

УДК 621.43.013.9

**ВИЗНАЧЕННЯ ТРИВАЛОСТІ ЗГОРЯННЯ
У ДВИГУНІ З БЕЗПОСЕРЕДНІМ
УПОРСКУВАННЯМ І РОЗШАРУВАННЯМ
ПАЛИВО-ПОВІТРЯНОГО ЗАРЯДУ**

В.А.Корогодський, кандидат технічних наук, доцент

О.В.Василенко, аспірант

Українська державна академія залізничного транспорту

Розглянуто показники процесу згоряння двотактного двигуна із іскровим запалюванням при безпосередньому вприскуванні палива та плівковому сумішоутворенні.

Постановка проблеми й напрямок її вирішення.

Шкідливі речовини (ШР) у відпрацьованих газах (ВГ) двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) забруднюють атмосферний простір, погіршують екологічну ситуацію в Україні. Тому, нормативні вимоги до зниження ШР у ВГ ДВЗ стають більш жорсткими [5].

Перспективним напрямком зниження ШР у ВГ двигунів з іскровим запалюванням (ІЗ) є застосування безпосереднього вприскування палива (БВП) з розшаруванням паливо-повітряного заряду (ППЗ), що найбільш доцільно впроваджувати для двотактних двигунів. Ефективна організація процесів сумішоутворення й згоряння розшарованого ППЗ вимагає збагаченого, легкозаймистого складу паливоповітряної суміші (ППС) між електродами свічі запалювання й інтенсивного, повного згоряння палива до моменту відкриття випускних деталей газорозподілу.

Аналіз останніх досліджень. Експериментальні дослідження двотактного двигуна ДН-4М (S/D=87/82) з повітряним охолодженням, ІЗ при БВП і кривошипно-камерною продувкою на часткових навантаженнях при $n=3000$ хв⁻¹ по-

казали значне зниження витрат палива на 45% і викидів ШР із ВГ на 70-90% [2]. Підвищення економічності отримано за рахунок виключення втрат палива при продувці (на 30-35%) та організації ефективного розшарування заряду (на 10-15%). У результаті досліджень встановлено, що максимальний сумарний коефіцієнт надлишку повітря $\alpha_{\Sigma \max} = 2,05$, а з урахуванням проведеного аналізу ВГ $\alpha_{\text{ц}}$ в циліндрі двигуна склав 1,65. Експериментальні дані підтверджують факт розподілу ППЗ шарами, тому що границі займистості суміші у двигунах з ІЗ перебувають в інтервалі $\alpha = 0,4 - 1,2$. Підвищення коефіцієнта надлишку повітря α сприяло повному згорянню палива й зниженню викидів ШР із ВГ. На режимах з максимальним навантаженням і гомогенним складом ППС ($\alpha_{\text{ц}} = 1,0$) підвищення економічності (на 30-35%) отримано тільки за рахунок виключення втрат палива під час продувки.

Актуальність подальших досліджень. Одним з основних параметрів, що визначають ефективність протікання процесу згоряння, є його тривалість. Відомо, що момент закінчення процесу згоряння повинен передувати моменту відкриття випускних органів газорозподілу, що дозволяє судити про те, де закінчується згоряння – у циліндрі або у випускній системі, що впливає на вміст ШР у ВГ. Тому визначення тривалості й моменту закінчення згоряння дозволить уточнити характер протікання процесу згоряння розшарованого й гомогенного ППЗ у двигуні з ІЗ і БВП, що визначає актуальність представлених досліджень.

Мета статті. Оцінити тривалість і момент закінчення процесу згоряння залежно від навантаження при розшарованому й гомогенному складі ППС, використовуючи БВП і плівкове сумішоутворення у двигуні з ІЗ.

Вибір режимів роботи двигуна для досліджень. Показники процесу згоряння доцільно визначати на індикаторних діаграмах при роботі двигуна в зоні основних експлуатаційних режимів роботи. Експериментальні дослідження двотактного двигуна ДН-4М с ІЗ і БВП проводилися за навантажувальною

характеристикою при $n=3000$ хв⁻¹ і постійному куті випередження запалювання $\theta_{\text{зж}}=10^0$ п.к.в. до ВМТ.

Обрані режими досліджень:

1. При максимальному навантаженні ($P_e=0,47$ МПа й $n=3000$ хв⁻¹), коли ППС має гомогенний склад з коефіцієнтом надлишку повітря в циліндрі $\alpha_{\text{ц}}=1,0$, двигун забезпечує максимальну потужність із мінімальними викидами ШР у ВГ.

2. На режимі часткового навантаження ($P_e=0,29$ МПа), при якому двигун працює з максимальним значенням $\alpha_{\text{ц}}=1,65$ і розшаруванням ППЗ. На цьому режимі повітряна заслінка повністю відкрита, а циклова подача палива забезпечує максимальне значення крутного моменту при постійній частоті обертання колінчастого вала $n=3000$ хв⁻¹, що дозволило встановити мінімальне значення питомої ефективної витрати палива $g_e=0,264$ кг/квт·ч.

3. При постійній частоті обертання колінчастого вала $n=3000$ хв⁻¹ і частковому навантаженні $P_e=0,21$ МПа двигун працював із прикритою повітряною заслінкою й розшаруванням ППЗ ($\alpha_{\text{ц}}=1,6$).

Методи визначення показників процесу згоряння. Для визначення тривалості й моменту закінчення процесу згоряння використано класичну методику, розроблену професором І.І.Віббе [1]. У розрахунках прийнято, що кількість згорілого палива становить 99%.

Основне рівняння вигорання палива за кутом поворота колінчастого вала

$$x = 1 - e^{c \left(\frac{\Phi}{\Phi_z} \right)^{m+1}}, \quad (1)$$

де m – показник характеру згоряння; Φ – умовна тривалість процесу згоряння; Φ_z – тривалість процесу згоряння; $c=-6,908$ при $x=0,99$.

Після перетворень рівняння (1) має такий вигляд

$$\lg \varphi = \frac{1}{m+1} \{ \lg [- 2.303 \lg (1-x)] - \lg (-C) \} + \lg \varphi_z, \quad (2)$$

де $\frac{1}{m+1} = \text{tg} \beta$ - кутовий коефіцієнт; $\lg \varphi_z$ - відрізок, що відтинає пряму лінію на осі ординат; $Y = \lg \varphi$; і $X = \{ \lg [- 2.303 \lg (1-x)] - \lg (-C) \}$ - координати точок на прямій лінії.

Отримане рівняння (2) описує пряму лінію, яке можна представити у вигляді

$$Y = Y_z + X/(m+1), \quad (3)$$

звідки $m = Y_z/X_z - 1$.

Показник характеру згоряння m залежить від розташування максимуму швидкості тепловиділення й характеризує її інтенсивність.

Для дослідження показників процесу згоряння на кожному обраному режимі використовувалося 100 індикаторних діаграм, за якими визначалася осереднена індикаторна діаграма. Використовуючи осереднені індикаторні діаграми (рис. 1), побудовано криві тепловиділення $x_1 = f(\varphi)$. Відносні втрати теплоти від робочого тіла в стінки надпоршневої порожнини $\delta_{\text{ті}}$ визначено з використанням залежності коефіцієнта тепловіддачі від параметрів робочого процесу й конструкції двигуна [4]. Також визначено характеристики вигорання палива $x = f(\varphi) = x_1 + \delta_{\text{ті}}$ (рис. 2). За отриманими характеристиками і за допомогою рівняння вигорання палива (2) побудовано логарифмічні анаморфози. По отриманим точкам в координатах X Y будується пряма, що відтинає ділянки на осі ординат й абсцис (рис. 3). Використовуючи апроксимацію даних по отриманим відрізкам А и В, знайдено тривалість згоряння $\varphi_z = 10^A$.

За результатами досліджень визначено залежності показників процесу згоряння двигуна ДН-4М з іскровим запалюван-

ням при БВП ($\varphi_z = (P_e + 0,5253)/0,0144$ й $\varphi_{к.с.} = (P_e + 2,9714)/0,0144$) залежно від навантажень ($P_e = 0,47; 0,29; 0,21$ МПа) при частоті обертання колінчастого вала $n = 3000$ хв⁻¹. Отримані результати наведено в таблиці і на рис. 5.

Методика визначення показників процесу згоряння, розроблена проф. І.І. Віббе, широко використовується дослідниками протягом більш ніж 70 років, і показала задовільну погодженість з експериментальними даними. Похибка визначення показників процесу згоряння прямо залежить від точності обробки індикаторних діаграм і напівемпіричних залежностей.

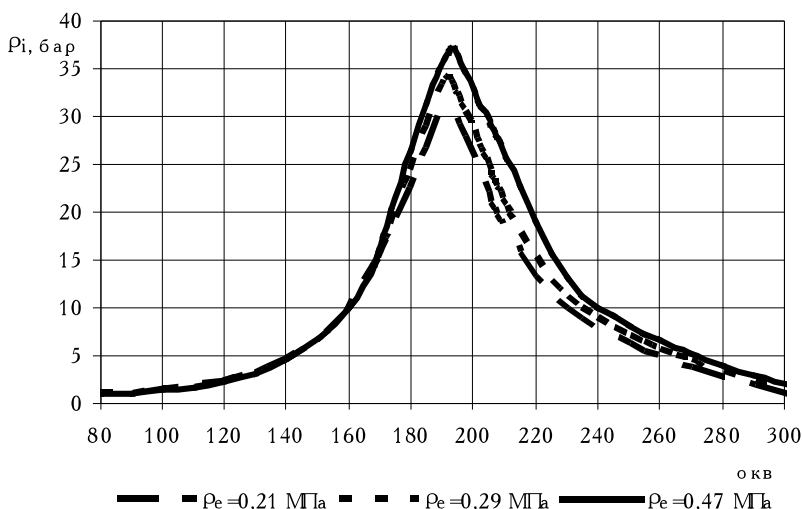


Рис. 1. Осереднені індикаторні діаграми двигуна ДН-4М

Заслуговує на увагу робота М.Г. Сандомірського, В.Г. Дяченко, Г.П. Мироненко [3]. Запропонована методика дозволяє визначити дійсний момент закінчення згоряння з урахуванням 99% вигорання палива. Визначення показників процесу згоряння проводиться на підставі даних осереднених індикаторних діаграм за фактичним показником політропи розширення n_ϕ .

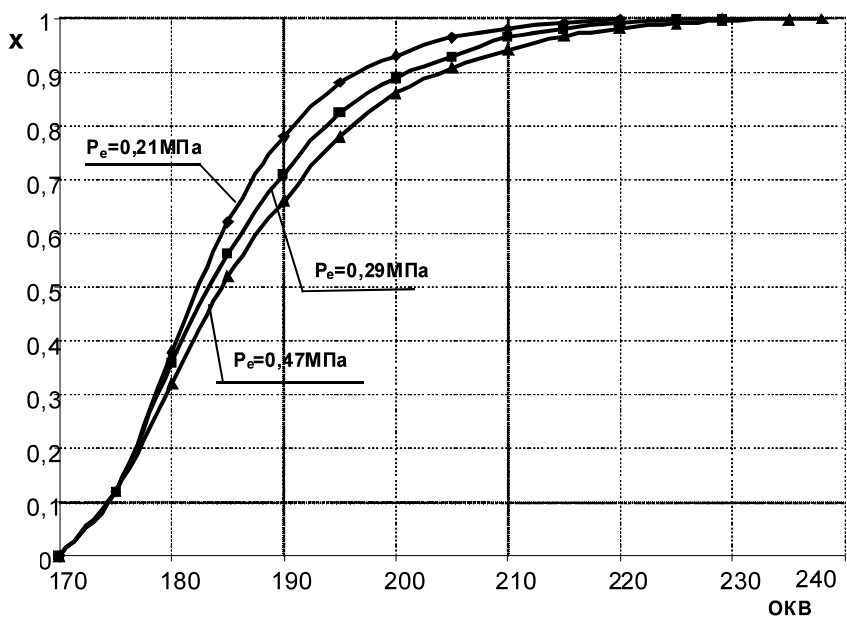


Рис. 2. Характеристики вигорання палива у двигуні ДН-4М

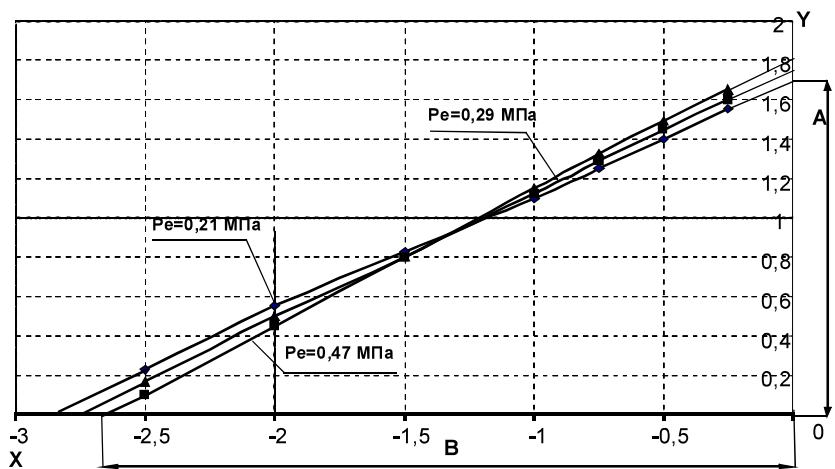


Рис. 3. Логарифмічні анаморфози

Показник політропи n_ϕ ураховує теплові втрати й теплоподвід при протіканні процесу згоряння

$$n_\phi = \frac{\lg P_\phi - \lg P_{\phi-\Delta\phi}}{\lg V_{\phi-\Delta\phi} - \lg V_\phi}, \quad (4)$$

де P , V – тиск та об'єм газу; ϕ – кут повороту колінчастого вала.

За розрахованим значенням n_ϕ побудовано графік залежності $n_\phi=f(\phi)$ (рис. 4, 5). Для того, щоб визначити закінчення згоряння, достатньо продовжити вліво горизонтальну ділянку графіка залежності $n_\phi=f(\phi)$.

На рис. 4 побудовано адіабати для кожного досліджуваного режиму. Значення адіабат k ураховують коефіцієнт надлишку повітря α при згорянні й температуру газів наприкінці згоряння. При побудові адіабати k перетинаються із графіками залежностей n_ϕ ($n_\phi=k$) раніше, ніж настає дійсний момент закінчення згоряння, що відповідає результатам досліджень, наведених в роботі [2]. Теоретичний момент закінчення згоряння настає раніше, ніж дійсний на 13-140 ОКВ. Місце, де крива графіка залежності $n_\phi=f(\phi)$ відхилиться від горизонталі, є моментом закінчення процесу згоряння. За результатами досліджень фактичного показника політропи розширення n_ϕ визначено залежності тривалості процесу згоряння ($\phi_z=(Pe+0,5684)/0,0144$) і моменту закінчення процесу згоряння ($\phi_{к.с.}=(Pe+3,0146)/0,0144$) залежно від навантаження й $n=3000$ хв⁻¹. Значення показників згоряння для обраних режимів роботи двигуна ($Pe=0,47$; $0,29$; $0,21$ МПа) наведено в таблиці і на рис 5.

За результатами досліджень фактичного показника політропи розширення n_ϕ визначені залежності тривалості процесу згоряння ($\phi_z=(Pe+0,5684)/0,0144$) і моменту закінчення процесу згоряння ($\phi_{к.с.}=(Pe+3,0146)/0,0144$) залежно від навантаження й $n=3000$ хв⁻¹. Значення показників згоряння для обраних режимів роботи двигуна ($Pe=0,47$; $0,29$; $0,21$ МПа) наведені в таблиці і на рис. 5.

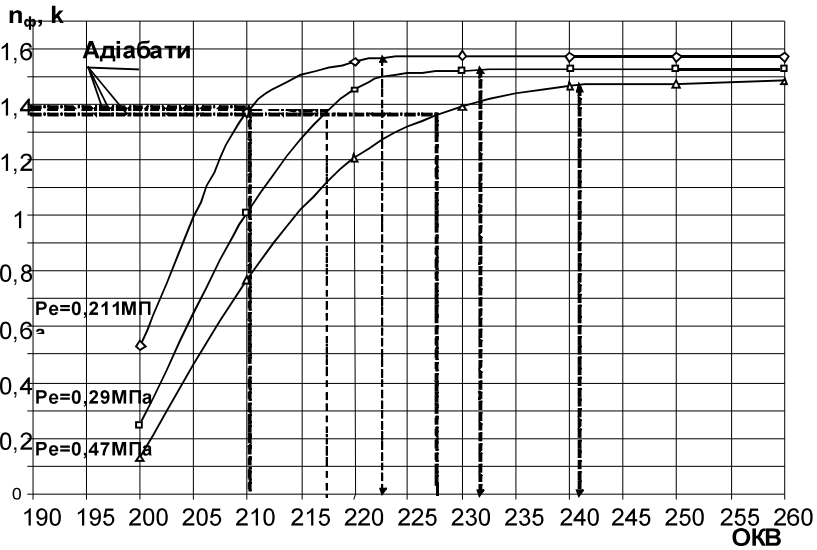


Рис. 4. Визначення закінчення процесу згоряння при $n_\phi = k$ й $n_\phi = \text{const}$

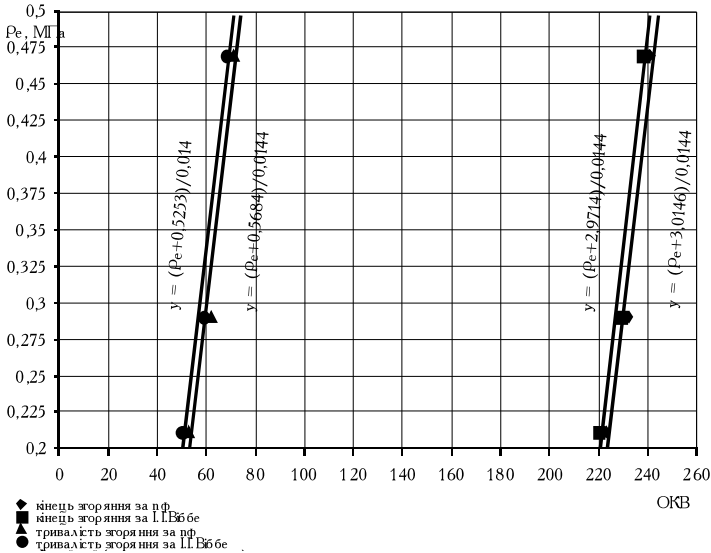


Рис. 5. Визначення показників процесу згоряння двигуна ДН-4М з іскровим запалюванням і безпосереднім вприскуванням палива

Таблиця

Показники процесу згоряння, отримані за методикою проф. І.І. Віббе і за фактичним показником політропи розширення n_ϕ

Показники процесу згоряння	Середній ефективний тиск P_e , МПа					
	0,21		0,29		0,47	
	за методом І.І.Віббе	n_ϕ	за методом І.І.Віббе	n_ϕ	за методом І.І.Віббе	n_ϕ
Тривалість процесу згоряння (від $\theta_{\text{заж}}$ до $\phi_{\text{кс}}$) ϕ_z , град. п. к. в.	50	53	59	62	68	71
Закінчення процесу згоряння $\phi_{\text{к.с.}}$, град.п.к.в. після ВМТ	220	223	229	232	238	241
Показник характеру згоряння m	1,5	–	1,5	–	1,5	–

Методика визначення тривалості згоряння за фактичним показником політропи розширення n_ϕ погоджується з методикою проф. І.І. Віббе, результати розрахунків за методиками відрізняються в середньому на 5%.

Похибка визначення тривалості процесу згоряння за фактичним показником політропи розширення n_ϕ залежить від точності обробки індикаторних діаграм на ділянці горіння-розширення.

Визначення тривалості згоряння за n_ϕ містить менше етапів, коефіцієнтів і складових для розрахунків, що підвищує точність визначення дійсних значень. Але методика проф. І.І. Віббе більш докладно розглядає процеси тепловиділення, інтенсивності протікання процесу згоряння. Показник характеру згоряння m дозволяє визначити вплив на протікання процесу тепловиділення таких параметрів, як коефіцієнт надлишку повітря, ступінь розшарування ППЗ, вміст кількості

залишкових газів, інтенсивність руху заряду в циліндрі тощо залежно від навантажувальних і швидкісних режимів роботи двигуна.

При визначенні показника характеру згоряння m у двигуні ДН-4М з БВП встановлено, що значення $m=1,5$ нижче, ніж у двигунів з іскровим запалюванням і зовнішнім сумішоутворенням.

Висновки:

1. Тривалість протікання процесу згоряння у двигуні ДН-4М з іскровим запалюванням при БВП і використанні плівкового сумішоутворення з підвищенням навантаження зростає, що пояснюється збільшенням циклової подачі палива й обсягу ППС при згорянні розшарованого заряду. За навантажувальною характеристикою при $n=3000$ хв⁻¹ і $Pe=0,21; 0,29; 0,47$ МПа тривалість згоряння, визначена за фактичним показником політропи розширення n_ϕ відповідно становить 53, 62, 71 град. ОКВ.

2. Процес згоряння при максимальному навантаженні ($\phi_{к.с.}=241$ град. ОКВ) закінчується до моменту відкриття випускних органів газорозподілу ($\phi_{вып}=258$ град. ОКВ). Отже, догорання палива у випускній системі відсутнє, що визначає знижений вміст ШР у ВГ і погоджується з експериментальними даними.

3. При визначенні характеристик вигорання палива встановлено, що інтенсивність вигорання розшарованого заряду вище, ніж при гомогенному складі ППС. Тому можна припустити, що склад ППС розшарованого заряду перебуває в діапазоні $\alpha=0,8-0,9$, що відповідає максимальній швидкості поширення фронту полум'я. При цьому не можна не враховувати характер протікання процесу згоряння, при якому в зоні згоряння відбувається інтенсивне підведення надлишкового повітря й видалення із зони горіння продуктів згоряння.

4. Запропоновано залежності для визначення тривалості й моменту закінчення процесу згоряння за фактичним показником політропи розширення n_ϕ і за методом проф. І.І. Віб-

бе залежно від навантаження на режимах навантажувальної характеристики при $n=3000$ хв⁻¹. Найбільш точні показники процесу згоряння визначено за залежностями, складеними на підставі фактичної політропи розширення n_ϕ .

5. Показник характеру згоряння для двигуна ДН-4М з іскровим запалюванням при БВП і плівковому сумішоутворенні становить $m=1,5$.

6. Для визначення тривалості ϕ_z і моменту закінчення згоряння $\phi_{к.с.}$ доцільно застосовувати залежності, отримані за показником політропи розширення n_ϕ , а для визначення інтенсивності тепловиділення (показника характеру згоряння m) – використовувати залежності, отримані за методом проф. І.І. Віббе.

ЛІТЕРАТУРА

1. И.И. Виббе. Новое о рабочем цикле двитателя. – М.: МАШГИЗ, 1962. – 170 с.
2. Корогодский В.А., Обозный С.В. Организация пленочного смесеобразования и определение степени расслоения заряда в двухтактном двигателе с искровым зажиганием и непосредственным впрыскиванием топлива // Двигатели внутреннего сгорания. – 2003. – №1-2. – С 41-48.
3. М.Г. Сандомирский, В.Г. Дьяченко, Г.П. Мироненко. Метод определения конца сгорания в дизелях // Сб. научн. тр. "Двигатели внутреннего сгорания". – Харьков: ХПИ, 1968. – Вып. 7. – С 13-21.
4. Методические указания к лабораторной работе "Обработка индикаторной диаграммы двигателя внутреннего сгорания" для студ. спец. 7.090510 "Теплоэнергетика" всех форм обучения //Симсон А.Э., Круshedольский А.Г., Ефимова Л.П., Ковалеко Н.М. – Харьков: ХИИТ, 1992. – 26 с.
5. Редзюк А.М., Гутаревич Ю.Ф. Нормування екологічних показників ДТЗ: розвиток, стан, перспективи // Автошляховик України. – 2001. – №4. – С.2-9.