

**ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ БІОМЕТАНОЛУ У КНР:
ЕКОНОМІЧНІ ТА ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ**

Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт за напрямком
«Енергетичне машинобудування»

2021 р.

ЗМІСТ	Стор.
Вступ	3
1. Переваги палива на основі метанолу	5
2. Виробництво метанолу	5
3. Методика дослідження	7
3.1. Властивості палив	7
3.2. Показник викидів вуглекислого газу	8
3.3. Показники ефективності	9
4. Результати досліджень	10
4.1. Шлях утилізації метанолу	10
4.2. Викиди вуглекислого газу	11
4.3. Економічна оцінка	15
Висновки	20
Список літератури	21

Вступ

Автомобільний транспорт споживає близько 33 % загального споживання енергії транспортом. Нафтове паливо є в первинних видах палива дорожнього транспорту. Їх спалювання призводить до шкідливих викидів, включаючи викиди вуглекислого газу.

За даними Міжнародного енергетичного агентства (МЕА), викиди вуглекислого газу збільшуються. У 2018 році їх значення перевищило 33 Гт. Щоб пом'якшити зміну клімату, Міжурядова комісія ООН з питань зміни клімату рекомендувала зменшити викиди парникових газів на 50–85% до 2050 року. Зменшення шкідливих викидів можна досягти, використовуючи альтернативні види палива для автомобілів, включаючи метанол. Метанол може принести економічні та екологічні вигоди Китаю. Це паливо є екологічно чистим. Більше того, його застосування призводить до зменшення витрат на паливо. Китай імпортує близько 65% нафти та 31% природного газу. Використання палива на основі метанолу може зменшити імпорт вищезазначених енергетичних ресурсів. З 2000 року китайський уряд покращив національну енергетичну незалежність та скоротив шкідливі викиди. Отже, збільшення парку метанольних транспортних засобів забезпечує стійке економічне зростання країни.

Метанол переважно перетворюється на наступні види палива: чистий метанол — М100; суміш метанолу та бензину (М5, М10, М15, М30, М50 та М85); бензин на основі метанолу; метиловий третинний бутиловий ефір (МТВЕ); диметиловий ефір (DME); та біодизель. Метанол може бути перетворений у різні вуглеводні, включаючи олефіни. Олефіни є цінною сировиною для виробництва рідких транспортних палив, таких як бензин, дистилат та диметиловий ефір [1,2]. У 2018 році автомобільним транспортом у Китаї спожито 126 мільйонів тонн бензину та 156 мільйонів тонн дизельного палива. Тим часом споживання метанолу становило близько 17,4 млн тонн. Виробництво та використання метанолу зростає головним чином за рахунок використання метанолу транспортом у Китаї.

Найбільшим виробником метанолу у світі є Китай (близько 70 млн. Тонн). Інші країни виробляли значно менше метанолу. Наприклад, у 2018 році США виробили 5,7 млн. Тонн, а Росія - 4,46 млн. тонн. Метанол є важливою хімічною речовиною. Він використовується переважно в Азії, а Китай є найбільшим споживачем метанолу. Споживання метанолу за регіонами світу є таким, у відсотках: Китай - 58%; решта Азіатсько-Тихоокеанського регіону - 16%; Європа - 13%; Латинська Америка - 2%; Північна Америка — 10%. Зростання виробництва метанолу в Китаї мав позитивну динаміку, незважаючи на те, що зростання світового виробництва метанолу сповільнилося. Споживання палива на основі метанолу збільшилось (рис. 1).

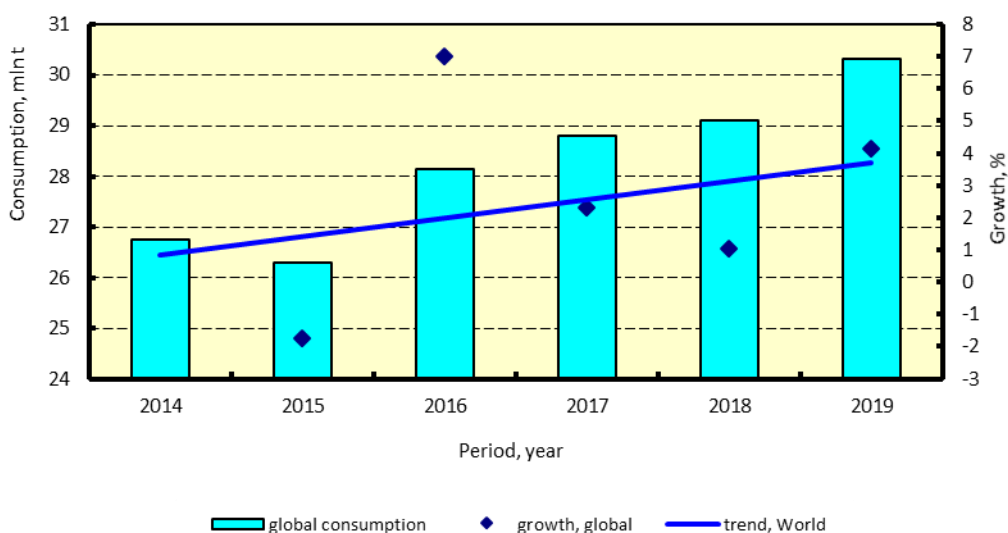


Рисунок 1. Глобальне споживання метанолу як палива.

Биометанол дуже привабливий для енергетичного сектору. Це робить можливим розвиток економіки метанолу. Цю ідею запропонував нобелівський лауреат Г.А. Олах [3,4]. Перехід до економіки метанолу може дозволити Китаю досягти таких результатів: посилення енергетичної безпеки; зменшення забруднення повітря та викидів вуглекислого газу; та збільшення доданої вартості вітчизняної економіки. Тому використання метанолу дає відчутні переваги.

1. Переваги палива на основі метанолу

Використання метанолу як палива (чистого або суміші) має значні переваги перед традиційним використанням. Тянь та ін. надав порівняльний опис використання метанолу в паливних сумішах. Застосування M20 спричинило збільшення теплової ефективності двигунів та зменшення викидів CO, CO₂ та NO_x. Ван та співавт. [5] повідомляв, що M15 та M25 є більш прийнятними порівняно з бензином. Вони мають кращі екологічні та економічні показники. Сан та ін. виявив, що паливо на основі метанолу є чудовою та недорогою альтернативою бензину та дизельному паливі. Цей алкоголь може відповідати новим нормам викидів. Хуанг та ін. [6] аналізував метанол як вихідну сировину для виробництва DME, біодизеля, MTBE та бензину (MTG). Дюресамі та ін. [7], Јіа та Denbratt [8] та Prasad та ін. [9] вивчав використання метанолу в дизельних двигунах. Вони виявили, що метанол не впливає на ефективність дизельного палива; однак це зменшує викиди HC і CO на 30–40%. Однак викиди вуглекислого газу, що добре прокидаються, враховані в економії палива та економічності двигуна, вивчалися недостатньо. Метанол біологічно розкладається. Це паливо деградує швидше, ніж нафтове паливо. При високій концентрації метанол є отрутою. Однак не було жодного випадку випадкового отруєння метанолом.

2. Виробництво метанолу

У Китаї в даний час найпоширенішими видами сировини для виробництва метанолу є вугілля, природний газ та коксові газу. Тим часом у всьому світі комунальні та промислові відходи, біомаса та вуглекислий газ є перспективною сировиною для зеленого метанолу. Технологія виробництва метанолу сильно залежить від типу вихідної сировини. Таким чином, синтез-газ можна отримувати шляхом риформінгу газоподібних вуглеводнів та газифікації

твердих та рідких вуглеводнів. Крім того, можна використовувати водень та вуглекислий газ.

Ряд вчених та експертів зосереджували увагу на використанні вугілля та природного газу як вихідної сировини для виробництва метанолу. Інша група вчених наголосила на можливості використання метанолу на основі біомаси. Целюлозна біомаса, тирса, гліцерин, вуглекислий газ та вітер також вивчалися як вихідна сировина для виробництва метанолу. Лю [10] запропонував використовувати комбіновану сировину, таку як вугілля (50%) та біомаса (50%).

Вчені приділяли велику увагу використанню промислових та комунальних відходів як вихідної сировини для виробництва метанолу. Ян та ін. наголосив на важливості поступового переходу від технології вугілля до метанолу до біомаси до метанолу. Це може зменшити викиди CO₂. Руд-Гуцмер та ін. розглянуто спільне використання викопного палива (вугілля та природного газу) та біомаси для виробництва метанолу [11]. Тверді побутові відходи рекомендується використовувати для реалізації моделі кругової економіки. Боргвардт зробив висновок, що целюлозна біомаса може обіцяти заміщення сирої нафти [12]. Деревна біомаса потенційно ефективна для використання у виробництві метанолу для лісових масивів. Найефективнішим та перспективним способом виробництва метанолу є використання відновлюваного водню та переробленого вуглекислого газу. Ефективність використання енергії вітру та водню для виробництва метанолу доведена дослідженнями [13].

Для реалізації стійкої та низьковуглецевої економіки у ланцюг виробництва палива слід впроваджувати відновлювану енергію. Ключовим стратегічним фактором цього сценарію є перетворення вуглекислого газу у вихідну сировину для виробництва метанолу та DME. Особлива увага була приділена метанолу до DME та процесу одноразового діоксиду вуглецю до DME.

Таким чином, використання певних ресурсів для виробництва метанолу залежить від природних ресурсів та відходів у різних галузях економіки.

Вищезазначені дослідження є рушійною силою інноваційних позитивних змін в автомобільній промисловості. Використання метанолу як суміші чи

чистого палива призводить до підвищення ефективності двигуна, зменшення шкідливих викидів та підвищення економічної ефективності. Китай має досвід використання чистого метанолу або M100 як транспортного палива. Наприклад, Geely Auto випустила метанольну версію автомобілів. Вони використовуються в Цзіньчжун у провінції Шаньсі [14].

Однак бракує досліджень щодо потенціалу сталого виробництва метанолу з наявних сировинних ресурсів та пов'язаних з цим економічних та екологічних вигод (викиди вуглекислого газу).

Мета цього дослідження - виявити переваги метанолу як стійкого палива для наземного транспорту та компонента похідного палива, а саме: (i) економія витрат на паливо; (ii) добре викиди вуглекислого газу; (iii) перспективне зелене джерело електроенергії та обсяг виробництва відновлюваного метанолу; та (iv) перспективні ресурси та обсяги виробництва біометанолу. Третій розділ представляє методи та дані, четвертий розділ стосується результатів, а п'ятий розділ завершує роботу.

3. Методика дослідження

3.1. Властивості палив

У цьому дослідженні аналізували метанол та нафтове паливо. Метанол має низьке цетанове число, і тому його не можна використовувати для дизельних двигунів. Цей вид палива підходить для двигунів із іскровим запалюванням, газових турбін та паливних елементів. Його нижчі значення нагрівання менше, ніж у нафтового палива, і воно має високу температуру випаровування. Молекулярні композиції - це основні відмінності між звичайними видами палива та метанолом. Дизельне паливо або бензин не містять кисню, тоді як метанол має 50% маси кисню (табл. 1).

Фізичні та хімічні властивості окремих видів палива.

Властивості	Одиниця	Дизель	Бензин	Метанол
Щільність	кг/м ³	840	740	796
Цетанове число	-	>40		<5
Октанове число	-	-	95	-
Температура кипіння	К	453–643	298–488	338
Нижче значення опалення	МДж/кг	42.5	44	19.67
Стехіометричне співвідношення повітря-паливо	-	14.6	14.7	6.45
Тепло випаровування	кДж/кг	243	180–350	1100
В'язкість	сСт	4.59	0.57	0.65
Температура самозаймання	К	503	465–743	736
Вміст вуглецю за масою	%	85	86	37.5
Вміст водню за масою	%	15	14	12.5
Вміст кисню за масою	%	0	0	50
Питома емісія діоксиду вуглецю	г/МДж	73.33	73.95	68.44

3.2. Показник викидів вуглекислого газу

Викиди вуглекислого газу будь-якого палива залежать від ефективності двигуна та властивостей палива, таких як нижча теплова цінність та вміст вуглецю. Питома витрата пального будь-якого двигуна становить

$$SFC = 3600 \cdot (\eta \cdot LHV_f)^{-1}, \text{ кг/кВт-год}, \quad (1)$$

де η - ККД двигуна; LHV_f - нижня теплова потужність палива, кДж / кг.

Викиди вуглекислого газу залежать від вмісту вуглецю в паливі

$$CDE = \frac{11}{3} \cdot FCC, \text{ кг/кг}, \quad (2)$$

де FCC - це вміст вуглецю в паливі в кг / кг.

Тоді питомих викид вуглекислого газу можна розрахувати за такою формулою:

$$SCDE = SFC \cdot CDE = 3600 \cdot (\eta \cdot LHV_f)^{-1} \cdot \frac{11}{3} \cdot FCC = 13200 \cdot FCC \cdot (\eta \cdot LHV_f)^{-1}, \text{ кг/кВт-год}, \quad (3)$$

У нашому дослідженні ми взяли до уваги загальний життєвий цикл палива та розрахували викиди, що прокидаються (WTW). Викиди вуглекислого газу в будь-який двигун та будь-яке паливо можна розрахувати за такою формулою:

$$WTW = \frac{3600}{\eta \cdot LHV} \cdot \left(FCC \cdot \frac{11}{3} + WTT_f \right), \text{ кг/кВт-год}, \quad (4)$$

де WTT_f - викиди вуглекислого газу для певного палива в кг CO₂-екв/кг.

Отже, для зменшення викидів вуглекислого газу в атмосферу ефективність двигуна повинна бути збільшена, а вміст вуглецю в паливі має бути зменшений.

У WTW викиди для транспортних засобів зможуть бути обчислені з допомогою наступного виразу :

$$WTW = \sum_{i=1}^n \left\{ FE_i \cdot \rho_i \cdot \left(\frac{11}{3} \cdot FCC_i + WTT_i \right) \right\}, \text{ кг/100 км,} \quad (5)$$

де WTT_i - це викиди вуглекислого газу для i -го паливного компонента в кг CO₂-екв/кг; FE_i - це економія палива i -го паливного компонента в л/100 км.

3.3. Показники ефективності

У цьому дослідженні ми використовували такі показники: ККД двигуна ; Питома витрата палива; Економія палива.

Вищевказані показники використовувались для різних видів палива та двигунів.

Для оцінки економічної ефективності різних видів палива вартість енергії палива була розрахована наступним чином :

$$ECF = Fpr \cdot LHV_f^{-1}, \text{ Дол. США/ГДж,} \quad (6)$$

де Fpr - ціна палива в доларах США/т; LHV_f - нижня теплова цінність палива в ГДж/т.

Витрати енергії на виконання корисної роботи двигуна

$$ECUW = Fpr \cdot (\eta \cdot LHV_f)^{-1}, \text{ Дол. США/ГДж.} \quad (7)$$

Те саме значення на МВт-год обчислюється за такою формулою:

$$ECUW = Fpr \cdot (3.6 \cdot \eta \cdot LHV_f)^{-1}, \text{ Дол. США/МВт-год.} \quad (8)$$

Прийнятним співвідношенням ціни на метанол та звичайне паливо, яке враховує нижчі значення нагрівання та щільність, є тепловий коефіцієнт:

$$RMCP_{th} = \frac{LHV_M \cdot \rho_M}{LHV_C \cdot \rho_C} < \frac{Fpr_M}{Fpr_C}, \quad (9)$$

де - щільність палива на основі метанолу в кг/л; - щільність звичайного палива в кг/л.

Якщо фактичне співвідношення ціни метанолу до звичайного палива менше $RMSP_{th}$, тоді паливо на основі метанолу є конкурентоспроможним.

4. Результати досліджень

Цей розділ розділений на такі підрозділи: шлях утилізації метанолу, викиди вуглекислого газу, економічна оцінка та потенційне виробництво зеленого метанолу.

4.1. Шлях утилізації метанолу

Застосування метанолу в паливі є ключовою складовою його споживання. У 2018 році чистий метанол (M100) та суміші метанол-бензин МТБЕ та ДМЕ склали близько 17,4 млн. Тонн, або приблизно 25–27% від загальнодержавного застосування. Метанол може використовуватися кількома шляхами, включаючи безпосереднє спалювання (суміші чистого метанолу або метанолу), похідне паливо (біодизель або диметиловий ефір (DME) та паливні елементи (рис. 2). Суміші метанолу низького рівня, такі як M15 – M25, двигуни з іскровим запалюванням. Ці двигуни не потребують змін. Суміші метанолу високого рівня (M85 – M100) можуть застосовуватися лише у спеціальних двигунах [15]. Дизельні двигуни можуть бути модернізовані для застосування метанолу. Як правило, це двопаливні двигуни. Це рішення призводить до зменшення шкідливих викидів.

Паливо на основі метанолу ще не застосовується в транспорті в Європейському Союзі. Однак були розроблені нові палива на спиртовій основі. Нове паливо А7 містить 3% метанолу та 4% етанолу. Він може замінити Е5. Нове паливо А20 містить 20% спирту (15% метанолу, 5% етанолу, 80% бензину).

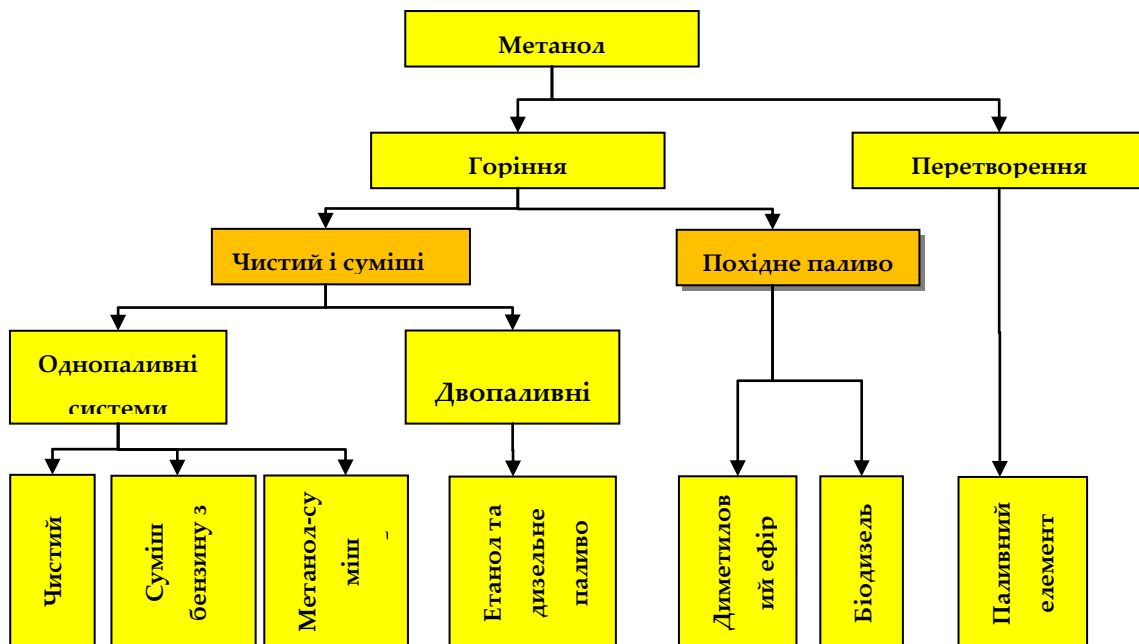


Рисунок 2. Утилізація метанолу як транспортного палива.

4.2. Викиди вуглекислого газу

Конкретні викиди вуглекислого газу палива залежать від основних факторів, таких як вміст вуглецю, нижча теплова цінність та ефективність двигуна. Викиди вуглекислого газу були розраховані за допомогою рівняння (1). Проаналізовано дизельне паливо (для дизельних двигунів), бензин та метанол (для двигунів з іскровим запалюванням та паливних елементів). Отримані результати наведені на малюнку 4. Однак вони не враховують викиди в баки (WTT) для різних видів палива для автомобілів.

Цифри показують, що тип палива не має значного впливу на викиди вуглекислого газу. Викиди в першу чергу залежать від ефективності двигуна. Це можна пояснити наступним фактом, що питомий вміст вуглецю (за масою) в одиниці енергії незначно залежить від типу палива. Вищевказане значення для метанолу дорівнює 19,065 г / МДж. Звичайні види палива мають подібні значення: бензин - 19,55 г / МДж та дизельне паливо - 20 г / МДж. Тому підвищення ефективності є основним способом зменшення викидів парникових газів.

У 2019 році автомобільна компанія Gumpert Aiways представила метанольний паливний елемент. Ця компанія розробила електромобіль у версії з метаноловими паливними елементами. Ця система має коефіцієнт корисної дії 45% та перетворює 1 літр метанолу у 2 кВт-год електроенергії. Економія палива становить 21 кВт-год на 100 км або 9,65 л метанолу на 100 км [16].

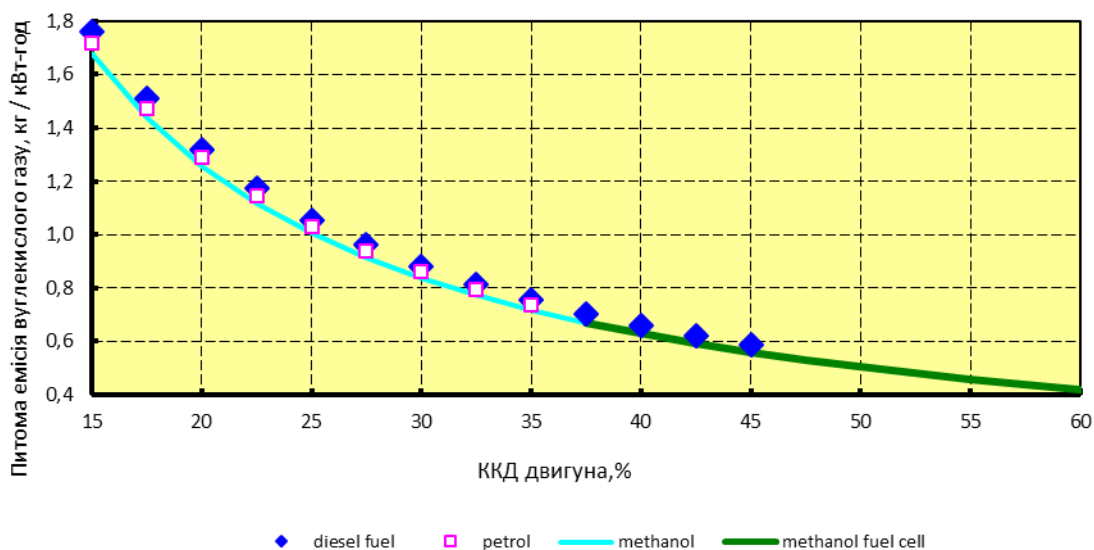


Рисунок 3. Питомі викиди вуглекислого газу від колеса до колеса.

Викиди вуглекислого газу з різних видів палива змінюються в широкому діапазоні. Щодо метанольного палива, ВТТ залежить від технології виробництва та типу вихідної сировини. Цей показник має мінімальне значення для відновлюваної сировини (біомаси) та зеленої електроенергії. Однак він гірший порівняно з біоетанолом (табл. 2).

Таблиця 2.

Викиди вуглекислого газу (WTT) для вибраних видів палива.

Паливо	Викиди вуглекислого газу WTT(г CO ₂ -екв/кг)	
	мінімум	максимум
Дизельне паливо	284	1020
Бензин	294.8	1188
Природний газ	909.5	1290.9
Біометанол (біомаса та відновлювана електроенергія)	-898	
Метанол (вугілля)	2965	

Визначено викиди вуглекислого газу на 100 км для автомобіля з метанолом Geely. Були розраховані максимальне значення танка до колеса, максимум до пробудження та мінімальне значення. Були використані фактичні дані про економію палива. Згідно з нашими розрахунками, M100 (акуратний метанол) мав найкращі значення викидів вуглекислого газу порівняно з бензином (рис. 3). Біометанол мав у чотири рази менше викидів, ніж бензин. Однак метанол, вироблений із вугілля, мав більші викиди ВВТ. Метанольний паливний елемент - перспективна технологія. Всі види метанолу (біометанол та метанол на основі вугілля) забезпечують найкращі екологічні показники порівняно з бензином.

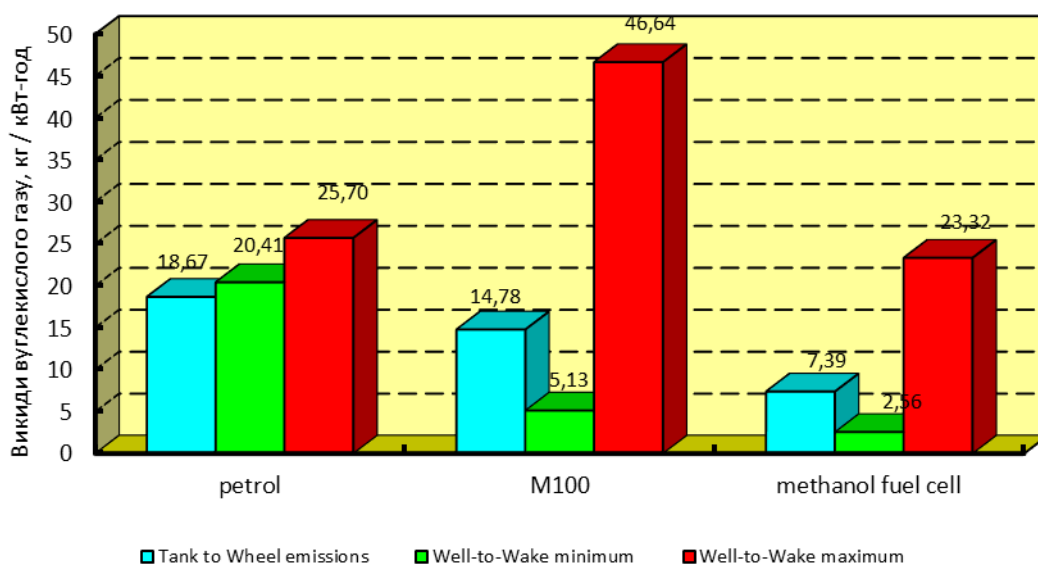


Рисунок 3. Викиди вуглекислого газу на 100 км.

Цетанове число метанолу менше 5. Проте, в дизельних двигунах можна використовувати акуратний метанол. Для його використання в двигунах із стисненим запаленням розроблена система згоряння дизельного метанолу (DMCC). Система DMCC складається з двох підсистем впорскування: метанолу та дизельного палива. Метанол впорскується у впускний отвір кожного балона з утворенням суміші повітря / метанолу. Суміш запалюється дизельним паливом. Система впорскування дизельного палива модифікована для обмеження обсягу

впорскуваного дизельного палива. При запуску двигуна та низькому навантаженні дизельний двигун працює лише на дизельному паливі. При середніх та високих навантаженнях двигун працює на метанолі та дизельному паливі. Пілотне дизельне паливо використовується для розпалювання суміші повітря / метанолу. Двигуни DMCC мають меншу непрозорість диму та викиди оксидів азоту порівняно зі звичайними дизельними двигунами. Були проаналізовані викиди вуглекислого газу у вищезазначених вантажних автомобілях. Вживання метанолу призвело до незначного зменшення викидів ТТW. Викиди ВМТ для біометанолу залежали від походження метанолу (рис. 4).

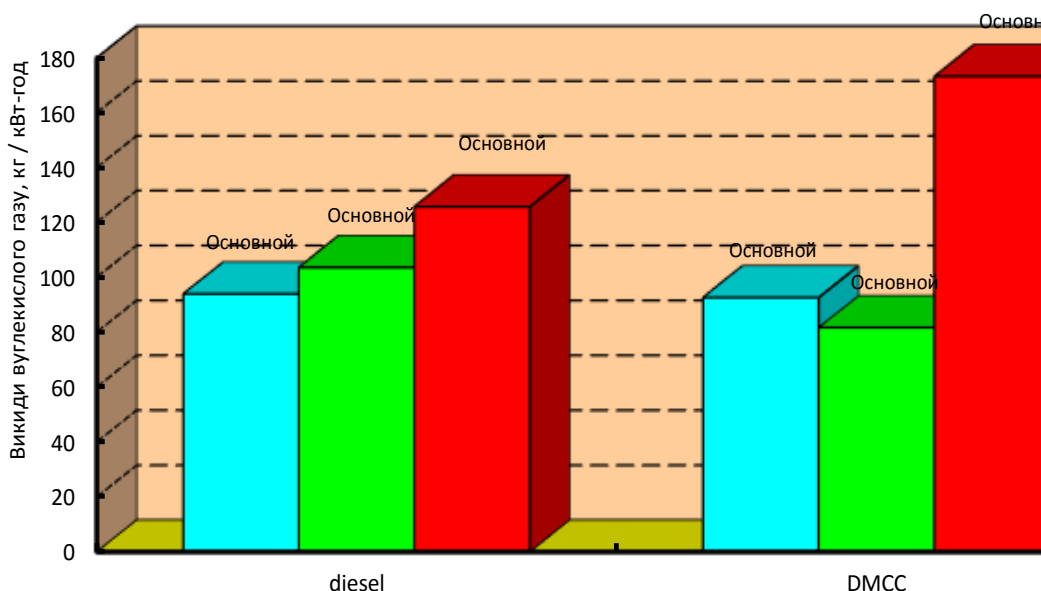


Рисунок 4. Викиди вуглекислого газу на 100 км для системи спалювання сполуки дизельного метанолу (DMCC)

Застосування метанолу дає найкращі результати для двигунів з іскровим запалюванням (SIE). Зниження викидів від бака до колеса для SIE зменшилось на 21%, а для дизельних двигунів - на 1,5%. Викиди ВТВ скорочуються на 75% для SIE та 21,2% для DMCC (якщо використовується біометанол).

4.3. Економічна оцінка

Ряд дослідників заявили, що цільовими ринками метанолу як палива є наземні транспортні засоби; посудини з метанолом (для поліпшення екологічних показників); енергозабезпечення зон відпочинку; та енергопостачання, якщо бракує недорогого викопного палива, такого як природний газ, пропан, мазут тощо). У цьому дослідженні розглядалася економічна оцінка метанолу як транспортного палива.

Для порівняння бензину та дизельного палива з метанолом був проведений економічний аналіз. Були використані ціни на бензин у Китаї та ціни на метанол Mathenex для ринків Азії [17,18] (рис. 5). Ці види палива мають різні фізичні властивості, такі як нижча теплова здатність і щільність; тому були розраховані їх енергетичні витрати (рис. 6). З жовтня 2018 року витрати на енергію бензину були вищими порівняно з метанолом.

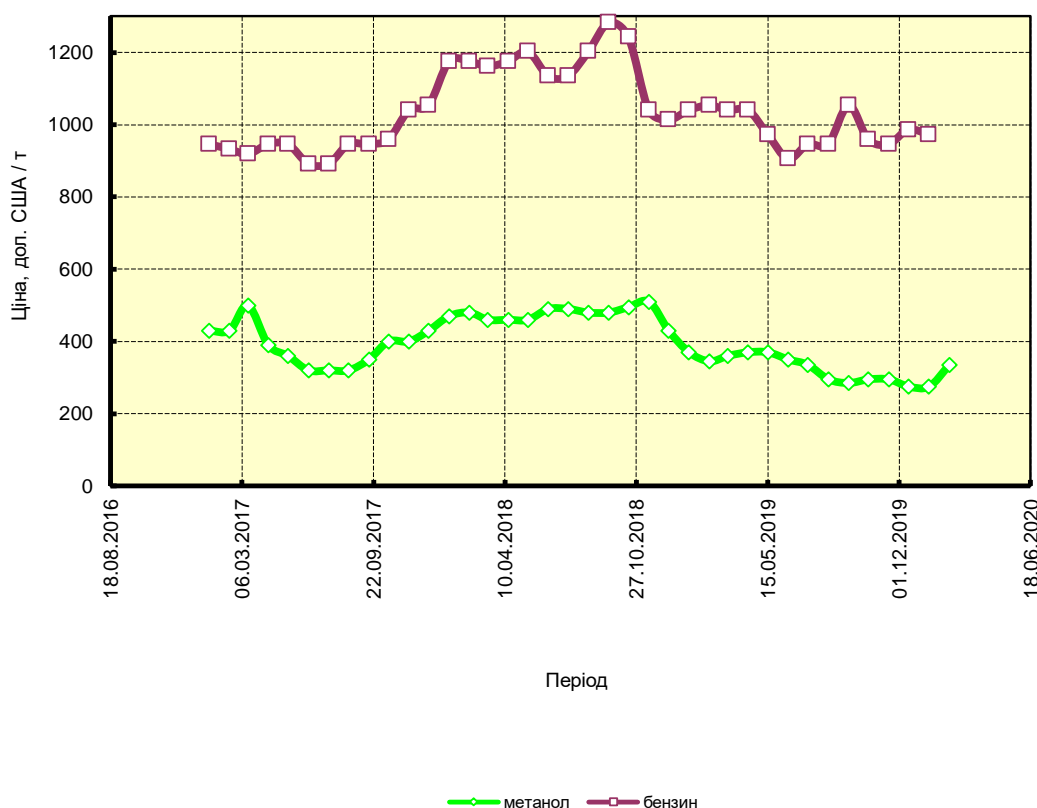


Рисунок 5. Вибрані ціни на паливо.

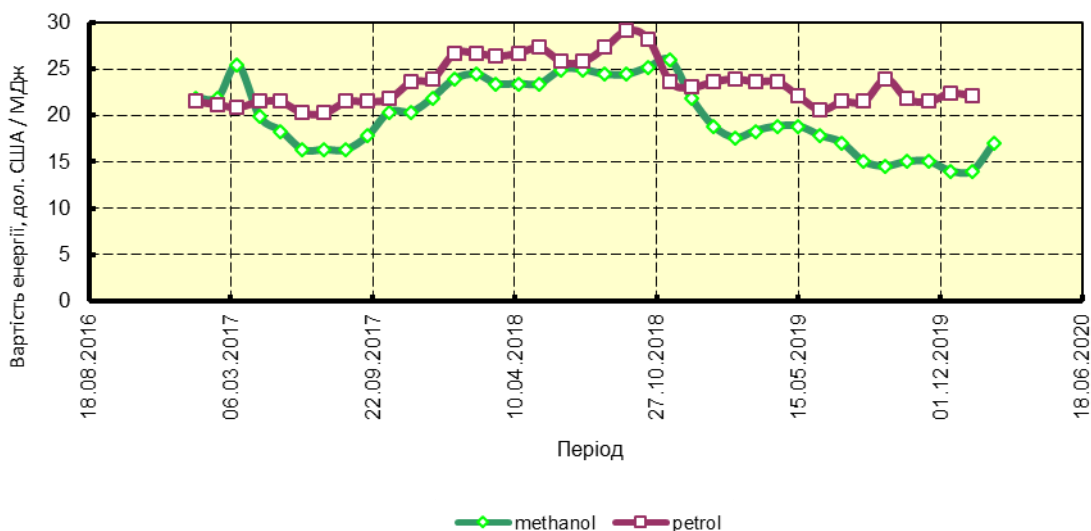


Рисунок 6. Вартість енергії

Для споживачів для прийняття рішення рекомендується показник співвідношення ціни метанолу та нафтового палива. Цей коефіцієнт повинен бути меншим за точку рівноваги. Точка рівноваги враховує основні показники палива та ефективність двигуна. Це можна обчислити за таким виразом:

$$PFR_0 = \frac{Fpr_m}{Fpr_p} = \frac{LHV_m \cdot \eta_m}{LHV_p \cdot \eta_p}, \quad (10)$$

де LHV_m - нижня теплова здатність метанолу в МДж/кг; LHV_p - нижня теплова потужність бензину в МДж/кг; η_m - ефективність двигуна при використанні метанолу; η_p - коефіцієнт корисної дії двигуна при використанні бензину.

Якщо фактичне співвідношення ціни метанолу до бензину менше, ніж розраховане PFR_0 , тоді застосування метанолу є прийнятним. Якщо є інформація про фактичну економію палива, то точка рівноваги визначається за формулою

$$PFR_0 = \frac{Fpr_m}{Fpr_p} = \frac{FE_p}{FE_m}, \quad (11)$$

де FE_m - економія палива транспортного засобу, що працює на метанолі, л/100 км; FE_p - це економія палива автомобіля, що працює на бензині, л/100 км.

Наші розрахунки були зроблені для автомобіля Geely. Економія палива для бензину становить 8 л / 100 км, а для чистого метанольного палива М100 економія палива становить 13,5 л / 100 км. Ціни на метанол та бензин досліджувались з 2017 р. За цей період метанол продемонстрував економічну перевагу над бензином (рис. 7). Фактичне співвідношення цін на метанол / бензин було меншим за точку рівноваги. Тому метанол був конкурентною альтернативою бензину. Співвідношення цін на метанол та бензин було нижчим за фактичне. Це означає, що ефективність метанольного двигуна була вищою, ніж ефективність бензинового двигуна.

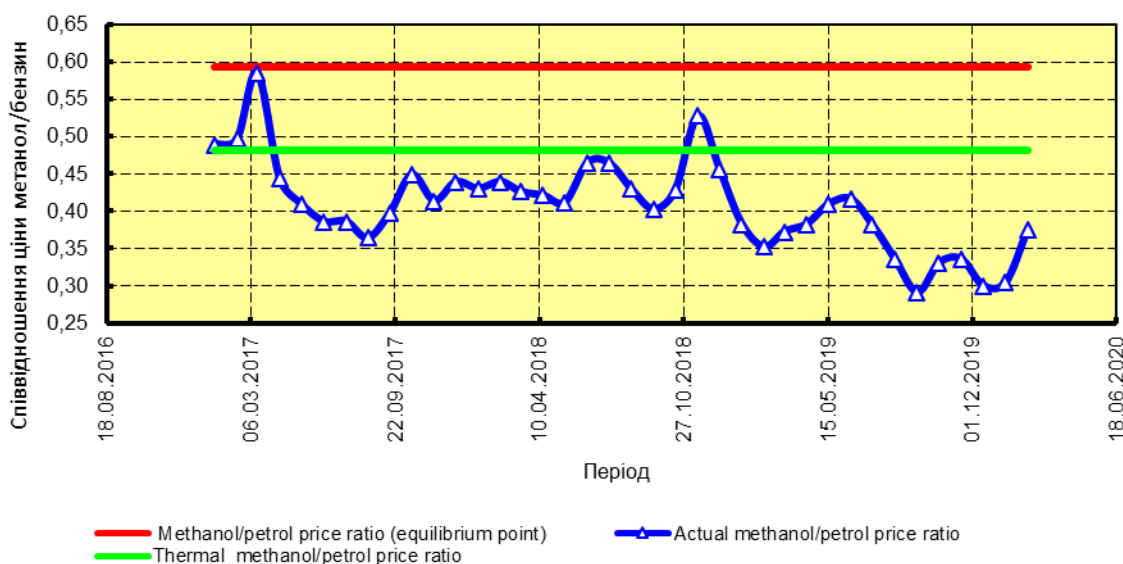


Рисунок 7. Співвідношення ціни метанол/бензин

Паливо М15 широко поширене в Китаї. Двигун, що працює на М15, має вищу ефективність теплового гальмування порівняно з бензиновим. Збільшення концентрації метанолу призводить до збільшення ефективності теплового гальма. Китай мав успіх у комерціалізації палива М15. Існуючий автопарк не потребує модифікації, і ціна М15 також є конкурентоспроможною (рис. 8).

Деякі китайські компанії, такі як Sinotruk Jinan Truck Co., Ltd та Shaanxi Automobile group Co., Ltd., виробляють подвійні самоскиди з метанольним дизелем. Наприклад, Shacman SX3317DR456HM та ZZ3317N4667D1M живляться від подвійного паливного двигуна потужністю 245 кВт [19,20].

Китайські компанії (місто Юлін провінції Шаньсі) мають досвід використання M100 на вантажних автомобілях, оснащених двигунами DMCC. Частка енергії дизельного палива коливається від 0,64 до 0,697.

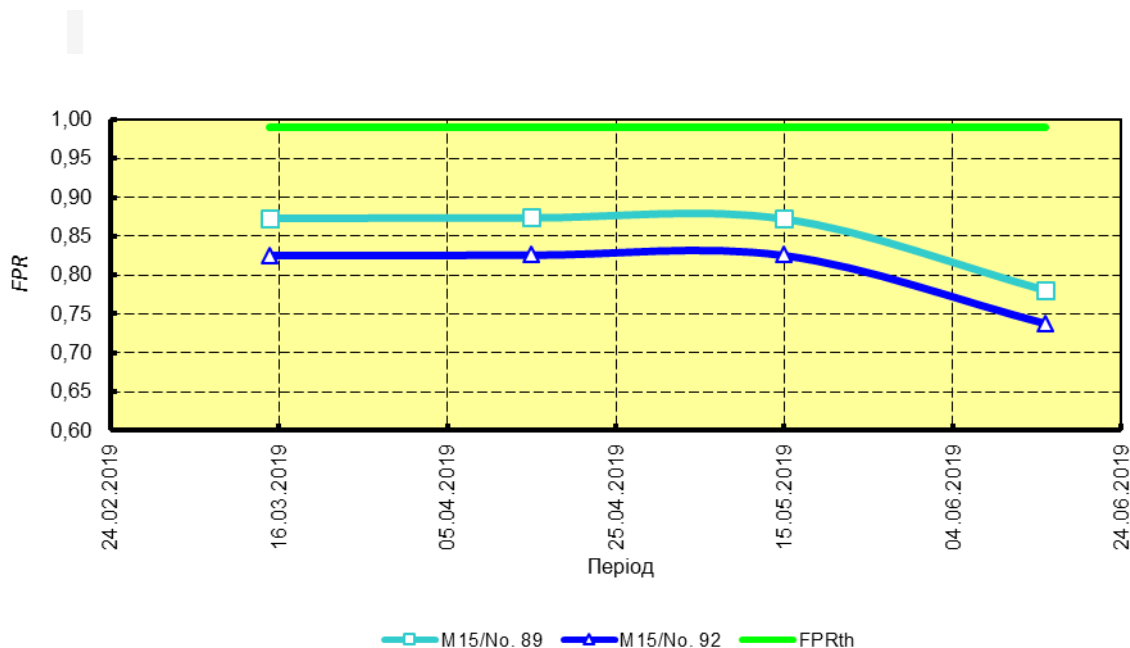


Рисунок 8.Співвідношення цін M15/бензин

Прийнятне співвідношення ціни на метанол та дизельне паливо можна знайти за такою формулою:

$$\frac{FE_d \cdot Fpr_d + FE_m \cdot Fpr_m}{FE_{d0} \cdot Fpr_d} < 1, \quad (12)$$

де FE_d - економія дизельного палива транспортного засобу, оснащеного двигуном DMCC, л/100 км; FE_m - метанолова економія палива транспортного засобу, оснащеного двигуном DMCC, л/100 км; FE_{d0} - це економія палива автомобіля на дизельному паливі, оснащеного звичайним дизельним двигуном, л/100 км.

Отже, точка рівноваги прийнятного співвідношення ціни на метанол та дизельне паливо дорівнює

$$FPR_{d0} = \frac{Fpr_m}{Fpr_d} < \frac{FE_{d0} - FE_d}{FE_m}. \quad (13)$$

Точка рівноваги вища, ніж фактичне відношення ціни метанолу до дизельного палива (рис. 11). Співвідношення цін робить використання M100

вигідним. Згідно з нашими розрахунками, використання метанольного палива призводить до економії пального на 6–7%.

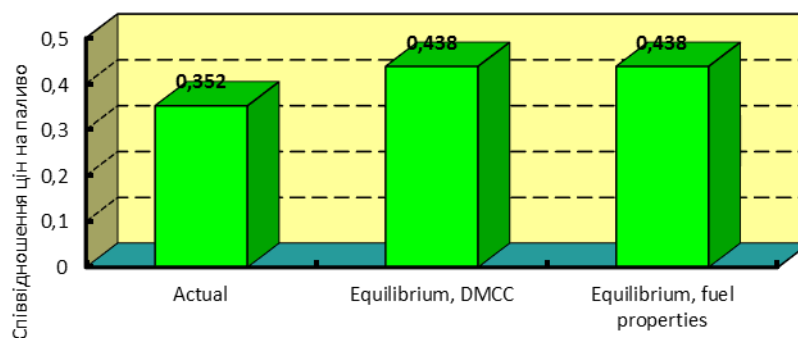


Рисунок 9. Співвідношення ціни на метанол та дизельне паливо: фактичне, максимально прийнятне.

Висновки

З 2000 р. спостерігається збільшення виробництва та застосування метанолу як транспортного палива. Китай, як лідер з виробництва метанолу, продемонстрував поступовий перехід до економіки метанолу. Аналіз показав, що глобальна економіка метанолу має середньорічний темп приросту 5,9%. Тим часом Китай продемонстрував зростання приблизно на 10%. У 2019 році глобальне споживання метанолу як палива перевищило 30 мільйонів тонн і зростає.

Теплова ефективність двигунів, що працюють на метанолі, не менша, ніж ефективність двигунів, що працюють на звичайному паливі. Паливо з метанолом збільшує ефективність двигунів із іскровим запалюванням. Метанольні паливні елементи мають найкращі результати. З жовтня 2018 року метанол є конкурентоспроможним у порівнянні з нафтовим паливом. Економія пального варіювалась від 6–7% (для дизельних двигунів) до 30% (для SIE). Конкретні викиди вуглекислого газу не залежать від виду палива. Вони в основному залежать від ефективності двигуна. Тільки зелений метанол може зменшити викиди вуглекислого газу в атмосферу. Очікується, що двигуни з іскровим запалюванням та паливні елементи матимуть найкращі результати. Для забезпечення сталого розвитку автомобільної промисловості необхідно використовувати відновлюване паливо, включаючи біометанол. Використання ТПВ, енергії вітру та біогазу для очисних споруд є перспективними шляхами виробництва зеленого метанолу. ТПВ як вихідна сировина посідає перше місце.

Сільськогосподарські залишки та деревина як вихідна сировина для виробництва метанолу мають значний потенціал. Вони є предметами для подальшого вивчення. З метою оцінки потенціалу сільськогосподарських залишків для виробництва біометанолу подальші дослідження будуть зосереджені на кількості залишків сільськогосподарських культур, кількості гною, їх географічному розташуванні та кластерному аналізі. Особлива увага буде приділена визначенню синергетичних ефектів виробництва біометанолу.

Список літератури

1. Keil, F.J. Methanol-to-Hydrocarbons: Process Technology. *Microporous Mesoporous Mater.* 1999, 29, 49–66. doi:10.1016/S1387–1811(98)00320–5.
2. Catizzone, E.; Cirelli, Z.; Aloise, A.; Lanzafame, P.; Migliori, M.; Giordano, G. Methanol conversion over ZSM-12, ZSM-22 and EU-1 zeolites: From DME to hydrocarbons production. *Catal. Today* 2018, 304, 39–50. doi:10.1016/j.cattod.2017.08.037.
3. Olah, G.A.; Goepfert, A.; Prakash, G.K.S. *Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy*; Wiley-VCH: Hoboken: NJ, USA, 2006; Available online: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783527627806> (accessed on 11 April 2020).
4. Olah, G.A. Towards Oil Independence Through Renewable Methanol Chemistry. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2013, 52, 104–107. doi:10.1002/anie.201204995.
5. Wang, X.; Ge, Y.; Liu, L.; Peng, Z.; Hao, L.; Yin, H.; Ding, Y.; Wang, J. Evaluation on toxic reduction and fuel economy of a gasoline direct injection- (GDI-) powered passenger car fueled with methanol–gasoline blends with various substitution ratios. *Appl. Energy* 2015, 157, 134–143. doi:10.1016/j.apenergy.2015.08.023.
6. Huang, P.; Ju, H.; Tan, S.; Wang, H.; Zhao, T. The Future of Methanol Fuel An Analysis on the Feasibility of Methanol as an Alternative Fuel. 4 December 2015. Team 1. Available online: <http://franke.uchicago.edu/bigproblems/BPRO29000–2015/Team01-TheFutureofMethanolFuel.pdf> (accessed on 16 January 2020).
7. Duraisamy, G.; Rangasamy, M.; Govindan, N. A comparative study on methanol/diesel and methanol/PODE dual fuel RCCI combustion in an automotive diesel engine. *Renew. Energy* 2020, 145, 542–556. doi:10.1016/j.renene.2019.06.044.
8. Jia, Z.; Denbratt, I. Experimental investigation into the combustion characteristics of a methanol-Diesel heavy duty engine operated in RCCI mode. *Fuel* 2018, 226, 745–753. doi:10.1016/j.fuel.2018.03.088.
9. Prasad, B.S.N.; Pandey, J.K.; Kumar, G.N. Impact of changing compression ratio on engine characteristics of an SI engine fueled with equi-volume blend of methanol and gasoline. *Energy* 2020, 191, 116605. doi:10.1016/j.energy.2019.116605.
10. Liu, Z. Economic analysis of methanol production from coal/biomass upgrading. *Energy Sources Part. B: Econ. Plan. Policy* 2018, 13, 66–71. doi:10.1080/15567249.2017.1403501.
11. Roode-Gutzmer, Q.I.; Kaiser, D.; Bertau, M. Renewable Methanol Synthesis. *ChemBioEng. Rev.* 2019, 6, 209–236. doi:10.1002/cben.201900012.

12. Borgwardt, R.H. Transportation fuel from cellulosic biomass: A comparative assessment of ethanol and methanol options. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part. A: J. Power Energy* 1999, 213, 399–407. doi:10.1243/0957650991537770.
13. Ishaq, H.; Dincer, I. Evaluation of a wind energy based system for co-generation of hydrogen and methanol production. *Int. J. Hydrogen Energy* 2020. doi:10.1016/j.ijhydene.2020.01.037.
14. Dolan, G. Fuel Application for Methanol. HIS World Methanol Conference, Berlin, 5 October 2019. Available online: <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2019/10/Fuel-Applications-for-Methanol-IHS-2019.pdf> (accessed on 12 February 2020).
15. Zhao, K. Methanol Fuel Blending in China. Trinidad and Tobago Methanol Forum, 24 January 2019. Available online: <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2019/02/6.-Kai-Zhao-Methanol-Fuel-Blending-in-China.pdf> (accessed 14 March 2020).
16. Gumpert Presents Serial-Ready Methanol Fuel Cell. Available online: <https://www.electrive.com/2019/11/08/gumpert-presents-serial-ready-methanol-fuel-cell/> (accessed on 29 March 2020).
17. Methanex Posts Regional Contract Methanol Prices for North America, Europe and Asia. Available online: <https://www.methanex.com/our-business/pricing> (accessed on 10 February 2020).
18. Balussou, D. An Analysis of Current and Future Electricity Production from Biogas in Germany; Karlsruhe Institute of Technology: Karlsruhe, Germany, 2018. Available online: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000084909> (accessed on 12 February 2020).
19. Shacman SX3317DR456HM Methanol/Diesel Dual Fuel Dump Truck Manufactured by Shaanxi Automobile Group Co.; Ltd. Available online: <http://shaanxi.su/en/auto/sx/shacman-sx3317dr456hm.html> (accessed on 20 March 2020).
20. Sinotruk Howo ZZ3257N3847D1M Methanol/Diesel Dual Fuel Dump Truck Manufactured by Sinotruk Jinan Truck Co.; Ltd. Available online: <http://howo.biz/howo/zz/sinotruk-howo-zz3257n3847d1m.html> (accessed on 20 March 2020).