

ПЕРЕДМОВА

Рівень забезпеченості України власними енергоресурсами не задовольняє потреби економіки і становить близько 37 % від загальних потреб. Особливо низькою є забезпеченість України власними ресурсами нафти. Видобуваючи щорічно менше 5 млн т нафти з власних родовищ, Україна вимушена імпортувати близько 90 % від загальної потреби моторних палив нафтового походження, вартість яких за світовими цінами становить понад 10 млрд дол. США [4, 12].

Головним споживачем моторних палив нафтового походження є транспортні засоби.

У транспортних двигунах внутрішнього згоряння разом з продуктами згоряння моторних палив нафтового походження у навколишнє середовище викидається велика кількість токсичних речовин: оксид вуглецю, оксиди азоту і сірки, канцерогенні вуглеводні (бензапірен), мутагенні свинцеві сполуки, що можуть акумулюватися в організмі і викликати зміни генної структури. Дослідження показують, що частка шкідливих викидів із продуктами згоряння автомобільних двигунів у великих містах досягає 80 % від сумарного обсягу забруднювачів, що потрапляють в атмосферу. За даними [18] у 1999 р. сумарна маса токсичних, мутагенних та канцерогенних речовин, яка надійшла в атмосферу України з відпрацьованими газами автотранспортних двигунів, становила 4560 тис. т, а на кожного жителя країни припало не менше 130 кг токсичних викидів. У наступні п'ять років ситуація значно погіршилася.

Тому в більшості промислово розвинутих країн останні два десятиріччя проводиться цілеспрямована робота з заміщення нафтових моторних палив на автотранспорті більш екологічно чистими альтернативними видами палива, серед яких пріоритетне місце посідає природний газ.

У 2005 р. у світі експлуатувалося понад 1,3 млн автомобілів, що працювали на стисненому природному газі. На перших позиціях у списку країн, де використовують газобалонні автомобілі, що пра-

цюють на природному газі, перебувають такі країни, як: Аргентина (450 тис.), Італія (270 тис.), Російська Федерація (160 тис.), США (50 тис.), Нова Зеландія (45 тис.) і Україна (30 тис.) [10, 18].

Для України розв'язання проблеми використання природного газу як моторного палива має особливе значення, оскільки це дасть змогу істотно зменшити її залежність від імпорту нафти і нафтопродуктів та кардинально поліпшити екологічну ситуацію, ускладнену наслідками Чорнобильської катастрофи [4, 5, 12, 18].

Для цього в Україні є всі необхідні передумови, а саме:

- власні ресурси природного газу набагато перевищують запаси нафти;

- понад 10 тис. кілометрів магістральних газопроводів великого діаметра для здійснення стабільного транспортування природного газу з Росії та Туркменистану і понад 30 тис. кілометрів розподільних газопроводів, що охоплюють усі регіони України;

- мережа автомобільних газонаповнювальних компресорних станцій (АГНКС) (93 станції, кожна продуктивністю на 500 або 250 заправок автомобілів на добу), що забезпечує проїзд автотранспортних засобів на стисненому природному газі в будь-яку точку країни;

- потокове виробництво сталевих балонів високого тиску і серійне виробництво АГНКС;

- науково-технічні розробки світового рівня з проблем використання газу на транспорті інститутів Національної Академії наук України: Інституту газу (розробка паливних систем живлення двигунів), Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона (технології виробництва полегшених зварних балонів високого тиску), Науково-дослідного трубного інституту (м. Дніпропетровськ), проектних інститутів ВНДПТРАНСГАЗ (м. Київ) та ін.

Спеціалістами цих організацій розроблено проект державної програми використання природного газу як моторного палива на автотранспорті України, який передбачає заміщення близько 7,5 млн т нафтових моторних палив щорічно і додаткове будівництво 270 АГНКС гаражного типу на 50 заправок на добу.

Реалізація завдань цієї програми потребує підготовки великої кількості висококваліфікованих спеціалістів, спроможних грамотно вирішувати всі технічні завдання, пов'язані із застосуванням газового палива на транспорті.

Даний підручник призначений для студентів відповідних спеціальностей вищих навчальних закладів. У ньому вперше узагальнено основні відомості з технологічних схем і устаткування АГНКС, що експлуатуються нині в Україні. Також наведено принципові схеми і технологічні процеси перспективних АГНКС.

Виклад матеріалу у виданні здійснено з таких позицій, що читачу вже відомі основні положення технічної термодинаміки і основи теорії компресорних машин. У зв'язку з тим, що традиційний курс технічної термодинаміки в більшості вищих навчальних закладів розглядає лише закони ідеальних газів, у даному підручнику включено спеціальний розділ, присвячений термодинамічним процесам природного газу, властивості якого істотно відрізняються від властивостей ідеального газу.

Автори щиро вдячні В. Т. Поповичу і А. В. Зері за надані матеріали з технологічних схем і конструкційних рішень АГНКС. Автори будуть вдячні читачам за відгуки і критичні зауваження.

Розділи 1, 2, 3, параграфи 4.6 та 5.13 написані доктором технічних наук, професором Г. О. Биковим, розділи 4, 5 — доктором технічних наук, професором М. С. Куликом та кандидатом технічних наук К. І. Капітанчуком, розділ 6 — доктором технічних наук, професором М. С. Куликом та кандидатом технічних наук І. О. Орловим.

ОСНОВНІ УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

- D — діаметр; приведена густина; абсолютний паровміст газової суміші;
- E — кількість енергії;
- G — масова продуктивність;
- g_e — питома масова витрата палива двигуном;
- H — напір компресора або його ступеня;
- L, L_0, L_ϕ — робота; теоретично необхідна та дійсна кількість повітря для повного згоряння 1 кг або 1 м³ палива, відповідно;
- M — маса; масова продуктивність; число Маха;
- N — число ступенів; число незалежних змінних, що впливають на властивості термодинамічної системи, відповідно;
- N_e — потужність;
- Q — теплота згоряння палива, продуктивність, об'єм;
- R, r — газова стала; об'ємна частка компонента в природному газі;
- Re — число Рейнольдса;
- T, t — температура потоку газу, речовини в К або °С;
- V — об'ємна продуктивність; об'ємна витрата палива;
- W — витрати енергії;
- Θ — питомі викиди в навколишнє середовище;
- a — відносна величина мертвого простору циліндра;
- c — теплоємність; швидкість;
- d — мольна густина; абсолютний вологовміст пари в суміші;
- e — питома енергоємність; питомі витрати енергії;
- f — кількість фаз термодинамічної системи;
- i — ентальпія;
- k — коефіцієнт Пуассона (показник адіабати);
- l — довжина ділянки магістрального газопроводу;
- n — показник політропи; частота обертання;
- P, ρ, v — тиск, густина, питомий об'єм потоку або речовини, відповідно;
- q — кількість теплоти;

s — ентропія, хід поршня;
 Z — коефіцієнт стиснення;
 α — коефіцієнт надлишку повітря паливоповітряної суміші; диференційний дросельний ефект;
 ε — ступінь стиснення; коефіцієнт розходу;
 χ — ступінь сухості; коефіцієнт ізобаричної стисливості;
 φ — відносний ступінь насичення газової суміші парою; абсолютна вологість;
 ζ — коефіцієнт опору;
 η, η_v — коефіцієнт корисної дії; коефіцієнт наповнення циліндрів;
 θ — оптимальний кут випередження запалювання;
 ϑ — приведена критична температура;
 λ — коефіцієнт гідравлічного тертя, подачі, об'ємний, ефективний;
 μ — молярна маса газу або його компонента; інтегральний дросельний ефект;
 π — ступінь підвищення тиску; приведений критичний тиск;
 φ — кут повороту; ступінь насичення парою; коефіцієнт витрати.
 $\Delta_{\text{п}}$ — відносна густина природного газу щодо повітря.

Умовні скорочення

А — адсорбер;
АВТ — акумулятор високого тиску;
АГНКС — автомобільна газонаповнювальна компресорна станція;
АГНС — автомобільна газонаповнювальна станція;
АЗС — автомобільна заправна станція;
АГ — акумулятор газу;
АПО — апарат повітряного охолодження газу;
АСТ — акумулятор середнього тиску;
БА — блок акумуляторний;
БВК — блок вхідних кранів;
БЕ — електронний блок газової автоматики;
БК — блок клавіатури та індикації;
БОР — блок осушення і регенерації адсорбенту;
БП — бак продування;
БХК — балони системи блоку керування;
В, ВЗ, ВП, ВПР, ВР — вентиль запірний, перекидний, продувний, регулюючий, відповідно;
ВЛМ — вологомір;
ВМ — витратомір;
ВМВ — вологомасловідокремлювач;
ВПДК — вільнопоршневий дизель-компресор;

ВТГНКС — воднотранспортна газонаповнювальна компресорна станція;

ГЗ — головка заправна;

ГКС — головна компресорна станція;

ГП — глушник пульсацій;

ГРП — газорегуляторний пункт;

ГРС — газорозподільна станція;

ГРУ — газорегуляторна установка;

Д — детандер;

ДВЗ — двигун внутрішнього згорання;

ДІ — діафрагма;

ДЗ, ДП, ДТ — датчик загазованості, пожежі, тиску, відповідно;

ДР — дросель;

ЕД — електродвигун;

ЕЖ — газовий ежектор;

ЕН, ЕП — електронагрівач, електродігрівач, відповідно;

ЗГНКС — залізнична газонаповнювальна компресорна станція;

КВПА — контрольно-вимірювальні прилади і апаратура;

КВ, КДП, КЕМ, КЗ, КН, КП, КР — клапан всмоктувальний, дво-позиційний, електромагнітний, зворотний, нагнітальний, перекиривний, редуційний, відповідно;

КГЗ — колонка газозаправна;

КД — компресор дотискуючий;

КК — кран кульовий;

ККД — коефіцієнт корисної дії;

КПГ — компримований (стиснений) природний газ;

КТП — компресорна трансформаторна підстанція;

КУ — компресорна установка;

ЛГ, ЛМ — лічильник газу, мотогодин, відповідно;

М, МЕК — манометр, електроконтактний манометр;

НШ — насос шестеренчастий;

ОЧ — октанове число;

ПАГЗ — пересувний автомобільний газовий заправник;

ПАР — поверхнево-активні речовини;

ПГРС — промислова газорозподільна станція;

ПКС — проміжна компресорна станція;

ПСГ — підземне сховище газу;

ПР — пристрій розривний;

ПРТ — перетворювач різниці тисків;

Р — редуктор, редуктор-відсікач;

РВ, РТ — регулятор витрати, тиску, відповідно;

РлТ — реле тиску;

С — сепаратор;
СНГ — скраплені нафтові гази (пропан, бутан та їх суміші);
СПГ — скраплений природний газ;
Т — термодетандувач опору;
ТС — термодинамічна система;
ТО — теплообмінник; технічне обслуговування;
Ф, ФВ, ФС — фільтр, фільтр вугільний, фільтр-сепаратор, відпо-
відно;
НЛ — лампа контролю;
S — кнопка вмикання і вимикання;
SA, QF — перемикач вибору режиму, тумблер.

Індекси

авт — автомобіль;
ад — адіабатичний;
ак — акумулятор;
від — відведення з двигуна, процесу, тощо;
вн — внутрішній;
вс — всмоктування;
вх — параметри на вході;
г — газ;
гр — гранична величина;
дет — детонація;
зап — заправка;
із — ізотермічний;
інв — інверсійний;
к — параметр на виході з компресора;
кр — критичний параметр;
масл — масло;
мех — механічний;
наг — нагнітання;
п — паливо;
пар — випаровування;
пк — псевдокритичний параметр;
пол — політропічний;
р, теор — ізобарний; розрахункові, робочі та теоретичні параметри;
с — стиснення; суха насичена пара;
ср — середній;
ст — ступінь;
d — рідина;
v — ізохорний; наповнення циліндрів.

1.1. Нафтові моторні палива

Перші поршневі двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ) були створені наприкінці XIX ст. Вони працювали на газоподібному паливі, яке отримувалося шляхом нагрівання в результаті термічного розкладання кам'яного вугілля без доступу повітря. Здобутий таким способом штучний пальний газ складався за об'ємом: з водню H_2 (59 %), метану CH_4 (24 %), оксиду вуглецю CO (8 %) і негорючого баласту — азоту N_2 та двоокису вуглецю CO_2 . Такий газ використовувався, переважно, для освітлення вулиць великих міст і тому називався «світільним газом».

Створені у 1877 р. Е. Лангеном і Н. Отто перші зразки газових ДВЗ мали досить високий (близько 15 %) коефіцієнт корисної дії (ККД) та велику питому потужність, що вигідно відрізняло ці двигуни від парових машин, які масово застосовувались у той час. Такі показники перших ДВЗ робили їх дуже привабливими для використання як силових установок транспортних засобів.

Невід'ємність газових двигунів від надзвичайно громіздких агрегатів сухої перегонки кам'яного вугілля спрямувала зусилля конструкторів у напрямі створення ДВЗ з використанням нафтових моторних палив. Ці двигуни зразу стали відрізнятися високою енергоємністю одиниці об'єму зберігання палива на транспортних засобах.

Уже у 1883 р. Даймлер побудував перший бензиновий двигун з іскровим запалюванням для автомобіля, а у 1892 р. Р. Дізель уперше продемонстрував двигун із запаленням від стиснення. Двигун працював на гасі і мав ККД 36 %.

У XX ст. ДВЗ, що працювали на нафтових моторних паливах, стали домінуючим видом силових установок на транспорті. Потреби транспорту в моторних паливах в ці часи значно зросли, що привело до бурхливого розвитку нафтовидобування та нафтопереробної промисловості.

Сьогодні у світі добувається і переробляється щорічно близько 3 млрд т нафти, 55 % з яких використовується на транспорті (у тому числі 42 % — на автомобільному), близько 30 % спалюється в промисловості як котельне паливо, 15 % — сировина для нафтохімічних галузей господарства [11, 20, 30].

Стрімке зростання автомобільного парку у світі супроводжується виснаженістю традиційних нафтових родовищ, що спричиняє дестабілізацію обсягу видобутку нафти і подорожчання нафтових моторних палив. За останні три десятиріччя питома витрата нафтових палив на автотранспорті істотно скоротилася внаслідок реконструкції транспортних засобів і створення високоефективних конструкцій ДВЗ з високим ступенем стиснення.

Тим не менш, проблема економії моторних палив залишається найактуальнішою, тому що підвищення ступеня стиснення ДВЗ не тільки зменшує питомі витрати палива, а й потребує використання бензину з більш високим октановим числом, виробництво якого пов'язано зі збільшенням енерговитрат. Так, під час первинної перегонки сирової нафти на одержання 1 т низькооктанового прямогонного бензину з октановим числом (ОЧ) 52...56 одиниць витрачається енергія, що еквівалентна 50 кг нафти. Залежно від технологічного процесу вторинної нафтопереробки для виробництва 1 т нестилизованого бензину з октановим числом 76 одиниць є необхідною енергія, що еквівалентна 180...230 кг нафти. Тому на збільшення октанового числа бензину до 85 одиниць (бензин АІ-93) енерговитрати в нафтовому еквіваленті зростають до 290...390 кг.

Порівняльний аналіз показує, що таке збільшення витрат сирової нафти для підвищення детонаційної стійкості бензину перевищує економію первинного енергоносія від зменшення питомої витрати високооктанового бензину в автомобільних ДВЗ із підвищеним ступенем стиснення. Результати такого аналізу подано на рис. 1.1. Дані наочно свідчать, що застосування, наприклад, бензину АІ-93 замість А-76 веде до зменшення питомої витрати палива на 2 % за рахунок підвищення ступеня стиснення двигуна при одночасному збільшенні (на 11...16 %) витрати енергії на виробництво бензину.

Отримані з нафти рідкі моторні палива являють собою складні суміші різноманітних вуглеводнів із загальною хімічною формулою C_mH_n . При цьому в бензинах вміст вуглеводнів має число вуглецевих атомів у молекулі $m = 8...12$, а в дизельних паливах — $m = 12...25$ [28, 29, 32].

Властивості моторних палив залежать від їх хімічного складу, тобто від виду і кількості вуглеводнів, а також від домішок і спеціальних добавок. У складі нафтових палив як домішки знаходяться сполуки, що містять кисень, сірку і азот. До складу бензину можуть бути введені добавки, що покращують антидетонаційні властивості і стабільність палива під час зберігання: етилові рідини, які містять свинець і бром, спирти, ефіри, ароматичні вуглеводні (бензол і його похідні), смола з дерев або інші антиокислювачі.

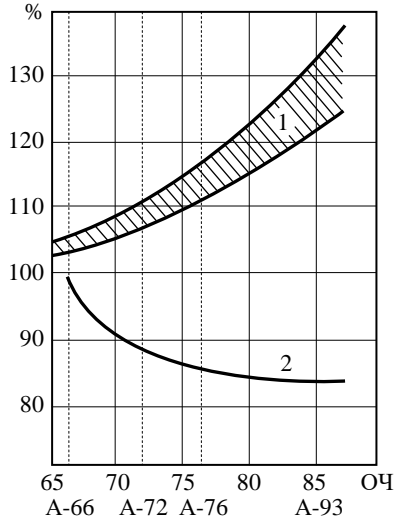


Рис. 1.1. Залежність витрат нафтової сировини на виробництво бензинів (1) та питомої витрати палива двигуном (2) від октанового числа бензину

До основних переваг нафтових моторних палив належать висока теплота згоряння, висока густина пари (приблизно у 4 рази більша за густину повітря). Це дає можливість одержувати досить велику літрову потужність двигуна і енергоємність одиниці зберігання на борту автомобіля, що забезпечує великий пробіг на одній заправці паливом за порівняно невеликої місткості паливних баків.

Недоліки нафтових палив є наслідком їх переваг. Запаленню нафтових рідких палив у циліндрах ДВЗ передують процеси випаровування та перемішування пари палива з повітрям.

За невеликої швидкості дифузії, зумовленої великою різницею густини пари палива і повітря, у сучасних високооберткових двигунах важко одержати гомогенну паливоповітряну суміш у циліндрах для забезпечення повного згоряння палива.

Як показує досвід, максимум потужності в сучасних бензинових двигунах настає під час подачі в циліндр повітря в трохи меншій кількості, ніж це необхідно для повного згоряння палива. При цьому коефіцієнт надлишку повітря (відношення кількості повітря, що надійшло в циліндр, до теоретичної кількості повітря, необхідної для повного згоряння палива) перебуває в межах 0,87...0,90. Наявність у бензині високооктанових антидетонаційних добавок також не сприяє повному згорянню палива.

Усі ці чинники призводять до значної хімічної неповноти згоряння нафтових моторних палив у ДВЗ і появи у вихідних газах великої кількості токсичних продуктів. Склад вихлопних газів суттєво залежить від режиму роботи двигуна, початкових параметрів циклу ДВЗ, конструкції паливних систем, якості перемішування пари палива з повітрям, коефіцієнта надлишку повітря та інших чинників.

Осереднений склад вихлопних газів карбюраторних і дизельних двигунів у розрахунку на 1 кг палива, що спалюється, наведено у табл. 1.1.

Таблиця 1.1

**СКЛАД ВИХЛОПНИХ ГАЗІВ
КАРБЮРАТОРНИХ І ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ**

Компоненти	Бензиновий двигун		Дизельний двигун	
	% від об'єму (г/кг палива)	г/кг палива	% від об'єму (г/кг палива)	г/кг палива
Азот, N ₂	73...74	11,5 · 10 ³	74...76	14,83 · 10 ³
Водяний пар, H ₂ O	13...13,5	1,34 · 10 ³	10...12	1,4 · 10 ³
Двоокис вуглецю, CO ₂	12...13	3,06 · 10 ³	9...11	3,1 · 10 ³
Кисень, O ₂	0,2...0,5	36...90	2...5	450...1130
Вуглеводні, C _m H _n	0,04...0,06	7...10	0...0,05	0...11
Оксид вуглецю, CO	0,1...2,0	16...300	0,01...0,03	2...6
Оксиди азоту, NO _x	0...0,3	0...7	0,005...0,2	1,6...65
Альдегіди	0,06...0,2	20...30	0...0,05	0...11
Оксиди сірки, SO _x , мг/м ³	0...0,003	0...38 · 10 ⁻⁶	0,01...0,015	(0,16...0,24) × × 10 ⁻³
Сажа, мг/м ³	0...100	< 1,25	1000...2000	16...32
Бензапірен, мг/м ³	(0,8...1,6) × × 10 ⁻⁶	(10...20) × × 10 ⁻⁶	0,8 · 10 ⁻⁶	16 · 10 ⁻⁶
Свинцеві сполуки, мг/м ³	0...6	0...0,06	—	—

До високотоксичних компонентів вихлопних газів відносять оксид вуглецю CO, оксиди азоту NO_x та сірки SO_x. Токсичність оксиду вуглецю зумовлена тим, що він поглинається гемоглобіном крові в 300 разів активніше, ніж кисень. За наявності в повітрі CO у кількості 1 % від об'єму приміщення людина непритомніє після першого вдиху; а через 2...3 хв настає смертельне отруєння. Оксиди азоту і сірки,

з'єднуючись з атмосферною вологою, утворюють відповідні кислоти, що руйнують будь-які живі тканини і багато конструкційних матеріалів [3, 14, 21, 29].

Вуглеводні та альдегіди досить тривалий час не руйнуються і утримуються в атмосфері, а під дією сонячної радіації утворюють фотохімічний смог. Бензапірен, що є також вуглеводнем (хімічна формула $C_{20}H_{12}$), вважається одним з найбільш небезпечних канцерогенів.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що потрапляння бензапірену до живого організму в кількості $2 \cdot 10^{-6}$ г гарантовано призводить до утворення ракової пухлини. Всі сполуки свинцю здатні акумулюватися як у зовнішньому середовищі, так і в живому організмі, викликаючи мутації генної структури, що передається в спадщину.

У дизельних двигунах унаслідок більш високих коефіцієнтів надлишку повітря значна частина СО продовжує окислюватись до двоокису вуглецю CO_2 , тому вміст СО у вихлопних газах дизелів у 10...30 разів менший, ніж у бензинових двигунів. У той же час, дизелі викидають в атмосферу в 40...80 разів більше твердих частинок сажі, на поверхні яких адсорбується велика кількість мутагенних і канцерогенних речовин.

Розрахунки показують, що за останні п'ять років на території України сумарні викиди в атмосферу токсичних речовин з вихлопними газами транспортних ДВЗ становлять близько 4,56 млн т на рік, тобто понад 130 кг на кожного жителя України.

Кардинальним шляхом зниження токсичних викидів в атмосферу спеціалісти багатьох країн вважають заміну нафтових моторних палив більш екологічно чистими альтернативними паливами. Прогнозується зниження частки нафтових палив у структурі енергоспоживання на автомобільному транспорті за період з 2000 до 2010 р. в країнах Західної Європи на 20...25 %, у США — на 30 %, у Японії — на 35 % шляхом збільшення використання альтернативних моторних палив [4, 12].

1.2. Альтернативні моторні палива

До найбільш перспективних альтернативних видів палива для застосування на автомобільному транспорті належать:

- скраплені нафтові гази (СНГ) — пропан, бутан та їх суміші;
- спирти — етанол і метанол;
- компримований (стиснений) природний газ (КПГ);
- скраплений природний газ (СПГ).

Є спроби використовувати як альтернативне моторне паливо синтетичний бензин, який можна виробляти з кам'яного вугілля або пальних сланців, водень, рослинну олію (наприклад рапсову), а також низькооктанові газоконденсатні бензини з рідкими або газоподібними антидетонаційними добавками (так звані бінарні паливні суміші).

Розглянемо стислу характеристику альтернативних моторних палив, перспективи застосування яких найчастіше обговорюються спеціалістами. Основні показники різноманітних моторних палив наведено в табл. 1.2.

Спирти — метанол (CH_3OH) і етанол ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). До переваг цих палив можна віднести високе октанове число та більш широкі порівняно з бензином границі збіднення спиртово-повітряних сумішей, що дає можливість поліпшити економічність двигуна.

Недоліками спиртів як моторного палива є низька теплота згоряння (у два рази нижча за бензин), що потребує відповідного збільшення витрати палива для збереження потужності двигуна, висока теплота пароутворення, що потребує великої кількості енергії для випаровування рідкої фази, а також наявність у їх хімічному складі кисню, що призводить до появи токсичного формальдегіду у вихлопних газах двигуна. Відзначимо, що вміст формальдегіду в продуктах згоряння ДВЗ, що працює на метанолі, у 50 разів вищий за бензиновий двигун [15].

Метанол, крім того, корозійно агресивний стосовно традиційних конструкційних матеріалів, що застосовуються у бензинових ДВЗ. Метанол є токсичною рідиною, яка за зовнішнім виглядом, густиною та запахом не відрізняється від етилового спирту. Внутрішнє споживання 30 г метанолу викликає у людини сліпоту або смерть. Сировиною для виробництва метанолу є звичайний природний газ. Проте в умовах сучасних технологій для виробництва 1 т метанолу-сирцю 87 %-ї концентрації необхідно від 995 до 1150 м³ природного газу та 1160...1210 кВт · год електроенергії. Сировиною для виробництва етанолу можуть бути такі харчові продукти, як цукрова тростина (Бразилія), картопля (Польща), кукурудза (США) та ін.

Слід мати на увазі, що прийнята в Бразилії у 60—80-ті рр. ХХ ст. широка програма переведення автомобільного транспорту на етанол мала на меті передусім розв'язання соціальної проблеми ліквідації безробіття в країні. Після часткового розв'язання цієї проблеми програму було згорнуто. У Польщі широко використовується етанол як високооктанова добавки до автомобільних бензинів, тому збільшення виробництва етанолу базується на надвиробництві в країні картоплі. У США, Німеччині та деяких інших країнах метанол добавляється в кількості 5...10 % для підвищення детонаційної стійкості автомобільних бензинів.

Таблиця 1.2

ОСНОВНІ ПОКАЗНИКИ СУЧАСНИХ МОТОРНИХ ПАЛИВ

№ з/п	Найменування показників, розмірність	Бензин	Дизельне паливе	Скраплені нафтові гази (СНГ)	Природний газ	Етанол	Метанол	Водень
1	Фазовий стан під час збереження	рідина	рідина	рідина	газ	рідина	рідина	газ
2	Токсичність	так	так	так	ні	ні	так	ні
3	Густина в нормальних умовах, кг/л; кг/м ³	0,72...0,74	0,82...0,84	0,52...0,55	0,72...0,78	0,79	0,795	0,09
4	Відносна густина пари за повітрям	4,0...5,0	4,5...5,5	1,5...2,0	0,56...0,62	1,59	1,11	0,07
5	Теплота згоряння нижча, МДж/кг	44,0	43,5	46,3	50,0	27,2	21,5	120,0
6	Стехіометричне відношення, кг повітря/кг палива	15,05	14,3	15,7	16,8	9,0	6,5	34,4
7	Кількість повітря в стехіометричній суміші, м ³ повітря/м ³ пари	58,0	64,0	24...31	9,52	14,2	7,15	2,4
8	Теплота згоряння стехіометричної суміші, МДж/м ³	3,71	3,69	3,5...3,8	3,49	1,77	2,62	3,19
9	Октанове число (за моторним методом)	76...94	35...40	90...94	120...125	92	88...94	40
10	Границі запалення в суміші з повітрям, % об.	0,6...6,0	—	1,9...9,5	15,0	4,0..13,7	5,5..21,0	4,0...74,2
11	Коефіцієнт надлишку повітря в межах запалення	0,3...1,75	—	0,35...1,78	0,6...2,0	0,7...2,0	0,7...2,0	0,15...10
12	Температура запалення, К	600...730	590...630	640...730	820...970	840...910	800...850	820...870

Бензометанолові суміші під час збереження легко розшаровуються, тому до них добавляють спеціальні стабілізатори.

В Україні також розпочато виробництво бензину з добавками етанолу та метанолу, що утворюється як побічний продукт у процесі виробництва аміаку.

Синтетичний бензин з кам'яного вугілля. За своїми моторними властивостями він мало відрізняється від нафтових бензинів. Проте собівартість виробництва синтетичного бензину на світовому ринку за наявних технологій вища за ціни нафтових бензинів.

Синтетичний бензин вироблявся в Німеччині в період Другої світової війни, а також у Південно-Африканській Республіці в часи апартеїду, коли світовим співтовариством було накладено ембарго на постачання нафти до цієї країни.

Водень. Вважається перспективним видом екологічно чистого палива, продуктами згоряння якого є азот, водяна пара та деяка кількість оксидів азоту. Відомо, що у США в 1972 р. на полігоні фірми «Дженерал Моторс» були проведені змагання міських екологічно чистих автомобілів. У змаганнях брало участь 63 автомобілі з різноманітними двигунами, що працювали на акумуляторних батареях, пропані, природному газі, аміаку, і два автомобілі, що працювали на водні. Перше місце посів конвертований на водень автомобіль «Фольксваген», відпрацьовані гази якого були чистіше за міське повітря, що засмоктувалося у двигун. Водень дуже поширений у природі, він становить близько 1 % маси Землі, проте практично весь водень у природі знаходиться в хімічно зв'язаному вигляді.

Щорічно у світі виробляється понад 30 млн т водню для використання в промислових цілях. Понад 95 % водню одержують з природного газу шляхом парової конверсії, у невеликих кількостях — з нафти, вугілля та електролізом води. Виробництво водню дуже енергоємне: для його одержання необхідно витратити енергії в 2 рази більшу за енергію, що виділяється в процесі його повного спалювання.

З моторних властивостей водню слід відзначити дуже високу теплоту згоряння (у 2,7 рази більшу, ніж у бензину) і виключно широкі межі запалення. В той же час стехіометрична суміш водню з повітрям (коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 1$) має дуже невисоку детонаційну стійкість, що характеризується малим октановим числом у 40 одиниць [27, 31].

Висока детонаційна стійкість (октанове число 100...110 одиниць) може бути отримана тільки у разі дво-, триразового збільшення кількості повітря в суміші порівняно з теоретично необхідною величиною, тобто якщо коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 2...3$. У зв'язку з тим, що водень є найлегшим газом, його збереження на борту тран-

спортного засобу є доцільним або в рідкому вигляді в криогенних ємкостях, або у вигляді твердих гідридів з металами.

Природний газ. Основним компонентом природного газу є метан CH_4 . Сумарні запаси природного газу в надрах Землі перевищують нафтові. Собівартість видобутку газу набагато менша, ніж нафти. Теплота згоряння природного газу вища, ніж у бензину, а його октанове число становить близько 120 одиниць (за моторним методом), тому природний газ дає змогу істотно підвищити ступінь стиснення у двигуні і знизити питому витрату палива [9, 13, 19].

Природний газ є єдиним сьогодні моторним паливом, яке після його видобутку з надр не потребує ніякої хімічної переробки і не потребує зміни конструкції двигуна за винятком паливної системи живлення. Природний газ не отруйний і практично не містить токсичних домішок, він добре перемішується з повітрям, тому продукти його згоряння містять набагато менше шкідливих забруднювачів, ніж вихлопні гази бензинових і дизельних ДВЗ. Додавка природного газу до дизельного палива в кількості 50...70 % за масою практично усуває димність вихлопних газів. Але прекрасні моторні якості природного газу не можуть бути цілком реалізовані в сучасних конструкціях двигунів з іскровим запалюванням, які розраховані на використання бензину, з причин, що будуть викладені в наступному розділі.

Теорія і практика свідчать, що спеціально сконструйовані газові двигуни за питомими показниками потужності перевершують бензинові, а за значеннями ККД наближені до дизельних ДВЗ. Багато спеціалістів обґрунтовано вважають, що ХХІ ст. буде віком метанових двигунів. Недоліком компримованого природного газу є складність його збереження на борту автомобіля в громіздких балонах високого тиску. Проте цей недолік істотно зменшується у разі збереження природного газу на автомобілі в скрапленому вигляді [3]. Якщо в стандартному автомобільному балоні місткістю 50 л утримується близько 7,5 кг природного газу в умовах температури навколишнього середовища і тиску 20,0 МПа, то в спеціальному криогенному балоні такої самої місткості в умовах температури 110...125 К і тиску 0,1...0,3 МПа розміщується близько 20 кг природного газу в рідкій фазі.

Найбільшу економічну ефективність під час застосування в сучасних конструкціях бензинових ДВЗ з іскровим запалюванням мають бінарні палива, які являють собою суміші низькооктанових бензинових фракцій з КПП. У цьому разі КПП є високооктановою добавкою, що збільшує детонаційну стійкість суміші. На борту автомобіля низькооктановий бензин зберігається в наявному паливному баку, а КПП — у невеликій кількості балонів високого тиску.

1.3. Ефективність використання альтернативних видів палива

Альтернативні види палива, що використовуються сьогодні, як правило, мають високу теплоту згоряння і непогані антидетонаційні якості, що дозволяє застосовувати їх замість нафтових традиційних палив у транспортних ДВЗ без істотних змін конструкції базового двигуна. Поряд з цим, кожний вид палива має свої переваги і недоліки, базується на різноманітній сировинній основі, потребує різноманітних матеріальних, енергетичних і фінансових витрат на виробництво та застосування, створює свій особливий рівень екологічного впливу на навколишнє середовище.

Тому ефективність і доцільність використання альтернативного палива на автотранспорті визначаються з урахуванням усього комплексу ресурсних, технічних, економічних та екологічних чинників у застосуванні до конкретного регіону або країни.

Ефективність використання альтернативних моторних палив зручно оцінювати за допомогою коефіцієнта $\eta_{\text{еф}}$ згідно з формулою [21]

$$\eta_{\text{ао}} = \frac{E_{\text{аа}}}{E_{\text{ае}} + E_{\text{т}} + E_{\text{тн}} + E_{\text{іа}}}, \quad (1.1)$$

де $E_{\text{від}}$ — кількість енергії, що відводиться від двигуна за весь період його моторесурсу; $E_{\text{дк}}$ — витрати енергії на доробку конструкції транспортного засобу для використання альтернативного палива; $E_{\text{п}}$ — кількість підведеної до двигуна енергії з паливом; $E_{\text{пс}}$ — витрати енергії на видобування первинної сировини, її транспортування та переробку в паливо; $E_{\text{нтв}}$ — витрати енергії на нейтралізацію токсичних викидів з продуктами згоряння альтернативного палива.

Якщо ДВЗ, що працює на альтернативному паливі, створює ефективну потужність N_e , кВт, то за період експлуатації τ , год, величина виробленої ним енергії дорівнюватиме

$$E_{\text{аа}} = 3,6 \sum N_{e_i} \tau_i, \text{ МДж}, \quad (1.2)$$

де τ_i — час роботи двигуна на режимі, що відповідає потужності N_{e_i} .

Для оцінки витрат енергії на доробку конструкції транспортного засобу під роботу на альтернативному паливі використовують формулу

$$E_{\text{ае}} = \sum M_i (e_m + W_{\text{іа}}) K, \text{ МДж}, \quad (1.3)$$

де M_i — маса i -ї деталі з відповідного матеріалу; m — кількість деталей; e_m — питома енергоємність виробництва конструктивних матеріалів; $W_{об}$ — витрати енергії на механічну обробку, транспортування та зборку; K — коефіцієнт, що враховує витрати енергії на технічне обслуговування та ремонт у процесі експлуатації транспортного засобу.

Питома енергоємність виробництва деяких конструкційних матеріалів, що враховує витрати енергії на видобуток і збагачення руди, плавки металу, прокату та ін., наведено в довідниках.

Підведена до двигуна з альтернативним паливом енергія визначається за формулою

$$E_i = G_i Q_i^\delta = g_e N_e \tau Q_i^\delta, \text{ МДж}, \quad (1.4)$$

де G_i , кг — кількість палива, що витратив двигун за час експлуатації τ , год; Q_i^δ , МДж/кг — теплота згоряння палива; g_e , кг/кВт · год — питома витрата палива двигуном.

Витрати енергії $E_{пс}$ на видобуток природної сировини, її транспортування і переробку в альтернативне паливо можна обчислити за формулою:

$$E_{iп} = g_e N_e \tau e_i, \text{ МДж}, \quad (1.5)$$

де e_i , МДж/кг — питома витрати енергії, що віднесені до 1 кг палива, які відображають особливості паливних ресурсів регіону та енерготехнологічного переробного комплексу і визначаються за допомогою довідкових матеріалів.

Витрати енергії на нейтралізацію шкідливих компонентів, що викидаються з вихлопними газами, під час спалювання альтернативного палива в ДВЗ можна розрахувати за формулою

$$E_{i\delta\alpha} = G_i e_{i\delta\alpha} \sum m_i k_i = g_e N_e \tau e_{i\delta\alpha} \sum m_i k_i, \text{ МДж}, \quad (1.6)$$

де m_i — масова частка шкідливого забруднювача, що утворюється під час згоряння 1 т палива в ДВЗ; k_i — коефіцієнт агресивності шкідливих речовин в умовних грамах відносно 1 г відповідного забруднювача, визначається за допомогою довідкових матеріалів; $e_{нтв}$, МДж/кг — питома витрати енергії, які витрачаються на нейтралізацію одного умовного кілограму забруднювача, що приведений за токсичністю до оксиду вуглецю. Величина $e_{нтв}$ може бути визначена як економічна шкода від забруднення навколишнього середовища, що умовно приведена до теплових одиниць за допомогою нафтового еквівалента.

За допомогою виразів (1.1)...(1.6) визначають формулу для розрахунку коефіцієнта ефективності використання альтернативного палива у вигляді:

$$\eta_{\text{ао}} = \frac{1}{\frac{E_{\text{ае}}}{3,6 N_{\text{д}} \tau} + 0,278 g_e Q_i^{\text{о}} \left(1 + \frac{\dot{a}_i}{Q_i^{\text{о}}}\right) + 0,278 g_e \dot{a}_{i \text{оа}} \sum m_i k_i}. \quad (1.7)$$

Цінність цієї формули полягає в тому, що вона дозволяє комплексно оцінити ефективність використання альтернативних моторних палив за допомогою таких різнопланових показників, як питома витрата палива, його теплота згоряння, витрата на видобуток, транспортування та переробку первинного енергоносія в моторне паливо, витрата на переустаткування автотранспортного засобу та створення інфраструктури для експлуатації транспорту на альтернативному паливі, а також екологічна чистота процесу спалювання палива, які мають єдиний вимірник — величину енергії [21].

Витрати енергії $E_{\text{дк}}$ на виробництво автомобіля, що працює на нафтових моторних паливах, оцінюються спеціалістами у 80 000... 100 000 МДж. Близько 80 % цієї величини становлять енергетичні витрати на виробництво конструкційних матеріалів.

У разі переустаткування автомобіля для використання альтернативного палива слід враховувати додаткові енергетичні витрати на створення системи розподілу палива і спеціальних заправних станцій, на доробку паливних систем живлення двигуна і системи збереження палива на борту автомобіля.

Величина $E_{\text{дк}}$ може збільшитись на 10...35 % порівняно з енергетичними витратами на створення базового автомобіля, що працює на традиційних нафтових паливах.

Питома витрата палива g_e двигуна залежить від теплоти згоряння альтернативного палива, октанового числа та припустимих меж збідніння паливоповітряної суміші, які визначають граничне значення ступеня стиснення в ДВЗ, а отже, його економічність.

Питомі витрати енергії $e_{\text{нтв}}$ на виробництво моторного палива залежать від ресурсної бази і рівня видобутку первинного енергоносія, дальності його транспортування до переробних підприємств та прийнятої технології переробки сировини в моторне паливо. Так, наприклад, питомі витрати енергії на виробництво 1 т бензину А-76 з нафти становлять 38 450 МДж. При цьому на видобуток нафти витрачається 73,1 % цієї енергії, на транспорт нафти по нафтопроводах — 4,3 % і на переробку її у товарний бензин — 22,6 %. Видобуток 1 т природного газу обходиться в 10 разів дешевше видобутку

еквівалентної кількості нафти, проте витрати на транспортування газу по магістральних газопроводах майже в 15 разів перевищують витрати на перекачування нафти по нафтопроводу.

Отже, сумарні витрати на одержання 1 т природного газу в 2,67 раза менші витрат на одержання 1 т бензину. З урахуванням витрат енергії на компримування природного газу на АГНКС, які оцінюються в середньому в 260 кВт · год на кожен тону газу, питомі витрати енергії на виробництво 1 т КПГ становлять 15 000...17 000 МДж.

У табл. 1.3 подано значення відносних питомих витрат енергії на виробництво 1 т деяких альтернативних моторних палив, що приведені до витрат на виробництво бензину з нафти, а також величини e_i / Q_i^0 для різних палив.

Таблиця 1.3

ВІДНОСНІ ВИТРАТИ ЕНЕРГІЇ НА ВИРОБНИЦТВО 1 т ДЕЯКИХ АЛЬТЕРНАТИВНИХ МОТОРНИХ ПАЛИВ ТА ВЕЛИЧИНИ e_i / Q_i^0

Вид моторного палива	Відносні витрати енергії	e_i / Q_i^0
Бензин з нафти	1,0	0,867
Скrapлені нафтові гази	1,05	0,873
Компримований природний газ	0,4...0,5	0,3...0,35
Скrapлений природний газ	0,5...0,7	0,35...0,55
Етанол	1,7	2,4
Метанол	1,6...1,2	3,1...2,3

З даних видно, що природний газ характеризується найменшими питомими витратами енергії на його виробництво, що припадають на одиницю теплоти згорання. Маса токсичних компонентів, що викидаються в навколишнє середовище з викидними газами двигуна у процесі роботи на альтернативному паливі, визначається на підставі експериментальних досліджень.

Для коефіцієнта відносної агресивності k_i , що призначений для приведення фактичної маси забруднювача до його умовної маси, яка приведена за токсичністю до оксиду вуглецю, пропонується приймати такі величини:

$$\begin{aligned}
 k_{CO} &= 1,0; & k_{CO_2} &= 22; \\
 k_{NO_x} &= 41,1; & k_{C_mH_n} &= 3,16; & k_{\text{альдегиди}} &= 41,6; \\
 k_{\text{сажа}} &= 41,5; & k_{\text{бензапірен}} &= 12,6 \cdot 10^5; & k_{\text{сполуки свинцю}} &= 22\,400.
 \end{aligned}$$

Як приклад, у табл. 1.4 подано середньостатистичні величини викидів основних забруднювачів в атмосферу з продуктами згоряння вантажного автомобіля у грамах на кілометр пробігу в умовних грамах приведеного забруднювача під час роботи автомобіля на етилованому бензині А-76 і на компримованому природному газі.

Таблиця 1.4

ВИКИДИ ОСНОВНИХ ЗАБРУДНЮВАЧІВ В АТМОСФЕРУ З ПРОДУКТАМИ ЗГОРЯННЯ ПІД ЧАС РОБОТИ АВТОМОБІЛЯ НА ЕТИЛОВАНОМУ БЕНЗИНІ А-76 І НА КОМПРИМОВАНОМУ ПРИРОДНОМУ ГАЗІ

Забруднювач	Коефіцієнт k_i	Бензин		КПГ	
		m_i , г/км	$k_i m_i$, ум. г/км	m_i , г/км	$k_i m_i$, ум. г/км
СО	1,0	40...43	40...43	16...7	16...7
NO _x	41,1	0,5...0,57	20,6...23,4	0,25...0,30	10,3...12,3
C _m H _n	3,16	3,5...4,0	11...12,6	2,5...2,8	7,9...8,85
Бензапірен	$12,6 \cdot 10^5$	$(2...4) \cdot 10^{-6}$	2,52...5,04	—	—
Сполуки свинцю	22 400	$0,5 \cdot 10^{-3}$	11,2	—	—

Точне визначення величин питомих витрат енергії на нейтралізацію токсичних продуктів згоряння $e_{нтв}$ нині не є можливим. У деяких країнах уряди серйозно стурбовані екологічною ситуацією. Там введено диференційований податок на транспортні засоби залежно від типу палива і потужності двигуна, отримані кошти направляються на природоохоронні заходи та охорону здоров'я населення.

Як перше наближення, якщо застосовувати формулу (1.7) для визначення ефективності використання моторних палив, пропонується приймати значення $e_{нтв} = 0,5$ МДж на умовну тонну суми забруднювачів, що викидаються в атмосферу з вихлопними газами.

Для прикладу застосування формули (1.7) виконаємо порівняльний розрахунок величини коефіцієнта ефективності використання моторних палив, якщо автомобіль послідовно працює на етилованому бензині А-76, компримованому природному газі та на метанолі.

Прийmemo такі вихідні дані:

- потужність двигуна $N_e = 80$ кВт;
- ресурс роботи автомобіля $\tau = 5000$ год, що відповідає пробігу в 300 тис. км з середньою швидкістю 60 км/год;
- витрати енергії на створення бензинового автомобіля прийняті $E_{дж} = 81\ 000$ МДж; для автомобіля, що працює на КПГ і на метанолі, цей розмір збільшений у 1,35 і 1,25 рази, відповідно;

• ступінь стиснення двигуна прийнята як максимально допустима величина, зумовлена детонаційною стійкістю палива (октановим числом за моторним методом), і становить 7,2 для бензину, 14,0 — для КПП і 9,8 — для метанолу;

• питома витрата палива розрахована залежно від теплоти згоряння палива та ефективного ККД двигуна за формулою

$$g_e = 3600 / Q_i^\delta \eta_{\text{ао}} . \quad (1.8)$$

Результати розрахунків зведено в табл. 1.5.

Таблиця 1.5

**РОЗРАХУНОК ВЕЛИЧИН КОЕФІЦІЄНТА
ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ МОТОРНИХ ПАЛИВ**

№ з/п	Показники	Паливо		
		Бензин А-76	КПП	Метанол
1	Потужність двигуна, N_e , кВт	80	80	80
2	Ступінь стиснення, ϵ	7,2	14,0	9,8
3	Ефективний ККД двигуна, $\eta_{\text{еф}}$, %	28	39	34
4	Питома витрата палива, g_e , кг/кВт · год	0,292	0,185	0,492
5	Витрати енергії на виробництво автомобіля, $E_{\text{лк}}$, МДж	81 000	110 000	102 000
6	Відношення питомих витрат енергії на виробництво палива, $e_{\text{п}} / Q_{\text{н}}^{\text{р}}$	0,87	0,35	2,7
7	Токсичні викиди з вихлопними газами на 1 кг палива:			
	— оксид вуглецю, CO , г/кг палива	200	60	50
	— оксиди азоту, NO_x , г/кг палива	7	4	2
	— вуглеводні, C_mH_n , г/кг палива	10	7	2,5
	— бензапірен, $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$, г/кг палива	$20 \cdot 10^{-6}$	—	—
8	— сполуки свинцю, г/кг палива	0,04	—	—
	— альдегіди, г/кг палива	25	5	250
	Умовна маса викидів з урахуванням коефіцієнта агресивності (на 1 кг палива):			
	— оксид вуглецю, CO , ум. г/кг палива	200	60	50
	— оксиди азоту, NO_x , ум. г/кг палива	288	164	82
— вуглеводні, C_mH_n , ум. г/кг палива	32	22	8	
— бензапірен, $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$, ум. г/кг палива	25,2	—	—	
— сполуки свинцю, ум. г/кг палива	896	—	—	
— альдегіди, ум. г/кг палива	1040	208	10 400	
	Сума $\Sigma m_i k_i$, ум. г/кг палива	2481,2	454	10 540

№ з/п	Показники	Паливо		
		Бензин А-76	КПГ	Метанол
9	Витрата палива автомобілем при пробігу 300 тис. км, т	116,8	74,0	196,8
10	Маса умовних викидів за термін життя автомобіля, ум. т	289,8	33,6	2074,3
11	Коефіцієнт ефективності використання палива без урахування витрат на нейтралізацію токсичних викидів, $\eta_{\text{еф}}$	0,148	0,282	0,091
12	Коефіцієнт ефективності використання палива з урахуванням витрат на нейтралізацію токсичних викидів, $\eta_{\text{еф}}$	0,126	0,275	0,040

Аналіз результатів розрахунку вказує на те, що навіть без урахування витрат на нейтралізацію токсичних викидів ефективність використання компримованого природного газу як моторного палива в 2 рази вища за ефективність використання бензину та у 3 рази вища за ефективність використання метанолу.

Питання для самоконтролю

1. Назвіть основні переваги і недоліки нафтових моторних палив.
2. Назвіть високотоксичні компоненти вихлопних газів під час роботи транспорту на нафтових моторних паливах.
3. Які альтернативні види палива розглядаються як перспективні для застосування на автомобільному транспорті?
4. Стисло охарактеризуйте альтернативні моторні палива.
5. Які складові входять до формули визначення ефективності використання альтернативних моторних палив? Поясніть їх фізичний смисл.
6. Назвіть високотоксичні компоненти вихлопних газів під час роботи транспорту на компримованому природному газі.