

4. ПАЛИВА ДЛЯ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ

4.1. Умови застосування і основні вимоги до дизельних палив

4.2. Умови згоряння палива та забезпечення м'якої роботи двигуна

4.3. Прокачувальна здатність і сумішоутворюючі властивості дизельних палив

4.4. Оцінка самозаймистості і цетанове число палива

4.5. Нагароутворюючі і корозійні властивості палива

4.6. Асортимент палив для дизельних двигунів та область їх застосування

4.7. Закордонні класифікації дизельних палив

4.1. Умови застосування і основні вимоги до дизельних палив

Дизельні двигуни дуже широко розповсюджені у багатьох галузях народного господарства. У сільськогосподарському виробництві використовують швидкохідні дизелі, в яких швидкість руху поршня перевищує 6,5 м/с, а частота обертання колінчастого вала – більше 1000 с^{-1} . Їх встановлюють на тракторах, комбайнах, самохідних шасі, а також великовантажних автомобілях. У перспективі планується перевести на дизельні двигуни більшість вантажних автомобілів і деякі легкові.

Основна перевага дизельних двигунів – їх висока економічність, питома витрата палива на 25...30% нижча ніж у карбю-

раторних двигунів. Дизельне паливо дешевше, менш вибухо- і пожежо небезпечне у порівнянні з бензиновим.

Дизельне паливо – це складна суміш парафінових, ароматичних вуглеводнів і їх похідних з числом атомів вуглецю 10...20, середньої молекулярної маси 200...250, які википають у межах 170...380 °С. Прозора, більш в'язка ніж бензин, масляниста рідина від жовтуватого до світло-коричневого кольору густиною 0,78...0,86 кН/м³. Одержують дизельне паливо прямою перегонкою нафти з додаванням до 20% продуктів каталітичного крекінгу.

Робочий процес дизелів значно відрізняється від карбюраторних двигунів. Тут паливо з киснем змішується безпосередньо в камері згоряння, що визначає специфічні вимоги до якості палива. Велико оборотні дизелі мають високу ступінь стиску $\varepsilon = 16...20$. У цих двигунах в стиснуте у циліндрі до 3...5 МПа і за рахунок цього розігріте до 600...800 °С повітря через форсунку вприскується порція палива. У циліндрі воно перемішується з гарячим повітрям, випаровується, самозаймається та згорає. За дуже малий проміжок часу (30...25⁰ оберту колінчастого вала) проходять всі складні процеси утворення суміші та згоряння палива. Звичайно, чим швидкохідніший двигун, тим менше часу, яке відводиться на ці процеси. При однаковій частоті обертання колінчастого вала у карбюраторних двигунах на утворення суміші та згоряння відводиться у 10...15 разів більше часу ніж в дизелях.

Надійна та економічна робота дизеля можлива тільки при правильному підборі палива, встановленні оптимального кута випередження вприскування, коли згоряння повністю закінчується через декілька градусів повороту колінчастого вала після ВТМ і не відбувається догоряння під час робочого ходу. В іншому випадку падає потужність, підвищується витрата палива, випускні гази стають чорними.

Паливо для швидкохідних дизелів повинно відповідати наступним експлуатаційним вимогам:

- мати хорошу прокачуваність при різних температурах навколишнього середовища;
- мати хороший розпил, сумішеутворення та займання;
- володіти відповідною в'язкістю;
- не мати сірчаних сполук, органічних та мінеральних кислот, води, механічних домішок;
- при згорянні виділяти більший обсяг тепла;
- бути стабільними і не змінювати властивості при довготривалому зберіганні.

4.2. Умови згоряння палива та забезпечення м'якої роботи двигуна

Більш висока у порівнянні з карбюраторним економічність дизельних двигунів зумовлюється своєчасним займанням та повним згорянням вприснутого палива. Ці фактори узагальнюються збільшенням ступеня стиснення ($\epsilon=14\ldots 20$) та забезпеченням достатньою кількістю кисню для згоряння (коефіцієнта надлишку кисню $\alpha=1,4\ldots 1,5$) палива.

Від моменту вприскування палива в камеру згоряння і до виникнення горіння та виділення тепла, проходить визначений, хоч і дуже не великий, проміжок часу. Температура, до якої паливо повинно бути нагріто, щоб почалось його займання, називається *температурою самозаймання*. Вона залежить від хімічної складової палива та зовнішніх умов (тиску, складу робочої суміші, типу камери згоряння тощо).

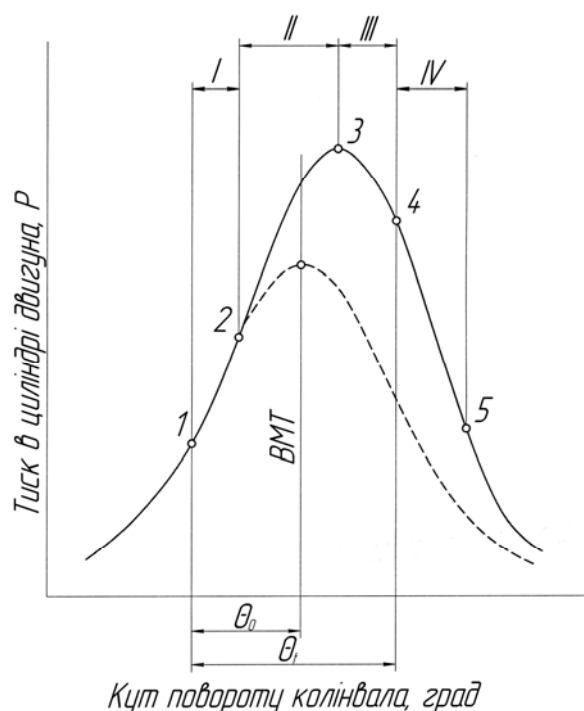


Рис. 1.30. Розгорнута індикаторна діаграма дизельного двигуна

Процес згоряння палива, представлений у вигляді розгорнутої індикаторної діаграми (рис. 1.30), може бути поділений на чотири фази: I – фаза затримки (запізнення) самозаймання; II – фаза швидкого горіння, або період інтенсивного наростання тиску; III – фаза уповільненого горіння; IV – фаза догорання.

Із заданим випередженням вприскування палива θ_0 у точці 1 до прибуття поршня до ВМТ починається вприскування палива і продовжується до точки 4 із загальним θ_t . Однак згорання палива і супутнього йому інтенсивного збільшення температури та тиску в циліндрі не відмічається до точки 2. Повільне збільшення тиску відбувається внаслідок продовження ходу стискання.

Відрізок I діаграми від точки 1 до точки 2 представляє *фазу затримки самозаймання*. В цей проміжок часу вприснуте паливо розсіюється, розігрівається та випаровується, причому утворювані пари палива взаємно дифундують. Разом з тим протікають і займальні окислювальні процеси, котрі завершу-

ються самозайманням утвореної суміші парів палива та повітря в одному або декількох осередків, де виявились найбільш сприятливі умови для їх виникнення. Тепло, яке виділяється при появі осередку полум'я, прискорює закінчення процесів фізичної та хімічної підготовки займання усієї кількості палива, яке поступило до камери згоряння. Продовжування першої фази залежить і від розміру крапель розсіяного палива. Чим вони менші, тим швидше паливо нагрівається та випаровується.

Потім починаються процеси, які характеризують фазу II швидкого згоряння. Кількість палива, що згорає у цій фазі, безпосередньо залежить від тривалості фази I. Очевидно, чим більша фаза I, тим більше палива накопичується у камері згоряння. Відповідно цьому виділення тепла та наростання тиску у фазі II процесу відбувається інтенсивніше, що на індикаторній діаграмі відображається збільшенням крутизни лінії 2 – 3, тобто збільшенням значення $dp/d\phi$.

При досягненні деякої інтенсивності зростання тиску $dp/d\phi$ робота двигуна робиться більш жорсткою, у результаті чого утворюються передумови для виникнення ударної хвилі. Якщо ж фаза I, і буде скорочуватись, то зменшиться і кількість палива, яке надходить у камеру згоряння. У цьому випадку тиск під час фази II процесу згоряння нарощується більш повільно і двигун буде працювати м'якше (без стуків).

Отже, м'яка або жорстка робота двигуна визначається характером протікання фази II, тобто інтенсивністю зростання тиску $dp/d\phi$, яка, в свою чергу, залежить від тривалості фази I та затримки самозаймання.

Одразу ж після фази II починається *фаза III повільного згоряння палива*, при якій ще продовжується вприскування палива. Ця фаза триває до того часу, коли покращиться надходження палива у камеру згоряння (до точки 4).

Потім вступає у дію *фаза IV догоряння* палива, яка протікає під час робочого ходу при зниженні тиску в циліндрі. Збільшення тривалості цієї фази веде до підвищення температури відпрацьованих газів, посиленню димності випуску, пони-

женню ККД двигуна. Тому потрібно максимально скорочувати періоди фази догоряння. Практично ця фаза характеризує невизначений час протікання процесу догоряння та залежить від багатьох факторів (як від зовнішніх, так і від хімічного складу самого палива).

Інтенсивність наростання тиску залежить від кількості палива, що надходить в циліндр у період затримки самозаймання. Чим триваліший цей період, тим більше надійде палива в циліндр. Виділення теплоти і відповідно наростання тиску в циліндрі відбувається різко, тому робота двигуна буде супроводжуватися стуками і її називають “жорсткою”. «Жорстка» робота дизельного двигуна так само небажана, як і детонація в карбюраторних двигунах.

Режим роботи двигуна оцінюється зростанням тиску в камері згоряння на 1^0 повороту колінчастого вала. Якщо тиск зростає на 0,25...0,60 МПа – двигун працює м’яко, при 0,6...0,8 МПа – жорстко, а вище 0,8 МПа – дуже жорстко. Таким чином для нормальної роботи двигуна необхідно щоб паливо самозаймалось у чітко визначений момент і потім енергійно згорало, але достатньо плавно із зростанням тиску не більше 0,4...0,6 МПа на один градус повороту колінчастого вала. У цьому випадку буде, так звана, “м’яка” робота двигуна, при якій розвивається максимальна потужність і забезпечується необхідна паливна економічність.

Порівнюючи вплив окремих факторів на жорсткість роботи дизельного двигуна та детонацію карбюраторного двигуна, які характеризуються появою стуків, потрібно відмітити, що як збільшення кута випередження впорскування палива, так і збільшення кута займання аналогічно погіршують роботу двигуна. Однаковий ефект дає і підвищення частоти обертання колінчастого вала: у карбюраторних двигунів зменшується детонація, а у дизельного знижується жорсткість роботи. Це пояснюється деякими загальними рисами протікання фізичних та хімічних процесів згоряння палива. Так, для відмічених факторів головну роль відіграє час, який відводиться на процес

окислення та згоряння палива. Дійсно, в карбюраторних двигунах скорочення часу на окислювальні процеси сприяє пониженню детонації. У дизельному ж двигуні зменшується період затримки самозаймання та швидкого займання, що сприяє зниженню інтенсивності наростання тиску та робить роботу двигуна більш м'якою.

Усі інші фактори (ступінь стиску, температура деталей двигуна, з якими вступає в контакт робоча суміш, температура засмоктаного повітря та його щільність, наявність наддуву тощо) надають прямо протилежну дію на характер роботи (виникнення стуків) двигунів цих типів.

Щоб пояснити таку розбіжність, необхідно замітити наступне. Швидкість протікання процесів сумішеутворення та окислення під час фази затримки самозаймання палива залежить від температури. З її підвищенням ці процеси прискорюються, а це значить, тривалість фази затримки зменшується. Тому фактори, які сприяють підвищенню температури у дизельному двигуні до початку і під час впорскування, забезпечують більш м'яку його роботу; у карбюраторному ж двигуні ті ж фактори ведуть до виникнення детонаційного згоряння.

Якщо ж розглядати конструктивні фактори, такі, скажімо, як підвищення ступеня стиску, використання наддуву тощо, то вони приводять не тільки до зростання тиску, але й до підвищення температури, а це сприяє прискоренню хімічних реакцій, що для дизельних двигунів значить більш м'яку роботу, а для карбюраторних двигунів підсилення передумов до детонації. Це можна проілюструвати кривими на рисунку 1.31, який показує вплив ступеня стиску ϵ на період t затримки самозаймання. З ростом ϵ температура та тиск у камері згоряння збільшується, що призводить до зменшення періоду затримки самозаймання.

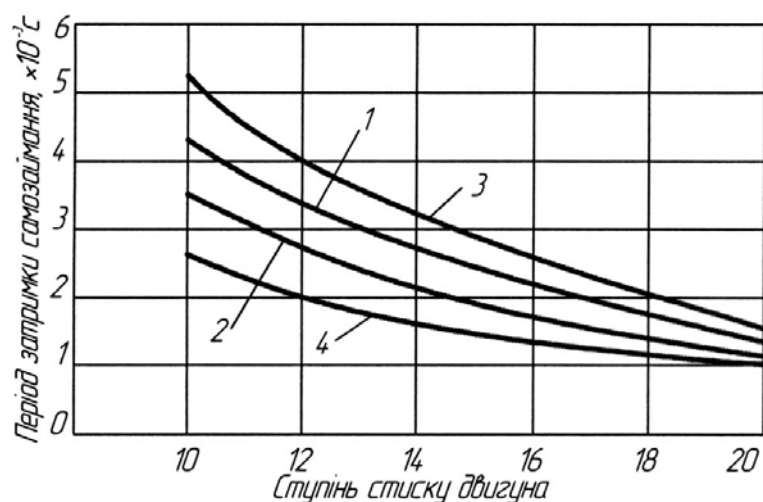


Рис. 1.31. Вплив ступеня стиску на період затримки самозаймання:

1 – дизельне паливо ДЛ; 2 – парафіно-нафтова частина палива ДЛ;

3 – ароматична частина палива ДЛ; 4 – синтин

Протилежний вплив дає і хімічний склад палива. Наприклад, якщо ароматичні вуглеводи сприяють підвищенню детонаційної стійкості бензинів, то їх кількість у дизельному паливі викликана великою затримкою до утворення окисних сполучень, збільшує фазу періоду затримки самозаймання та призводить до жорсткої роботи. Та, навпаки, збільшення вмісту у дизельному паливі нормальних парафінів, у силу їх схильності до легкого утворювання окисних сполучень, скорочує період затримки самозаймання та сприяє м'якій роботі.

Попутно можна відмітити інші конструктивні та експлуатаційні фактори, які оказують вплив на характер роботи дизельного двигуна. Так, підвищення температури та тиску повітря на вході в циліндри двигуна також сприяє зниженню періоду затримки самозаймання. Не мале значення має і своєчасність впорскування палива. Якщо впорскування раннє у порівнянні з оптимальним, то за рахунок займання та передчасного згоряння частини палива може розвиватися значний тиск ще до приходу поршня у ВМТ, який викличе втрату потужності на переборення тиску горючих газів, що також недопустимо. Таким же чином на процеси горіння впливає і конструкція камери згоряння. Вона

повинна забезпечити інтенсивне хвиле утворення, що буде скорочувати час розігрівання та випаровування палива, яке було вприснуте.

Важливий і правильний вибір матеріалу для деталей циліндро-поршневої групи. Наприклад, з матеріалу поршнів краще чавун, оскільки із-за меншої теплопровідності температура чавунного поршня в одних і тих же умовах виявиться вище алюмінієвого, що в свою чергу буде сприяти більш інтенсивному нагріванню палива та зменшенню періоду самозаймання.

4.3. Прокачувальна здатність і сумішоутворюючі властивості дизельних палив

Надійність подачі дизельного палива залежить від прокачувальної здатності, тобто здатності його проходити через елементи системи живлення, головним чином через фільтри грубого і тонкого очищення. Фільтри грубої очистки затримують механічні домішки розміром більше 50...60 мкм, тонкої більше 2...5 мкм. При порушенні їх роботи зменшується, а іноді зовсім припиняється циклова подача палива, падає тиск вприскування палива тощо.

На характер надходження палива через систему живлення дизеля впливають його в'язкість і низькотемпературні властивості, а також забрудненість механічними домішками і водою.

Якщо паливо має високу в'язкість та його фільтрація обмежена – це може призвести до порушення подачі палива насосом. При малій в'язкості порушується дозування палива внаслідок просочування його між плунжером і гільзою насоса високого тиску. Крім того, дизельне паливо є мастильним матеріалом для прецизійних деталей системи живлення, тому мінімальна і максимальна його в'язкість регламентується ГОСТом.

В'язкість і низькотемпературні властивості палива взаємопов'язані і негативно впливають на його прокачувальну здатність при низьких температурах.

Подача палива при низьких температурах може порушуватися внаслідок забивання фільтрів кристалами парафіну. Такий стан палива визначається температурою помутніння. Це температура, при охолодженні до якої паливо втрачає прозорість в наслідок виділення мікро кристалів парафіну, церезину і льоду. Для надійної подачі палива у зимовий період температура помутніння повинна бути на 3...5 °С вище тієї, при якій воно використовується.

Низькотемпературні властивості палива характеризують температура кристалізації і температура застигання. За температуру кристалізації приймають таку температуру, при якій в паливі з'являються перші кристалики, які можна побачити неозброєним оком. Температурою застигання називають температуру, при якій налите у пробірку паливо, під час охолодження в певних умовах, досягне такого стану, що не змінює положення меніску протягом однієї хвилини при нахиленні пробірки на 45°. Застигання палива настає при зниженні температури на 5...15 °С після його помутніння. Температура застигання – це важливий показник дизельного палива, який визначає можливість його використання при низьких температурах і входить в умовне позначення зимових дизельних палив. Для надійної роботи системи живлення найнижча температура навколишнього середовища повинна бути на 10...15 °С вищою температури застигання.

Температури помутніння і застигання не завжди відтворюють реальну поведінку дизельного палива при його використанні в зимових умовах. Більш точніше характеризує прокачувальну здатність дизельного палива при низьких температурах *гранична температура фільтрації палива*. Це температура, при якій паливо, після охолодження в певних умовах, здатне ще проходити через фільтри з установленою швидкістю.

Визначають граничну температуру фільтрації за допомогою спеціального приладу (рис. 1.32).

Паливо під не великим розрідженням (200 мм. вод. ст.) засмоктується через стандартну сітку (№ 004), закріплену в патроні, у скляну бюретку місткістю 20 мл. Випробування проводя-

124

ться послідовно, охолоджуючи паливо на один градус. Температуру, при якій припиняється фільтрування палива або час заповнення бюретки перевищить 60 с, приймають за граничну температуру фільтрації.

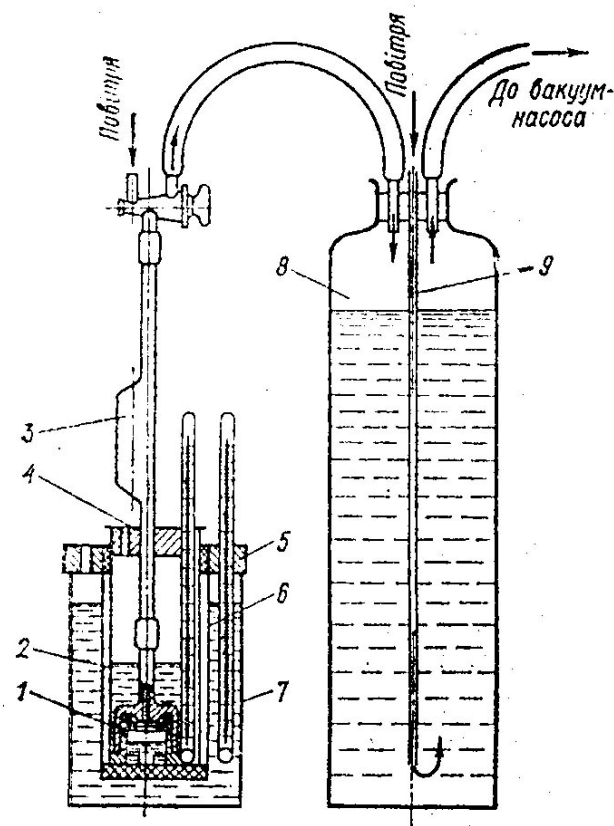


Рис. 1.32. Схема приладу для визначення граничної температури фільтрації:

1 – фільтр; 2 – ємність для палива; 3 – бюретка; 4 – пробка коркова;
5 – кришка; 6 – ємність-сорочка; 7 – ємність для охолодної суміші; 8 – ємність постійного вакууму; 9 – трубка скляна для сполучення з атмосферою

Дослідження показують, що гранична температура фільтрації дизельних палив, як правило буває нижче температури помутніння, але вище температури застигання. Однак положення її в цьому інтервалі температур може бути різним: або ближче до температури помутніння, або – до температури застигання.

На нафтопереробних заводах покращують низькотемпературні властивості дизельних палив видаленням твердих вуглеводів при депарафінізації або додаванням присадок – депресорів. При цьому застосовують присадки суміші сополімерів етилену з вінілацетатом, які суттєво на 20°C і більше понижують температуру застигання і граничну температуру фільтрації палив, але практично не змінюють температуру помутніння.

В умовах експлуатації температуру застигання і помутніння понижують, розбавляючи літнє дизельне паливо реактивним паливом або бензином, в яких температура початку кристалізації не вище мінус 60°C . При цьому температура помутніння знижується на $10...11^{\circ}\text{C}$, а температура застигання – на $20...22^{\circ}\text{C}$. Однак використовувати кількість розчинника більше 50% (за об'ємом) не рекомендується, так як значно знижується цетанове число і в'язкість суміші, що призводить до зниження надійності і економічності дизеля.

На процес сумішоутворення дизельного палива з повітрям в основному впливають конструктивні особливості двигуна і властивості палива.

Сучасні дизельні двигуни мають нерозділену (передкамерну і вихрекамерну) камеру згорання. Форма камери згорання, число форсунок, кількість, форма і розмір соплових отворів форсунки, тиск і напрям впорскування палива значною мірою впливають на процес сумішоутворення в дизелях. Всі ці конструктивні особливості дизельних двигунів вибирають експериментально таким чином, щоб забезпечити належне сумішоутворення.

Процес сумішоутворення в дизельних двигунах залежить також від фізико-технічних властивостей палива: в'язкості, густини, фракційного складу, тиску насиченої пари, поверхневого натягу тощо.

Збільшення в'язкості палива веде до збільшення крапель у факелі, що значно погіршує його розпилення і випаровування. Паливо з великою в'язкістю догорає в кінці такту розширення, знижуючи економічність і підвищуючи димність відпрацюва-

них газів. З другого боку, паливо з малою в'язкістю також погіршує процес сумішоутворення. При його розпилюванні утворюються дрібні краплі, швидкість яких у щільному повітрі швидко падає, утворюючи укорочений факел. Внаслідок цього не весь об'єм камери згоряння використовується для приготування однорідної суміші і не все повітря бере участь у сумішоутворенні, що призводить до надлишку палива і не повного його згоряння. У зв'язку з цим в'язкість дизельного палива повинна бути цілком оптимальною, щоб забезпечити належне сумішоутворення.

Густина дизельного палива суттєво впливає на процес сумішоутворення, приблизно так само, як і в'язкість. З підвищення густини збільшується довжина факела, знижується економічність і зростає димність відпрацьованих газів. Густина дизельного палива при температурі 20°C повинна бути в межах $(0,830...0,860) \cdot 10^{-4} \text{ Н/м}^3$.

Важливою характеристикою для розпилювання дизельного палива є поверхневий натяг – розмір крапель пропорційний величині поверхневого натягу. Із збільшенням фракційного складу палива, підвищується його густина, а поверхневий натяг збільшується. Для палив швидкохідних дизелів поверхневий натяг знаходиться у межах $0,027...0,030 \text{ Н/м}$, а для тихохідних – більше $0,030 \text{ Н/м}$.

Дизельне паливо повинно мати цілком певний фракційний склад. Використання палива як важкого, так і легкого фракційного складу призводить до порушення роботи двигуна. У першому випадку в наслідок його незадовільного випаровування відбувається несвоєчасне самозаймання і неповне згоряння, що призводить до змивання масла зі стінок циліндрів, збільшення нагару, розрідження масла в картері тощо. У другому випадку ускладнюється пуск двигуна, збільшується жорсткість його роботи. Вплив фракційного складу палива на сумішоутворення різних типів двигунів не однаковий. Двигуни з розділеними камерами згоряння менш чутливі до фракційного складу палива, ніж двигуни з нерозділеними камерами згоряння.

Стандартом передбачається визначати температуру перегону 50 і 96 % палива: $t_{50\%}$ – впливає на його пускові властивості; $t_{96\%}$ – є температурою кінця перегонки і свідчить про наявність важких фракцій, які погіршують сумішоутворення.

У зв'язку з “дизелізацією” автомобільного парку і зростання потреб у дизельному паливі, вивчаються питання розширення ресурсів таких палив шляхом зміни їх фракційного складу як за рахунок підвищення температури кінця кипіння, так і за рахунок зниження температури початку кипіння.

Палива з підвищеною температурою кінця кипіння називають обваженими (ОФС). Лабораторні дослідження і випробування показують, що можна збільшити ресурси дизельного палива на 3...4% за рахунок більш глибокого відбору з нафти прямогонних фракцій з температурою википання на 25...30 °С вище температури википання стандартного дизель-ного палива.

Полегшення фракційного складу за рахунок введення бензинових фракцій покращує експлуатаційні властивості обважених палив. Таким чином при значній “дизелізації” автомобільного парку перспективним буде використання єдиного дизельного палива з температурою початку кипіння 66...80 °С, яке називається – дизельне паливо широкого фракційного складу (ШФС).

4.4. Оцінка samozaimistosti і цетанове число палива

Самозаймистість – це характеристика тих властивостей дизельного палива, які впливають на м'якість і жорсткість роботи дизельного двигуна. Для нормальної роботи дизеля необхідно, щоб паливо samozaimalos' у чітко визначений момент і потім енергійно згорало, викликаючи інтенсивне, але достатньо плавне підвищення тиску, не перевищуючи 0,4...0,6 МПа на один градус повороту колінчастого валу. У цьому випадку буде, так звана, “м'яка” робота двигуна, при якій розвивається максимальна потужність і забезпечується необхідна паливна економічність. Якщо samozaimання запізнюється, то це призводить до жорсткої роботи двигуна. Визначають samozaimistість, порів-

нюючи роботу стандартного двигуна на досліджувальному паливі і на спеціально підібраній суміші еталонних палив.

Оціночним показником, що характеризує самозаймистість дизельного палива, є цетанове число, яке визначається методом порівняння займистості палива із займистістю суміші двох вуглеводнів (двох еталонів). В якості одного еталона прийнятий цетан ($C_{16}H_{34}$) – парафіновий вуглевод нормального складу, період затримки самозаймання якого малий. Його цетанове число (ЦЧ) приймають за 100. У якості другого еталона прийнятий альфаметилнафтелін ($C_{10}H_7CH_3$) – ароматичний вуглевод із циклічним бензольним ядром, період затримки самозаймання якого великий, і цетанове число дорівнює 0.

Цетанове число дорівнює відсотковому вмісту (за об'ємом) цетану в такій суміші з альфаметилнафталіном, що рівноцінна даному паливу за самозаймистістю при випробуванні в стандартних умовах. Визначають цетанове число на спеціальних установках, конструкція яких забезпечує зміну ступеня стиску у межах 7...23, різними методами: змінами критичного ступеня стиску, запізнення самозаймання, збігу спалахів тощо. Найбільшого поширення набув метод збігу спалахів, суть якого така. При роботі установки на дизельному паливі, ЦЧ якого визначають, змінюючи ступінь стиску добиваються такого положення, щоб при вприскуванні палива за 13^0 повороту колінчастого вала до ВМТ самозаймання горючої суміші починалось рівно у ВТМ, про що повідомляють спеціальні датчики. Потім підбирають таку суміш цетану з альфаметилнафтеліном, яка при тому ж ступеню стиску мала б такий же період затримки самозаймання (13^0). Вміст цетану в такій суміші в відсотках за об'ємом і приймають за цетанове число.

Цетанове число дизельних палив залежить від їх вуглеводневого складу, структури і молекулярної маси (табл. 1.15).

Таблиця 1.15

Цетанові числа деяких вуглеводнів

Група	Найменування	Формула	ЦЧ
Парафінові	Н – декан	$C_{10}H_{22}$	77
	Цетан	$C_{16}H_{34}$	100
Нафтеніві	Декалін	$C_{10}H_{20}$	48
	Метилдіпропілдекалінметан	$C_{10}H_{17}C_8H_{17}$	21
Ароматичні	Альфа метилнафталін	$C_{10}H_7CH_3$	0
	Альфаоктилнафталін	$C_{10}H_7C_8H_{17}$	18

Знаючи груповий вуглеводний склад палива визначають цетанове число за формулою (1.33)

$$ЦЧ = 0,85 П + 0,1 Н = 0,2 А, \quad (1.33)$$

де П, Н, А – відповідно вміст у паливі парафінових, нафтових і ароматичних вуглеводнів, у відсотках за масою.

Цетанове число можна обчислити і знаючи густину та кінематичну в'язкість

$$ЦЧ = (V_{20} + 17,8) \cdot 1,5879 / P_4^{20}, \quad (1.34)$$

де V_{20} – в'язкість палива при $20^\circ C$, mm^2/s ;

P_4^{20} – густина палива, g/m^3 .

За цими формулами можна лише приблизно знайти цетанове число. Вони не придатні при визначенні цетанових чисел для палив з присадками, які підвищують цетанове число, а також для палив, у склад яких входять бензинові фракції.

Враховуючи, що вуглеводні з високим цетановим числом мають низьку детонаційну стійкість, тобто низьке октанове число, виведено емпіричну залежність між ними

$$ЦЧ = 60 - 0,4/2. \quad (1.35)$$

За кордоном для характеристики самозаймання дизельного палива, поряд з цетановим числом, використовують показник – дизельний індекс (ДІ). Між дизельним індексом і цетановим числом палива існує така залежність

<i>Дизельний індекс</i>	20	30	40	50	62	70	80
<i>Цетанове число</i>	30	35	40	45	55	60	80

Цей показник нормується і у вітчизняній технічній документації на дизельне паливо, яке поставляється на експорт.

Оптимальне значення цетанового числа 40...50. Використання палива з цетановим числом менше 40 призводить до жорсткої роботи двигуна, а більше 50 – до збільшення питомої витрати палива за рахунок зменшення повноти згоряння. Влітку можна успішно застосовувати паливо з цетановим числом 40, а взимку, для забезпечення пуску холодного двигуна, цетанове число повинно бути не менше 45.

Величина цетанового числа впливає на пускові властивості дизельного палива. З підвищенням цетанового числа пуск двигуна полегшується (рис. 1.33). Однак це стосується палив, які не значно відрізняються за фракційним складом. При більшій різниці у фракційному складі важке паливо з високим цетановим числом часто має гірші пускові властивості, ніж легке паливо з більш низьким цетановим числом (рис. 1.34).

Цетанові числа можуть бути підвищені двома способами: регулюванням вуглеводного складу або введенням нових присадок.

Перший спосіб заснований на тому, що різні групи вуглеводнів мають різну самозаймистість (див. табл. 1.15). Таким чином цетанове число палив можна суттєво підвищити, збільшуючи концентрацію нормальних парафінів і знижуючи вміст ароматиків. Але із-за підвищеної температури плавлення нормальних парафінів, у порівнянні з іншими групами вуглеводнів, їх

значний вміст у зимових марках дизельних палив не допустимий.

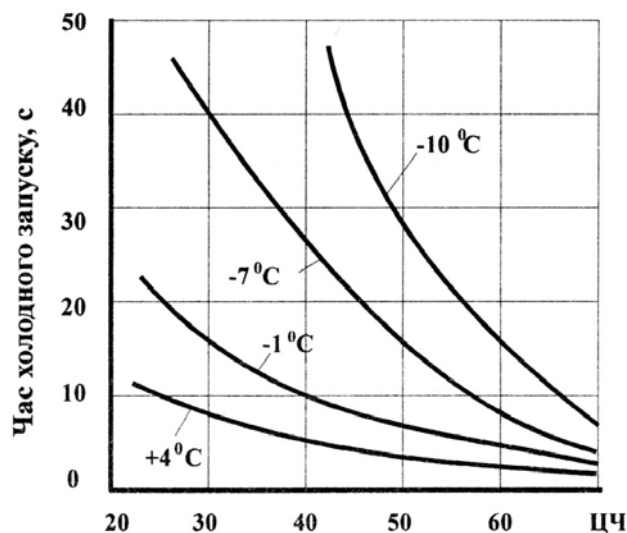


Рис. 1.33. Залежність часу пуску холодного дизельного двигуна від цетанового числа палива при різних температурах повітря (частота обертання колінчастого вала 100 хв^{-1})

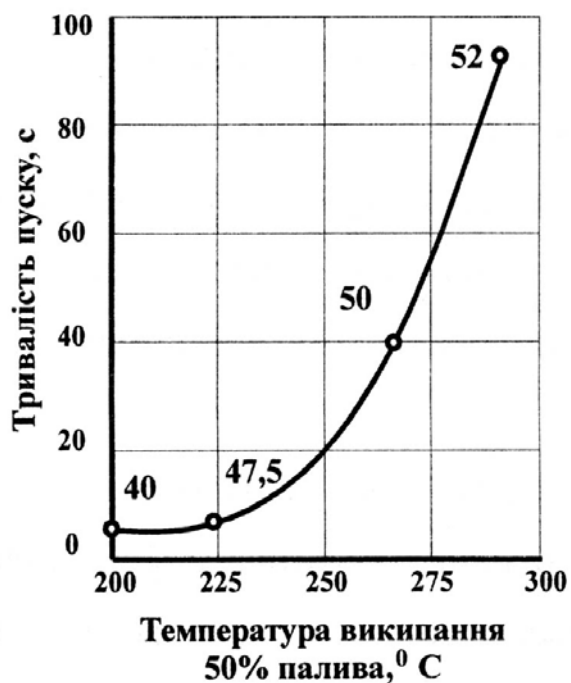


Рис. 1.34. Залежність часу пуску дизельного двигуна від температури википання 50% палива (числа над точками – цетанові числа)

Другий спосіб забезпечує найбільше підвищення цетанового числа. Механізм дії присадок оснований на їх здатності порівняно легко виділяти з свого складу кисень. Як сильні окислювачі вони прискорюють початкові передполумєнові реакції, сприяють розгалуженню окислювальних ланцюгів і утворення нових активних центрів реакції. Ефективність дії найпоширеніших присадок наведено нижче.

Ефективність присадок, що підвищують цетанове число:

Присадка (1%, за масою)	Підвищення цетанового числа, од.
Ізопропілнітрат	17
Бутилнітрат	19
Амїлнітрат	23
Пероксид бутила	20
Пероксид гептила	16

4.5. Нагароутворюючі і корозійні властивості палива

Нагароутворюючі властивості дизельного палива характеризують його схильність до утворення в результаті згоряння специфічних відкладень на деталях циліндро-поршневої групи та газорозподільчого механізму, що призводить до значних порушень в роботі двигуна (погіршення тепловіддачі, зависання клапанів, підгоряння голки форсунки, закоксовування поршневих кілець тощо).

Серед факторів, які безпосередньо впливають на процес нагароутворення, необхідно відмітити наступні: підвищення в'язкості палива, великомолекулярні смолисто-асфальтові утворення та непридільні вуглеводні, сірчані з'єднання, механічні суміші. В наслідок цього, з метою зменшення впливу палива на нагароутворення в двигуні, необхідно обмежити або повну відсутність небажаних в паливі цілого ряду механічних сумішей та з'єднань.

Хоча в даний момент немає достатньо точного метода оцінки нагароутворюючих властивостей палива, однак загально прийняті показники коксуємості у деяких ступенях дозволяють думати про схильність палива до відкладання нагару (особливо для порівняння оцінки різних партій товару одного і того ж палива при приймальних іспитах).

Коксуємість палива визначається у спеціальному приборі (рис. 1.35). Фарфоровий тигель 1 з навіскою палива, що підлягає випробуванню, ставлять у залізний тигель 2, який служить повітряною банею, і разом їх поміщають в тигель 3 з піском, який виконує функцію пісочної бані. Потім тиглі установлюють у залізному азбестованому муфелі 4 та закривають ковпаком 5. При нагріванні тигелів випробуване паливо коксується, а утворенні пари та газу підпалюються на виході з ковпака. Процес коксування закінчується, коли закінчується виділення газів, на що вказує згасання полум'я. Після цього фарфоровий тигель охолоджують у ексикаторі та важать. Коксуємість, або, як іноді називають, коксовану кількість палива, виражається у відсотках від узятій навіски.

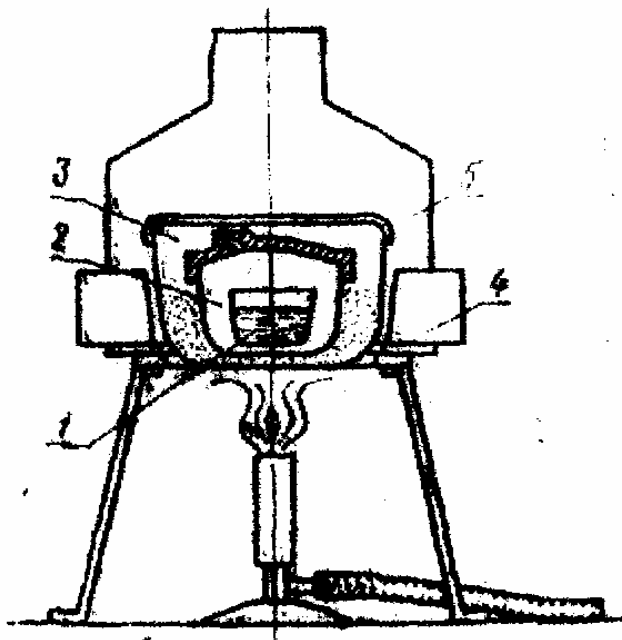


Рис. 1.35. Схема прибору для визначення коксуємості нафтопродуктів

Стандарт на дизельне паливо допускає коксуємість не більше 0,05%. Але, оскільки це значення мале, визначається коксуємість 10% залишку, отриманого після відкачування з колби при фракційній розгінці 90% залитого в неї палива. В цьому випадку коксуємість 10% залишку допускається не більше 0,4 – 0,5%.

В процесі роботи двигуна на його деталях відкладаються не тільки нагар, а ще й лакоподібні елементи, котрі також являються продуктами високотемпературного окислення непередільних вуглеводнів та інших з'єднань.

Для оцінки схильності палива до лакоутворення розроблені методика та спеціальний пристрій. Щоб визначити схильність палива до шлакоутворення 1 мл палива наливають у алюмінієву чашку та підвергають випарюванню у термостаті-лакоутворювачі при температурі 250 °С. Коли закінчується випаровування палива, в чашці залишить лакова плівка. Після охолодження чашку важать і таким чином встановлюють масу утвореного лаку. Результат перераховують на 10 мл палива. Чим легше паливо за фракційним складом, тим менше утворюється лаку.

В діючі стандарти на дизельне паливо показник коксуємості не входить, і оцінку палива за нагароутворюючим властивостям можна робити за *отриманням смол*. Для літніх сортів палива воно не повинно бути більше 60, а для зимових – не більш 40 мг/100 мл палива.

До лако- та нагароутворення схильні непередільні вуглеводні палива, з збільшенням вмісту яких ці процеси інтенсифікуються. Вміст непередільних вуглеводнів можна оцінювати за *йодним числом*, яке представляє собою кількість йоду (г), яке вступило в реакцію зі 100 г палива. В дизельних паливах йодне число не повинно бути більше 6 г/100 г палива.

Зольність характеризує мінеральний залишок після спалювання палива у атмосфері повітря при температурі 800...850 °С. Зольність палива визначають у фарфоровому тиглі, котрий зважують до і після озолення палива. Залишок золи в тиглі виражають у відсотковому відношенні до навіски палива. Зольність дизельних палив не повинна перевищувати 0,01–0,02%. Із збіль-

шенням зольності палива значно зростає знос елементів системи живлення та деталей циліндро-поршневої групи двигуна.

Сірчані сполучення палива створюють більший вплив на утворення нагару і головним чином на його стан. Сірка, концентрується у нагарах та відкладеннях, робить їх більш твердими та важко знищувальними. Так, випробуваннями встановлено, що якщо при вмісті в паливі сірки 0,08%, в нагарах її містився 1%, а щільність відкладень складала 0,03 г/см³, то при підвищенні вмісту сірки в паливі до 1,5% в нагарах її вже було 9%, а щільність відкладень досягла 0,5 г/см³. При підвищенні вмісту сірки в паливі, окрім корозійного характеру, підвищуються знос деталей, щільність відкладень та утворення нагару.

Корозійні властивості палива, як вже відмічалось, визначаються в основному такими факторами, як утримання в паливі водорозчинних кислот та луг, органічних кислот, води та сірчанних сполучень. У відповідності з ГОСТом у дизельному паливі не допускається наявності *водорозчинних кислот* та луг, а також води, оскільки вони сильно впливають на корозію деталей двигуна.

Органічні кислоти, при їх наявності в паливі, теж створюють корозійну дію. Проведеними випробуваннями двох дизельних палив (з кислотністю 4 та 50 мг КОН/100 мл) на двохтактному дизельному двигуні за 560 ч роботи встановлено, що при використанні палива з підвищеною кислотністю продуктивність форсунок знизилась у 7 разів, знос плунжерних пар та першого компресійного кільця підвищилась більш ніж у 2 рази. За технічними умовам кислотність дизельних палив не повинна перевищувати 5 мг КОН/100 мл.

Вирішальний вплив на корозійну агресивність дизельних палив має вплив і характер сірчистих сполук. Корозійна агресивність дизельних палив підвищується зі збільшенням загального вмісту сірки. У даний час нафтопродукти одержують в основному з сірчистих нафт, так як запаси малосірчистих нафт обмежені. В результаті їх перегонки отримують газойлеві і соляріві дистилятори з вмістом сірки до 1,0...1,3%. Сірки з дисти-

ляторів видаляються за допомогою різних способів очистки, які дозволяють знизити її вміст до 0,2...0,5%.

Активних сірчистих сполук (сірководню, елементної і меркаптанової сірки) при випуску палива із заводу повинно бути так мало, щоб корозійні випробування, тобто пробу на мідну пластинку, воно витримувало.

Корозійні властивості дизельних палив обумовлені не стільки загальним вмістом сірки в паливі, скільки вмістом меркаптанів. Спрацювання плунжерних пар при роботі на паливі з вмістом 0,025% меркаптанової сірки (рис.1.36) збільшується у два рази у порівнянні з спрацюванням на паливі без меркаптанів. Тому вміст меркаптанової сірки в паливі повинен бути не більше 0,01%.

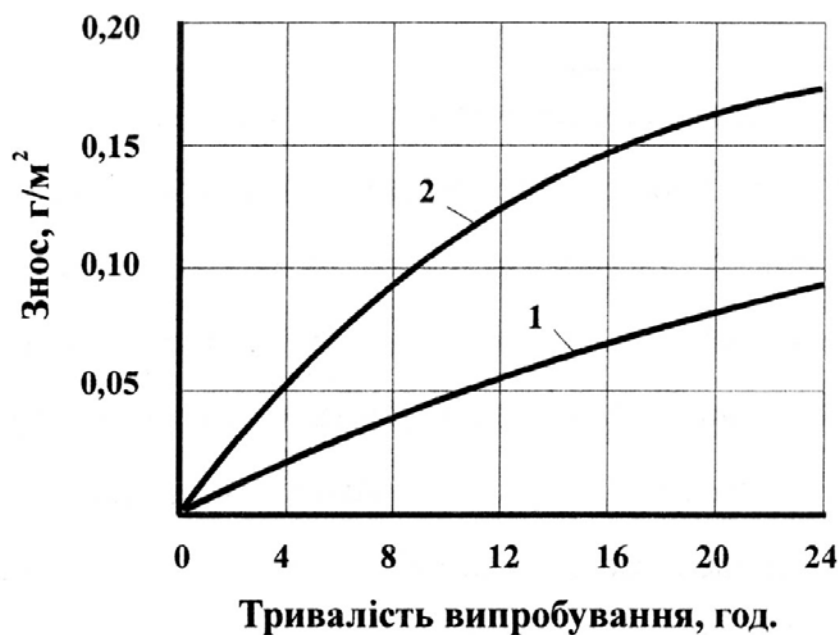


Рис. 1.36. Залежність спрацювання плунжерних пар від вмісту меркаптанової сірки:
1 – відсутня; 2 – 0,025 %

Загальна кількість сірки, яка міститься в дизельному паливі, суттєво впливає на працездатність дизельного двигуна. Узагальнюючи експериментальні дослідження, можна стверджувати, що при зростанні вмісту сірки з 0,2 до 0,5% знос становить 15%, а

при використанні сірчистих палив із вмістом сірки до 1,0% знос прискорюється майже в два рази. На рисунку 1.37 показано вплив сірки на інтенсивність зносу поршневих кілець.

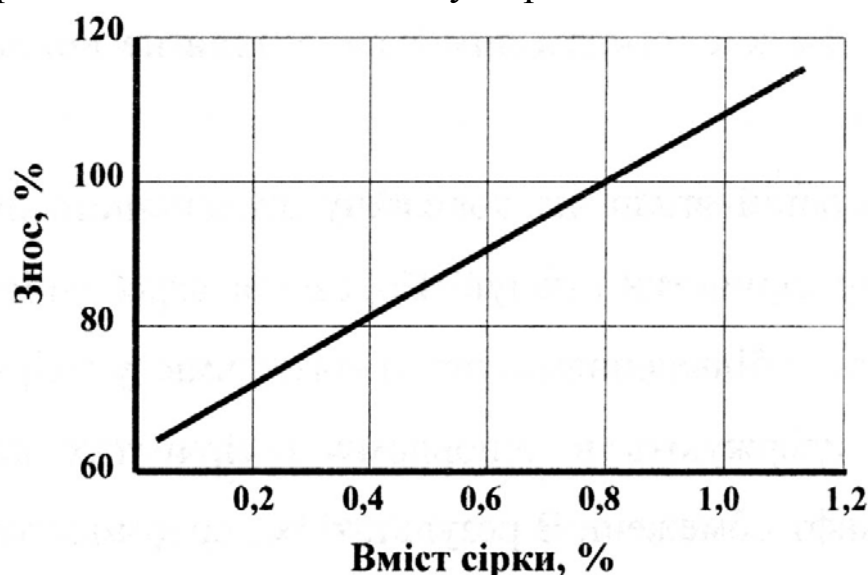


Рис.1.37. Вплив вмісту сірки в паливі на спрацювання поршневих кілець

4.6. Асортимент палив для дизельних двигунів та область їх застосування

Дизельне паливо – це продукт перегонки нафти, гідроочищення та депарафінізації. Для збільшення обсягів виготовлення палива в нього можуть додавати компоненти каталітичного крекінга.

Відповідно до ГОСТ 305–82 для швидкохідних дизельних двигунів випускають три марки дизельних палив залежно від сезонності або географічних областей використання: Л – літнє, для експлуатації двигунів при температурі навколишнього повітря $+10^{\circ}\text{C}$ і вище; З – зимове, для експлуатації двигунів при температурі навколишнього повітря: -20°C і вище (з температурою застигання -35°C); -30°C і вище (з температурою застигання -45°C); А – арктичне, для експлуатації при температурі навколишнього повітря -50°C і вище (табл. 1.16).

Крім того, для кожної марки окремо обумовлена кліматична зона – помірна або холодна, а також види палива. За вмістом сірки дизельні палива поділяють на два види: І – масова частка сірки не більше 0,5% (для марки А – не більше 0,4%).

В умовне позначення палива марки Л входять масова частка сірки і температура спалаху, З – масова частка сірки і температура застигання, А – масова частка сірки. Наприклад позначення: паливо дизельне Л – 0,5-40 ГОСТ 305-82; паливо дизельне З-0,2 мінус 45 ГОСТ 305 – 82; паливо дизельне А – 0,2 ГОСТ 305 – 82.

Паливо Л використовують влітку в помірній і холодній кліматичних зонах за умови, що температура навколишнього повітря не знижується нижче 0⁰С.

Паливо З призначене для двох кліматичних зон: для помірної з температурою повітря не нижче мінус 20⁰С (температура застигання не вище мінус 35⁰С) і для холодної – з температурою повітря не нижче мінус 30 ⁰С (температура застигання не вище мінус 45⁰С).

Паливо А застосовують при температурі навколишнього середовища мінус 50⁰С і вище (температура застигання не вище мінус 55⁰С). Температура помутніння для нього не нормується, тому, що це паливо піддається глибокій депарафінізації.

Для використання в літній період (при температурі навколишнього повітря не нижче 5⁰С) виробляють паливо обваженого фракційного складу (ТУ 38 001355 – 85). На відміну від стандартного літнього палива у нього більш висока (на 20...30⁰С) температура кінця кипіння. При цьому до +360⁰С переганяється не менше 90% замість 96%. В наслідок цього його температура викіпання 50% на 10⁰С вище (табл. 1.17)

Таблиця 1.16

Основні показники дизельного палива для швидкохідних
дизельних двигунів

Показник	Л	З	А
Цетанове число (не менше)	45	45	45
Фракційний склад, температура (не вище), °С:			
- викіпання 50% палива	280	280	280
- викіпання 96% палива	360	340	380
Кінематична в'язкість при 20 °С, мм ² /с	3...6	1,8...5	1,5...4
Температура помутніння (не вище), °С, для кліматичної зони:			
- помірної	-5	-25	-
- холодної	-	-35	-
Температура застигання (не вище), °С, для кліматичної зони:			
- помірної	-10	-35	-
- холодної	-	-45	-55
Температура спалаху (не нижче), °С	40	35	30
Вміст сірки (не більше), %:			
- у паливі виду І	0,2	0,2	0,2
- та у паливі виду ІІ	0,5	0,5	0,4
Випробування на мідній пластині	Витримує		
Утримання фактичних смол (не більше), мг/100см ³	40	30	30
Кислотність (не більше), мг КОН/100 см ³	5	5	5
Зольність (не більше), %	0,01	0,01	0,01
Коксуємість 10% залишку (не більше), %	0,3	0,3	0,3
Коефіцієнт фільтрує мості (не більше)	3	3	3
Вміст води та механічних домішок	Відсутній		
Густина при 20 °С, кН/м ³ , не вище	0,86	0,84	0,83

Таблиця 1.17

Характеристика дизельного палива обваженого фракційного складу (ОФС)

Показник	Норма
Цетанове число, не менше	45
Фракційний склад:	
$t_{50\%}$, °C, не вище	290
до 360 °C переганяється, % не менше	90
В'язкість кінематична при 20 °C, мм ² /с	3,0...6,5
Температура, °C, не вище:	
застигання	0
помутніння	5
Температура спалаху в закритому тиглі, °C, не нижче:	
для дизелів загального призначення	40
для тепловозних і суднових дизелів	61
Вміст сірки, %, не більше, у паливі:	
виду I	0,2
виду II	0,5
Вміст меркаптанової сірки, %, не більше	0,01
Випробування на мідній пластинці	Витримує
Кислотність, г КОН/100 см ³ , не більше	5
Йодне число, г J ₂ /100 г, не вище	6
Зольність, % не більше	0,01
Коксівність 10% залишку, %, не більше	0,3
Коефіцієнт фільтрівності, не більше	3
Густина при 20 °C, кН/м ³ , не вище	0,86

Паливо не повинно містити сірководень, водорозчинні кислоти і луги, механічні домішки, воду. За фракційним складом і основними фізико-технічними показниками це паливо наближається до палив, які виробляються за кордоном.

Результати експлуатаційних випробувань роботи двигунів на паливі ОФС показали, що на 2...4% збільшується питома витрата і на 4...5% годинна витрата палива, що потребує перерегу-

лювання паливної апаратури. Крім того, в цих двигунах більш інтенсивно спрацьовуються присадки моторного масла.

Дизельне паливо експортне (ТУ 38001162–85) виготовляють для поставок на експорт з вмістом сірки до 0,02%, для чого дизельні фракції прямої перегонки піддають гідроочищенню. Для оцінки його якості, за вимогою споживачів, визначають дизельний індекс, а не цетанове число. Крім того, замість визначення вмісту води і коефіцієнта фільтрівності експрес-методом визначають прозорість палива при температурі 10⁰С. Промисловість випускає дизельне паливо експортне марок ДЛЕ і ДЗЕ.

Для середньо – і тихохідних дизельних двигунів, з частотою обертання колінчастих валів до 1000 хв⁻¹ (ГОСТ 1617–68) виробляють паливо марок ДТ і ДТ* та ДМ* вищої якості. Вони відрізняються в'язкістю, коксованістю і температурою застигання. Паливо цих марок – суміш дистиляторів з залишковими продуктами (мазут) прямої перегонки або крекінгу. Двигуни, в яких використовують таке паливо, експлуатують в основному на стаціонарних і напівстаціонарних установках. Коротка характеристика палива наведена в таблиці 1.18.

Паливо ДТ призначено для дизелів необладнаних системою підготовки палива, а паливо ДМ (мазут) – для судових тихохідних дизелів, обладнаних системою попередньої підготовки палива (нагрівання до температури 60...70 ⁰С, відстоювання фільтрування).

Газові конденсати (рідкі вуглеводні, що конденсуються при нормальних умовах із природним газом, які знаходяться в підземних шарах під тиском 4,9...9,8 МПа і температурі до 150⁰С), розглядаються як додаткове джерело сировини для одержання палив для автотракторних двигунів.

Аналіз газових конденсатних родовищ, що розглядаються, які в основному складаються з нафтових і парафінових вуглеводнів, дозволяє розділити їх за складом на дві групи (рис. 1.38): важкі газові конденсати відносно вузького і легкі більш широкого фракційного складу.

Палива для дизельних двигунів

Конденсати першої групи за основними властивостями незначно відрізняються від стандартних арктичних і зимових дизельних палив, а конденсати другої групи мають менші значення густини, в'язкості, температур спалаху і застигання, ніж стандартні дизельні палива.

З 1 січня 1981 р. введено в дію ТУ 51-28-81 “Паливо газоконденсатне широкофракційне для швидкохідних дизелів”, яке поширюється на паливо газоконденсатне (ГКП) широкофракційне зимове північне, одержане прямою перегонкою газового конденсату Уренгойського родовища, а також компонуванням фракції газового конденсату з товарним дизельним паливом. ГКП токсично і вибухонебезпечне, що потребує дотримання встановлених вимог безпеки.

Таблиця 1.18

Коротка характеристика палив для середньо- і тихохідних
дизельних двигунів

Показник	ДТ*	ДТ	ДМ*
Густина при 20 °С, кН/м ³ , не більше	0,930	0,930	0,970
Фракційний склад: до 250 °С перегонки, %, не більше	15	15	10
В'язкість при 50 °С:			
кінематична, мм ² /с, не більше	20	36	130
умовна, °ВУ, не більше	2,95	5	17,4
Зольність, %, не більше	0,02	0,04	0,06
Масова частка сірки, %, не більше:			
у мало сірчистому паливі	0,5	0,5	-
у сірчистому паливі	1,5	1,5	2,0
Вміст водорозчинних кислот і лугів		Відсутність	
Масова частка сірки, %, не більше:			
механічних домішок	0,05	0,05	0,1
води	0,1	0,5	0,5
Температура спалаху в закритому тиглі, °С, не нижче	70	65	85
Температура застигання, °С, не вище	-5	-5	10