витіснення повітря. Має низьку інгаляційну токсичність. При тривалому впливі вогню або сильному нагріванні контейнери можуть зруйнуватися і вибухнути.

**Етанол (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH)** – це легкозаймиста хімічна речовина з групи спиртів. Він має безбарвну та легко текучу рідинну форму, що має характерний запах та гостринку на смак. Його пара в 1,6 рази важче повітря. Є токсичним, у великих дозах може нанести величезну шкоду організму як в рідкому так і газоподібному стані. Але оскільки етанол за звичайних умов – це рідина, то ймовірність отруєння ним не свідомо є дуже малою.

**Метан (CH<sub>4</sub>)** – це найпростіша органічна сполука вуглецю з воднем безбарвний, без запаху та без смаку газ, який складається з одного атома вуглецю та чотирьох атомів водню. Можна стверджувати, що метан не є шкідливим для здоров'я людей та не має токсичної дії. Крім того, в порівнянні з нафтопродуктами, метан є менш пожежо-небезпечним, що пояснюється тим, що він має вищу температуру спалаху. Основні теплофізичні властивості наведених органічних сполук представлені в табл. 1.

Проаналізувавши [2, 3, 4, 7, 6] можна зробити наступні висновки щодо перспектив та недоліків впровадження ЕП.

Згідно [2, 3, 4, 7] до перспектив можна віднести:

- скорочення викидів вуглецю: електричне паливо має потенціал для значного скорочення викидів вуглецю, особливо в галузях, де декарбонізація є складним завданням, таких як авіація та судноплавство. Використовуючи відновлювані джерела енергії для виробництва електричного палива, викиди можна значно скоротити порівняно з викопними видами палива;

- гнучкість та універсальність: ЕП можна використовувати в різних сферах, від транспорту до виробництва електроенергії та опалення. Це робить їх гнучким і універсальним джерелом енергії, яке можна адаптувати для задоволення різних енергетичних потреб і моделей попиту;

- зберігання енергії: ЕП можна зберігати протягом тривалого часу, що робить його привабливим варіантом для зберігання відновлюваної енергії та вирішення проблеми перебоїв у постачанні. Це може допомогти підвищити надійність і стабільність енергосистеми;

- потенціал для циркулярної економіки: електричне паливо можна виробляти з уловленого вуглекислого газу, який може надходити з промислових процесів або безпосередньо з атмосфери. Це створює потенціал для циркулярної економіки, де викиди вуглецю уловлюються і повторно використовуються для виробництва нових видів палива;

- менше забруднення повітря: електричне паливо виробляє менше забруднюючих речовин, ніж традиційне викопне паливо, що може покращити якість повітря та зменшити негативний вплив на здоров'я, пов'язаний із забрудненням повітря.

Основні недоліки [2, 6]:

- вища вартість: ЕП дорожче за інші види палива, а його виробництво є енергоємним. Це означає, що вони не є економічно ефективним варіантом для більшості випадків як мінімум у глобальному транспортному секторі;

- викиди вуглецю: ЕП виділяє вуглець при використанні, що стає дорогим, коли бюджет на викиди вуглецю обмежений. Тому, якщо є можливість зберігати вуглець, економічно вигідніше вилучити вуглець із системи і зберігати його, ніж повторно використовувати для виробництва ЕП;

- обмежений потенціал: ЕП не може задовольнити загальний попит на синтетичне паливо. У більшості випадків економічно ефективний потенціал біопалива є вищим, ніж у ЕП;

- невизначеність в інфраструктурі розподілу водню: витрати на інфраструктуру розподілу водню та зберігання водню насамперед в транспортних засобах є невизначеними і можуть бути недооцінені або переоцінені в моделі. Навіть у тих випадках, коли водень є економічно ефективним, потенціал ЕП все ще дуже низький.

Таким чином, даний вид синтетичного палива може розглядатися як одиничний варіант заміщення традиційного палива і навряд чи у перспективі буде основним джерелом енергії для потреб виробництва.

## 2. Палива термохімічного перетворення (ТХП)

### 2.1 Різновиди ТХП

#### Водень

Водень є найчистішим з відомих джерел енергії, який можна виробляти з різних енергоносіїв, таких як викопне паливо, ядерна енергія або ВДЕ [8]. Наразі водень широко використовується як ракетне паливо в аерокосмічній галузі, як матеріал для переробки в нафтохімічній промисловості, а також у багатьох інших промислових процесах. Майже 50% водню у світі використовується лише для виробництва аміаку ( $\text{NH}_3$ ). При використанні водню як палива в результаті його окислення виділяється лише вода і тепло, без додаткових викидів (1). Незважаючи на те, що водень є найпоширенішим хімічним елементом у Всесвіті, його природна, елементарна присутність на Землі зустрічається рідко. Тим не менш, водень можна знайти в різних вуглеводнях, воді або синтезованих хімічних речовинах.



Однією з найбільших переваг є висока енергетична щільність, за н.у.  $120,7 \text{ МДж/м}^3$ . Висока густина енергії в поєднанні зі зрілістю виробничих процесів сприяє використанню водню як потенційного сезонного накопичувача енергії в майбутньому, а також як альтернативного палива [2]. Паливні елементи виглядають найбільш перспективним рішенням для утилізації водню як для портативного, так і для стаціонарного використання.

Через низький об'ємний вміст енергії, ефективно застосування вимагає зрідження при  $-253^\circ\text{C}$  або стиснення до 700 бар. Як показує [9] ці обидва процеси є дуже енергоємними, що призводить до втрат енергії близько 10% для при стисненні і близько 40% при зрідженні. Крім того, висока горючість вимагає обережного поводження з ним і піднімає низку питань безпеки. Матеріали, що використовуються для водневих сховищ, не повинні вступати в реакцію з воднем у будь-якій формі і водночас слугувати надійним теплоізолятором.

#### Виробництво водню

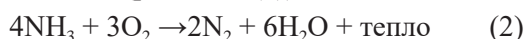
Виробництво водню з викопного палива є відомою процедурою, де в якості сировини використовується природний газ або вугілля. Сьогодні водень найчастіше отримують шляхом парового риформінгу метану, хоча його також можна виробляти шляхом часткового або автотермічного окислення чи газифікації [8]. Тим не менш, виробництво з викопного палива неможливе в майбутній декарбонізованій енергетичній системі, і технологія повинна зміститися в бік сталих рішень. Виробництво з відновлюваних джерел енергії передбачає піроліз або газифікацію біомаси або електроліз води з надлишку електроенергії ВЕС.

#### Аміак

Аміак ( $\text{NH}_3$ ) – це повністю безвуглецева хімічна сполука, яка широко використовується як добриво, а останнім часом привертає значну увагу як потенційний енергоносіє або альтернативне паливо [10]. На сьогоднішній день аміак є широко використовуваною хімічною речовиною, виробництво якої становить приблизно 200 мільйонів тонн на рік. Наразі основною сировиною для синтезу за технологією Габера-Боша є викопні види палива, такі як природний газ, вугілля та нафта, а також азот з повітря [11]. Аміак має кімнатну температуру і тиск у рідкій фазі 10 бар, а його зберігання є досить простим завдяки вже розвиненій інфраструктурі розподілу. Енергетична щільність аміаку становить близько  $22,5 \text{ МДж/кг}$ , з однією з найвищих гравітаційних густин водню (17,8 мас. %), що робить його ідеальним енергоносієм для водневого палива [2]. Стале використання аміаку передбачає, що надлишок електроенергії з ВДЕ використовується для електролізу та виробництва водню, який потім синтезується з азоту з повітря. За необхідності аміак знову перетворюється на водень, а потім використовується для виробництва електроенергії [10]. Незважаючи на те, що цей процес є дуже енергоємним і призводить до значних енергетичних втрат, процедура є досить простою, а інфраструктура вже створена [2]. Крім



того, аміак може ефективно використовуватися для зберігання енергії, оскільки його ціна є більш конкурентоспроможною, ніж зберігання чистого водню. Згідно з дослідженням, зберігання водню у вигляді аміаку протягом 182 днів коштує 0,54 \$/кг, порівняно з 14,95 \$/кг для чистого водню. У Катарі вже існують сховища, які використовують аміак для зберігання водню. Якщо аміак використовується виключно як паливо, його енергоємність дорівнює енергоємності водню. Повне окислення аміаку є чистим, оскільки продуктами є азот, вода і виділення тепла (рівняння (2)).



Основною проблемою використання аміаку є його висока токсичність та небезпечність. Аміак – це безбарвний газ з різким запахом, легший за повітря, і він може спричинити серйозні проблеми зі здоров'ям. У рідкій фазі аміак є сильно корозійним, особливо в суміші з водою. Крім того, неповне згорання аміаку призводить до утворення викидів забруднюючих речовин  $\text{NO}_x$ . Проблеми, пов'язані з безпосереднім застосуванням аміаку в двигунах внутрішнього згорання або газових турбінах, пов'язані з високою температурою займання ( $\sim 650^\circ\text{C}$ ), і порівняно меншу густину енергії, ніж у бензину, що вимагає модифікації двигуна [10]. Крім того, аміак має низьку швидкість горіння і часто потребує добавок, таких як  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$  або дизельне паливо, щоб його запалити. Безпосереднє застосування в паливних елементах можливе лише для твердооксидних паливних елементів (SOFC) через високі робочі температури, де аміак може бути розщеплений і утилізований за допомогою водню. Використання аміаку як палива викликає певні занепокоєння; тим не менш, Міжнародне агентство з охорони навколишнього середовища класифікувало аміак як потенційний носій енергії, і в усьому світі докладаються значні зусилля для створення екологічно чистого виробництва.

#### **Синтез аміаку**

Основними компонентами для синтезу аміаку є водень ( $\text{H}_2$ ) та азот ( $\text{N}_2$ ) за допомогою процесу Габера-Боша. Водень найчастіше отримують шляхом риформінгу природного газу, на який припадає від 1 до 2% річної потреби в енергії [12]. Процес Хабера-Боша є енергоємним і кінетично складним. Важливо підкреслити, що виробництво аміаку Haber-Bosch працює як безперервний процес, в якому при кожному проходженні через реактор відбувається перетворення лише близько 15%  $\text{N}_2$  і  $\text{H}_2$  в  $\text{NH}_3$ , але при безперервній рециркуляції загальний коефіцієнт перетворення стано-

вить близько 97% [13]. Така рециркуляція означає, що перерви в роботі ВРЕС (відновлюваних джерел енергії з сонячної та вітрових ресурсів) не є серйозною проблемою, оскільки сировину можна виробляти, коли є надлишок електроенергії, і зберігати її для подальшого використання. Деякі типи «зелених» процесів синтезу аміаку були продемонстровані в Америці, Австралії, Африці, Канаді, Німеччині, на Близькому Сході, в Норвегії та Великобританії. Крім того, на фермі Pinehurst Farm в штаті Айова вже кілька років працює невелика сонячна установка з виробництва аміаку. Вироблений таким чином аміак використовується як добриво та паливо для тракторів [14].

#### **Біодизель (БД)**

БД складається з моноалкільних ефірів – довгих ланцюжків олій жирних кислот, отриманих з відновлюваних джерел ліпідів, таких як неїстівні овочі, лігноцелюозна біомаса або тваринні жири. Існує чотири покоління БД, хоча лише два з них досягли комерційних масштабів. БД 1-го покоління – це біопаливо, яке виробляється з харчових культур, таких як кукурудза, цукрова тростина, пшениця та рослинні олії. Друге покоління виробляється з енергетичних і неїстівних овочів, відпрацьованих масел і лігноцелюозної сировини. Важливо підкреслити, що БД може вироблятися стабільно лише в тому випадку, якщо виробництво не конкурує з ланцюжком постачання продуктів харчування. БД 3-го та 4-го поколінь все ще перебуває на стадії становлення і включає в себе біомасу водоростей та генетично модифіковані мікроорганізми відповідно до [15]. На сьогоднішній день БД успішно застосовується в транспортному секторі в паливних сумішах зі звичайною нафтою. Існує два стандарти для виробництва БД: для ЄС (EN14214) та для США (ASTM 6751). Теплотворна здатність БД становить від 38 до 45 МДж/кг, що можна порівняти зі звичайним дизельним паливом.

Проблеми з біодизелем в основному пов'язані з його високою в'язкістю та густиною, що призводить до проблем з впорскуванням палива. З цієї причини БД змішують з дизельним паливом для покращення холодного запуску та впорскування палива. Згідно з [16] нижча енергетична щільність означає дещо більшу витрату палива. З іншого боку, продуктивність БД в звичайних двигунах з індукційним впорскуванням є досить високою. Скорочення викидів забруднюючих речовин може становити до 78%, залежно від якості палива та співвідношення компонентів суміші. Зокрема, при спалюванні БДпалива зменшується утво-

рення оксиду вуглецю (CO), CO<sub>2</sub>, твердих частинок та незгорілих вуглеводнів, тоді як викиди NO<sub>x</sub> є дещо вищими. Було показано, що продуктивність двигуна може бути збільшена на 3%, коли 20% БД змішується з бензином [17]. В даний час БД виробляється шляхом перетерифікації, коли сировина змішується з метанолом або етанолом. Піроліз може бути новим потенційним методом виробництва високоякісного БДного палива з різної сировини. Цікавою темою досліджень є покращення якості біомасел через процес спільного піролізу з відходами для покращення якості та властивостей палива.

#### ***Піроліз паливних сумішей для покращення характеристик біопалива***

Піроліз – це метод термохімічного перетворення, при якому термічне розкладання відбувається за відсутності кисню. Похідними продуктами є карбонізований залишок, рідини та газу. Останнім часом піроліз впроваджується як перспективний метод перетворення відходів металургійних підприємств у цінні види палива та хімічні речовини [14]. Залежно від бажаного розподілу продукту, піроліз проводять при різних температурних діапазонах. Якщо бажано отримати рідкий вихід, температура піднімається до 600°C для більшої частини сировини, тоді як газифікацію проводять при температурі вище 700°C.

Піроліз біомаси найчастіше здійснюється при температурі від 200 до 450°C, де сировина перетворюється на високоякісні рідини, піролізні газу та багатий на вуглець зольний залишок [18]. Вихід продукту залежить від умов експлуатації та типу сировини, тоді як отримані продукти, як правило, повинні пройти процеси переробки перед використанням. Наприклад, біомасла, як правило, мають нижчу теплотворну здатність і нестабільні при високій температурі, в той час як газу піролізу можуть містити високу частку CO<sub>2</sub> [2].

Останнім часом значні дослідницькі зусилля спрямовуються на перетворення біомаси в цінні види палива та хімічних речовин. Особливо цікавим є піроліз відходів, таких як тирса, сільськогосподарські відходи, різноманітна солома, енергетичні культури тощо [19]. Незважаючи на те, що піроліз може значно покращити властивості біомаси, подальше покращення теплотворної здатності, зниження в'язкості, високої кислотності та термічної стабільності вимагає додаткових зусиль. Цікавим може бути синергетичний ефект, який виникає під час спільного піролізу біомаси з відходами пластику. Пластик має високий вміст вуглецю та водню, а теплотворна здат-

ність подібна до викопного палива. Крім того, низький вміст або повна відсутність кисню в елементному складі призводить до утворення оксигенованих сполук, що є основним недоліком біопалива. Кілька досліджень показали, що спільний піроліз значно покращує властивості біомасла з точки зору теплоти згорання, термічної стабільності та в'язкості. Оскільки хімічна та механічна переробка пластмас є дорогою, а для деяких типів навіть неможливою, спільний піроліз здається перспективним методом управління відходами [2]. Крім того, різні типи відходів, що не підлягають вторинній переробці, можуть бути піддані спільному піролізу з біомасою, такою як осад стічних вод, харчові відходи, гума тощо [2]. Незважаючи на те, що проведені дослідження показали, що властивості продуктів значно покращуються в процесі піролізу, необхідно зробити більше для зменшення виходу різних забруднюючих речовин, які обмежують негайну утилізацію.

Отже, у декарбонізованій енергетичній системі необхідність використання альтернативних видів палива є необхідною. Особливо важливою є їх роль у декарбонізації транспорту та промисловості, де використання електроенергії є менш доцільним або неможливим. Важливо зазначити, що на сьогоднішній день виробництво палива найчастіше ґрунтується на викопних ресурсах, використовуючи їх як сировину і паливо. Отже, з даного огляду можна зробити наступні висновки:

Перш за все, доступність викопних видів палива ускладнює для альтернативних видів палива досягнення конкурентоспроможної собівартості виробництва. У випадку з біопаливом та відходами основною проблемою є критерій якості; нижча теплота згорання, вища кислотність, термічна стабільність і т.п. обмежують більш широке використання наявних на сьогоднішній день комерційно доступних видів біопалива. Тим не менш, дослідження в цій галузі тривають вже деякий час з постійним вдосконаленням вироблених видів палива, а це означає, що роль такого палива не викликає сумнівів у майбутньому. З іншого боку, розглянуті хімічні речовини (H<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> та спиртовмісні палива) мають добре відому технологію виробництва, але вони переважно синтезуються для промислових потреб. Але, впровадження нових видів палива вимагає модифікації існуючих технологій утилізації. В той час як біопаливо та спиртове паливо можуть бути ефективно використані в існуючих двигунах з невеликими модифікаціями, у випадку водню та аміаку необхідна розробка нових технологій або значні модифікації. Паливні елементи, розроблені

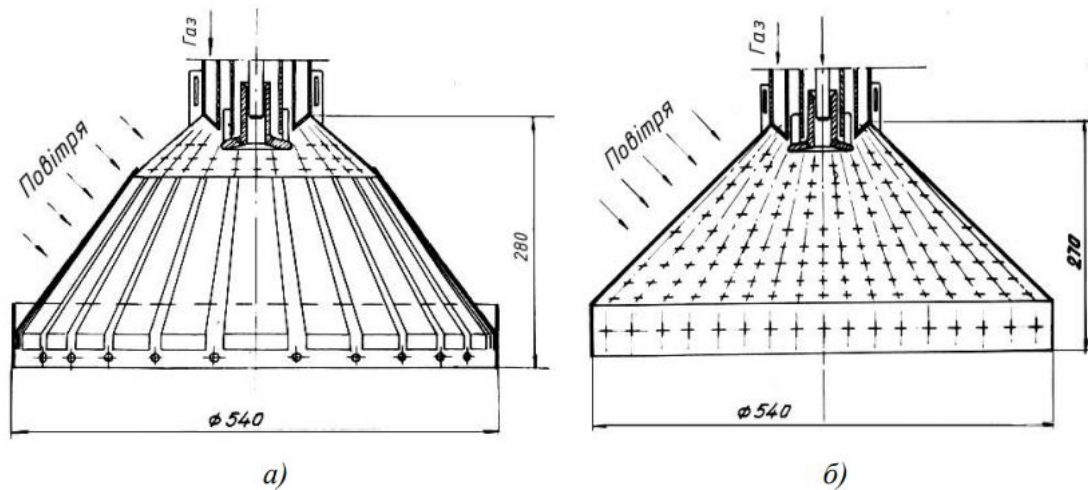


Рис. 2. Схема проточної частини струменево-стабілізаторного (а) та струменевого пальників (б)

для використання водню, демонструють чудові перспективи для застосування як в стаціонарних, так і в портативних пристроях, навіть незважаючи на те, що необхідна додаткова робота для оптимізації робочих параметрів і підвищення ефективності. Останньою перешкодою для ширшого впровадження альтернативних видів палива є виробництво, яке повинно переорієнтуватися на чисті та стійкі рішення. У випадку з біопаливом це, в першу чергу, означає утилізацію відходів сільськогосподарської та промислової біомаси для виробництва високоякісного екологічно чистого палива. Водночас, для досягнення вуглецевої нейтральності, виробництво синтетичних палив повинно переорієнтуватися на нові рішення, які не передбачають переробку викопного палива як сировини.

### 3. Технології спалювання палива КПІ імені Ігоря Сікорського

На теренах Київського політехнічного інституту тривалий термін розроблялись та вдосконалювались високоефективні пальникові пристрої (ПП) струменево-стабілізаторного типу, які характеризуються високою інтенсифікацією процесу горіння та надійною роботою в широкому діапазоні теплових навантажень

ПП струменево-стабілізаторного типу працюють на основі дифузійного принципу сумішоутворення. Паливо подається у зону рециркуляції, що утворюється за стабілізатором через обтікання потоком повітря. У струменевих ПП струмені повітря взаємодіють зі струменями газу. Повітря надходить через отвори на конічній поверхні, а паливо подається в затінену зону, яка формується з рядів спарованих повітряних отворів (рис. 2).

Струменеві та струменево-стабілізаторні ПП призначені для ефективного спалювання палива за високих коефіцієнтів надлишку повітря. Вони також володіють властивістю саморегулювання складу паливної суміші в зоні розвитку факелів полум'я, що дозволяє працювати при змінних коефіцієнтах надлишку повітря. Ці характеристики знайшли застосування при впровадженні технології для компресорних станцій газотранспортного устаткування.

Наступною перспективною розробкою, виконаною в «КПІ» була реалізація дифузійно-стабілізаторної технології з використанням трубчастих каналів з розширенням потоку (див. рис. 3). Ця схема використовує трубчасті модулі для стабілізації та інтенсифікації горіння, що дозволяє знизити токсичні викиди продуктів згорання завдяки попередньому сумішоутворенню, стадійному спалюванню та прямої аеродинамічній схемі течії. У порівнянні зі струменевими та струменево-стабілізаторними ПП, трубчасті модулі мають значно менший гідравлічний опір.

На основі запропонованої конструкції була розроблена і впроваджена дифузійно-стабілізаторна технологія спалювання палив, яка використовує аеродинамічні ефекти взаємодії системи паливних струменів, впроваджуваних у зону змішування палива та повітря, за тілами з неповною обтічністю, які знаходяться у потоці окисника (див. рис. 2). Палильні пристрої цієї конструкції відносяться до проміжної групи, яка поєднує кінетичні та дифузійні характеристики, що визначає їхні робочі параметри. Використання такої технології забезпечує високу інтенсивність змішування палива з повітрям у зоні циркуляції.



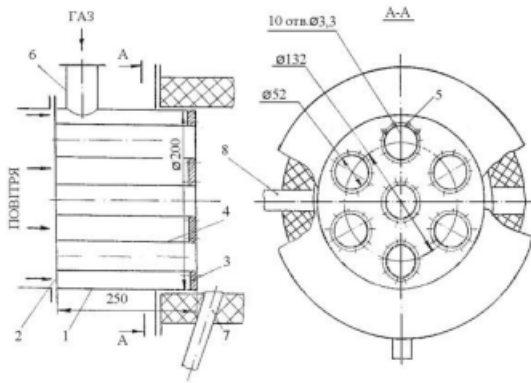


Рис. 3. Загальний вид пальника на основі трубчастих модулів: 1 – корпус; 2 – фронтальна трубка дошка; 3 – задня трубка дошка; 4 – повітряні трубки; 5 – газові отвори; 6 – патрубок подачі палива; 7 – запальник; 8 – канал візуалізації

На сьогоднішній день однією з найбільш поширених вітчизняних технологій спалювання є технологія з нішевою системою (СНТ) (рис. 4). Вона базується на декількох основних принципах:

- раціональний розподіл палива в потоці окисника;
- стійка регульована структура течії палива, окисника та продуктів згоряння;
- саморегульованість складу паливної суміші в зоні стабілізації факелу.

Всі ці принципи досягаються завдяки вдалому конструктивному розташуванню струменевонішевої системи на автономних колекторах-пілонах, які утворюють пальник [20].

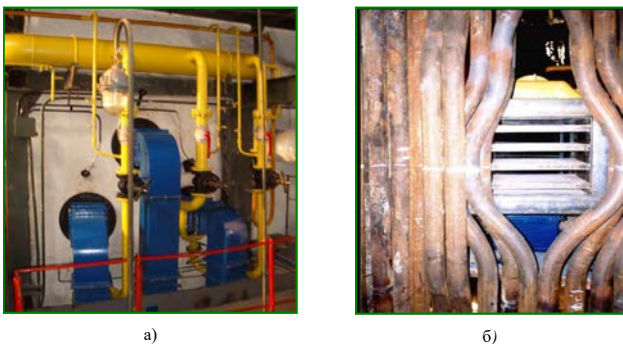


Рис. 4. ПП СНТ на котлі ПТВМ-30

**Висновки.** Більшість альтернативних палив досі не досягли комерційного масштабу застосування через обмеження в процесах виробництва або споживання та технологіях. Головним чином це пов'язано з високими енерговитратами, яке палива повинні пройти протягом життєвого циклу, або економічною життєздатністю самого процесу виробництва. Біомаса наразі є єдиним альтернативним паливом, що використовується на комерційній основі, і очікується, що її спо-

живання зростатиме. Інші альтернативні види палива, такі як водень, аміак, метанол, БД, біогаз, паливо з відходів тощо, все ще не досягли комерційної зрілості, а їх поточне споживання є майже незначним. Для стимулювання ширшого використання водню як альтернативного палива необхідна відповідна політика. Аміак може відігравати важливу роль як накопичувач, або носій енергії в майбутній енергетичній системі, має налагоджену інфраструктуру для виробництва і транспортування. Спиртовмісні види палива вже використовуються, та мають потенціал для використання в судноплавстві, та автотранспорті. Відходи, що не підлягають вторинній переробці, можна ефективно використовувати як сировину для виробництва палива, вирішуючи проблеми зі спалюванням відходів. Наразі бракує комплексних оглядів, які б узагальнювали та оцінювали альтернативні види палива, їхні переваги, недоліки та перспективи впровадження.

Синтез альтернативних видів палива слід поєднувати з ВДЕ, що дозволить їм більше проникнути в енергетичну систему, одночасно зменшуючи вуглецевий слід від виробленого палива. Поєднання синтезу з ВДЕ може також знизити виробничі витрати, коли буде досягнута більша частка нестабільних відновлюваних джерел. Помітною тенденцією в дослідженнях є пряме використання сонячної енергії для паливного синтезу. Основна перевага сонячного виробництва полягає в тому, що немає потреби в зовнішньому джерелі енергії. Тим не менш, низька ефективність перетворення сонячної енергії значно впливає на загальну ефективність процесу, що робить сонячну енергетику економічно неконкурентоспроможною. Крім того, значні дослідницькі зусилля спрямовуються на розробку технологій, які можуть працювати в гнучкому режимі в комерційних масштабах. Це особливо важливо для технологій електролізу та уловлювання вуглецю, які використовуються для виробництва необхідної сировини ( $H_2$  та  $CO_2$ ) для синтезу альтернативних видів палива. Поєднання цих технологій з ВДЕ матиме численні переваги, такі як зниження виробничих витрат, зменшення обмежень у виробництві електроенергії та покращення стабільності енергосистеми. Говорячи про методи термохімічного перетворення для виробництва альтернативного палива, значні дослідницькі зусилля докладаються для того, щоб вивести такі процеси на більш масштабний і комерційний рівень. Піроліз та газифікація особливо біопаливні технології цікаві тим, що вони можуть переробляти різні відходи і перетво-



рювати їх на цінне паливо або хімічні речовини. Останнім часом фокус досліджень змістився на покращення властивостей біопалива шляхом спільного піролізу або спільної газифікації з висококалорійними відходами (тобто з пластиками, що відслужили свій термін). Це важливо не тільки для синтезу палива, але й як метод поводження з відходами.

Відомі вітчизняні розробки промислового газопальникового устаткування можуть стати у нагоді при адаптації існуючих технологій горіння традиційних викопних палив до альтернативних варіантів їх використання. Наукові розробки КПІ у цьому плані є перспективним напрямом поступового переходу до альтернативного палива енергетичними об'єктами країни.

#### Список літератури:

1. Handbook of Alternative Fuel Technologies, Second /edited by: Sunggyu Lee, James G. Speight, Sudarshan K. Loyalka/ 2014
2. H. Stancin , H. Mikulcic , X. Wang ,N. Duic / A review on alternative fuels in future energy system/ Renewable and Sustainable Energy Reviews /Volume 128/ August 2020, 109927 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032120302185>
3. Brynolf S, Taljegard M, Grahn M, Hansson J. Electrofuels for the transport sector: a review of production costs. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;81:1887–905. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.288>.
4. Lester MS, Bramstoft R, Münster M. Analysis on electrofuels in future energy systems: a 2050 case study. *Energy* 2020;199. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117408>.
5. Гунько Ірина Василівна/ ТЕНДЕНЦІЇ ДИВЕРСИФІКАЦІЇ ЕНЕРГОНОСІЇВ МАШИНИХ АГРЕГАТІВ/ Вінницький національний аграрний університет/ Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2021
6. Lehtveer M, Brynolf S, Grahn M. What future for electrofuels in transport? Analysis of cost competitiveness in global climate mitigation. *Environ Sci Technol* 2019;53:1690–7. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05243>.
7. Philipp Rungea, Christian Sölchb, Jakob Albertc, Peter Wasserscheidc, Gregor Zöttlb, Veronika Grimma. Economic comparison of different electric fuels for energy scenarios in 2035. *Applied Energy Volumes* 233–234, 1 January 2019, Pages 1078-1093.
8. Abdalla AM, Hossain S, Nisfindy OB, Azad AT, Dawood M, Azad AK. Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: a review. *Energy Convers Manag* 2018;165:602–27.
9. Acar C, Dincer I. Review and evaluation of hydrogen production options for better environment. *J Clean Prod* 2019;218:835–49.
10. Giddey S, Badwal SPS, Munnings C, Dolan M. Ammonia as a renewable energy transportation media. *ACS Sustainable Chem Eng* 2017;5:10231–9.
11. Valera-Medina A, Xiao H, Owen-Jones M, David WIF, Bowen PJ. Ammonia for power. *Prog Energy Combust Sci* 2018;69:63–102.
12. Yapicioglu A, Dincer I. A review on clean ammonia as a potential fuel for power generators. *Renew Sustain Energy Rev* 2019;103:96–108.
13. Boulamanti A, Moya JA. Production costs of the chemical industry in the EU and other countries: ammonia, methanol and light olefins. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;68:1205–12. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.02.021>.
14. Toyne D, Schmuecker J. Our demonstration farm renewable hydrogen and ammonia generation system. 2017. p. 1–17.
15. Salián K, Strezov V. *Biofuels from microalgae*, vol. 3. Elsevier; 2017.
16. Othman MF, Adam A, Najafi G, Mamat R. Green fuel as alternative fuel for diesel engine: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;80:694–709.
17. Mohd Noor CW, Noor MM, Mamat R. Biodiesel as alternative fuel for marine diesel engine applications: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;94:127–42.
18. Kumar R, Strezov V, Lovell E, Kan T, Weldekidan H, He J, et al. Bio-oil upgrading with catalytic pyrolysis of biomass using Copper/zeolite-Nickel/zeolite and Copper-Nickel/zeolite catalysts. *Bioresour Technol* 2019;279:404–9.
19. Gonzalez-García S, Bacenetti J. Exploring the production of bio-energy from wood biomass. Italian case study. *Sci Total Environ* 2019;647:158–68.
20. Сірий О. А. Вплив параметрів струменево-нішевої системи на робочий процес пальникових пристроїв : автореф. дис. ... канд. технн. наук. : 05.14.14 – теплові та ядерні енергоустановки / Олександр Анатолійович Сірий. – Київ, 2016. – 28 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/17858>

**Dulskiy A.I., Storozhuk M.S. ALTERNATIVE FUELS IN ENERGY, PROBLEMS AND PROSPECTS**

*The modern world faces challenges related to the growing consumption of traditional energy resources and the negative environmental consequences of this process. The gradual transition to alternative and renewable energy sources is the main promising direction of the development of world energy. Reducing the percentage of traditional energy resources in the country's energy balance in favor of sustainable and ecologically safe renewable energy sources will reduce the negative impact on the environment. Solar, wind, hydropower, biofuels, and hydrogen energy are one of the most promising areas of energy development in our country.*

*Types of alternative fuels may differ in their source and production process. Despite this, all of them are produced in a clean method, which is not accompanied by additional emissions of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). The synthesis of alternative fuels takes place by applying two key approaches: direct utilization of excess electricity, the so-called production of "electrofuel" (EP) and thermochemical transformation of starting materials (TCP).*

*The work includes a review of literary sources from foreign practice regarding the use of alternative fuels in the energy sector. The main features of EP production such as: methanol, dimethyl ether, ethanol, methane are considered and their main properties are given. The conclusions regarding the prospects for the use of these fuels are summarized, and it is stated that EP is unlikely to occupy the main niche of the energy source for the needs of industrial production. Types of THP fuels are described, among which the main ones are: hydrogen, ammonia and biodiesel (BD). The main methods of production of these types of fuels, such as pyrolysis, biomass gasification, water electrolysis, are given, and the obstacles that at this stage prevent their wide implementation are described.*

*An important element of the technological process of using any fuel by power equipment is the proper organization of combustion technology. The article reviews domestic combustion technologies developed on the basis of scientific research at the Kyiv Polytechnic Institute. To date, one of the most common domestic burning technologies is Jet Niche Technology (SNT), the technical features of which make it possible to adapt fire engineering equipment for burning traditional and alternative fuels.*

**Key words:** *alternative fuels, EF, biomass, hydrogen, ammonia, ethanol, combustion technology, burner device.*