

УДК 623.438.3

О.В. Серпухов<sup>1</sup>, Д.В. Бізонич<sup>1</sup>, І.В. Цебрюк<sup>2</sup>, К.В. Коритченко<sup>1</sup>, В.О. Темніков<sup>2</sup><sup>1</sup> Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків<sup>2</sup> Національна академія Національної гвардії України, Харків

## ВИМОГИ ДО СВІЧКИ ЗАПАЛЮВАННЯ, ЩО ЗАСТОСОВУЄТЬСЯ ДЛЯ ПРИМУСОВОГО ЗАПАЛЮВАННЯ ПАЛИВНО-ПОВІТРЯНОЇ СУМІШІ В ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНАХ НА РЕЖИМІ ХОЛОДНОГО ПУСКУ

В роботі здійснено аналіз термомеханічних навантажень, які виникають у циліндрах потужних дизельних двигунів. Сформовані вимоги до свічок запалювання, у разі їх застосування для примусового запалювання паливно-повітряної суміші в потужних дизельних двигунах на режимі холодного пуску. Обґрунтовано застосування свічок запалювання з поверхневим розрядом.

**Ключові слова:** дизельний двигун, свічка запалювання, холодний пуск, примусове запалювання.

### Вступ

До сучасних систем, що вирішують проблему надійного прискореного пуску дизельних двигунів за низьких температур, відноситься системи на основі свічок розжарювання. Разом з тим, виробники даних свічок відмічають наявність обмеження у області ефективного застосування свічок, яка поширюється лише на малолітражні двигуни [1].

Як напрямок вирішення проблеми надійного холодного пуску багатолітражних дизельних двигунів вважається застосування системи високоенергетичного іскрового запалювання [2, 3]. Для створення такої системи потребують розроблення спеціальні свічки запалювання.

На теперішній час існують спеціальні свічки запалювання до газових двигунів. Але відмінності у призначенні формують особливі вимоги до свічок запалювання.

**Метою** даної роботи є обґрунтування фізико-механічних вимог, що висуваються до свічок запалювання, у разі їх застосування для примусового запалювання паливно-повітряної суміші в потужних дизельних двигунах на режимі холодного пуску.

### Виклад основного матеріалу

Фізико-механічні вимоги до свічок запалювання для дизельних двигунів

Застосування серійних іскрових свічок запалювання на дизельних двигунах недоцільне із-за наявності відмінностей у фізико-механічних навантажень на свічки, порівняно з бензиновими двигунами. Насамперед це значно збільшений тиск повітря, що досягається у верхній мертвій точці, порівняно з максимальним тиском у карбюраторних двигунах. Так максимальне значення тиску в карбюраторних двигунах складає 1,2 – 1,5 МПа, а

потужних форсованих дизельних двигунах 8 – 12 МПа. Для іскрового пробивання проміжку зі зростанням тиску потрібне збільшення пробивної напруги. Це висуває вимоги до збільшення стійкості до пробою діелектричного матеріалу свічки запалювання.

Таким чином, для вирішення завдання запалювання паливної суміші в дизельному двигуні, окрім застосування системи запалювання зі збільшеною енергією іскрового розряду та збільшеною напругою пробиття, потрібно розробити спеціальні свічки розжарювання.

Розглянемо умови, за яких досягається іскрове пробивання проміжку в циліндрах двигуна під час стиснення. Відомо [4], що за атмосферного тиску в повітрі в однорідному електричному полі напруженість поля, за якою відбувається пробиття іскрового проміжку, дорівнює близько 30 кВ/см. Зі змінною тиску відбувається зміна пробивної напруги, а залежність напруженості електричного поля від тиску в повітрі має вигляд [4]

$$\frac{E}{p} \approx 34 \text{ В/(см·тор)}, \quad (1)$$

де  $E$  – напруженість електричного поля;  $p$  – тиск у [тор]; 1 тор = 133,3 Па.

З виразу (1) випливає, що пробивна напруга за фіксованої довжини іскрового проміжку прямо пропорційна тиску. Тобто за тиску 5 МПа, що відповідає фазі початку вприскування палива в циліндр двигуна, та розрядного проміжку довжиною  $d=0,1$  см за виразом (1) маємо пробивну напругу, що дорівнює близько 127 кВ. За даними [4] визначено, що за тиском, що перевищує 1 МПа, зростання пробивної напруги відхиляється від лінійної залежності.

Так за графіком пробивної напруги (рис. 1) для розрядного проміжку довжиною  $d = 0,1$  см та

тиску  $p=5$  МПа маємо значення близько  $V = 80$  кВ. За рахунок створення неоднорідного електричного поля, що досягається, наприклад, застосуванням гострокінцевих розрядних електродів, відбувається зниження пробивної напруги на 5 – 10 %. Зменшення довжини розрядного проміжку призводить до погіршення надійності запалювання суміші іскровим розрядом, бо погіршуються умови потрапляння паливної суміші в проміжок та збільшується тепловідведення. Звідси маємо, що у разі використання звичайного іскрового розряду потребує використання система запалювання, яка утворює високовольтний імпульс, амплітудне значення якого перевищує  $V > 70$  кВ.

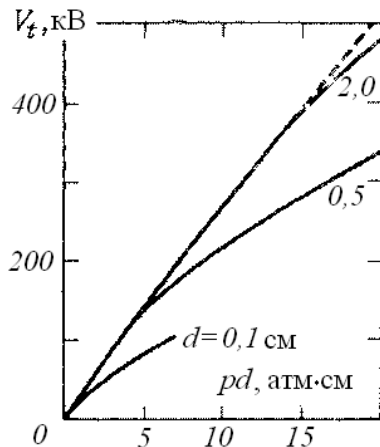


Рис. 1. Амплітуда пробивної напруги частоти 50 Гц у повітрі в однорідному полі залежно від  $pd$  та великих тисків [4]

Забруднення поверхні розрядних електродів призводить до збільшення значень пробивної напруги. А процес покриття електродів діелектричним шаром у вигляді окисів різноманітних матеріалів під час згорання в циліндрі двигуна є неминучим.

За значень напруги близько 100 кВ суттєво зростають вимоги до товщини ізоляційних матеріалів, щільності з'єднань тощо. Використання зазначеної напруги в жорстких умовах експлуатації, які виникають у дизелях, призведе до суттєвого зниження надійності таких систем і швидкого виходу їх із ладу. Окрім того, застосування масивних ізоляторів призводить до зростання габаритних розмірів свічок розжарювання.

Таким чином, потрібне вирішення питання зниження максимальних значень напруги в системі запалювання.

Зниження пробивної напруги відбувається в разі переходу з розряду через газовий проміжок до поверхневого розряду (розряд у газі вздовж поверхні твердого діелектрика). У цьому разі, за тих самих умов запалювання розряду, залежно від типу та стану поверхні діелектрика, можливе зниження

пробивної напруги в декілька разів. Наприклад, в авіаційній техніці застосовується електроерозійна свічка поверхневого розряду СПН-4-3, у якій на розрядному проміжку 0,8 – 1 мм за тиску 0,5 МПа виникає іскровий розряд за напруги, що не перевищує 2,5 кВ.

Для порівняння, пробивання газорозрядного проміжку повітрям за цих умов, залежно від форми електродів, виникає за напруги 8 – 12 кВ.

Тобто пробивна напруга в цьому разі знижується в 3 – 5 разів.

Слід додати, що в авіаційній техніці також використовують свічки розжарювання з поверхневим розрядом на основі напівпровідників.

Але жорсткі режими роботи (термічні та ударні навантаження), що виникають у дизельному двигуні, спроможні швидко вивести з ладу напівпровідникову структуру.

Також, поверхневий розряд використовують і в спеціальних автомобільних свічках розжарювання. Наприклад, фірма NGK має у своєму асортименті свічку запалювання з напівковзним поверхневим розрядом (рис. 2).

За умов забруднення поверхні ізолятора, розряд розвивається його поверхнею на один із бокових електродів.

Ураховуючи те, що властивості поверхневого розряду відповідають властивостям газових розрядів, то поверхневий розряд може розглядатися як джерело запалювання холодної дизельної повітряної суміші.

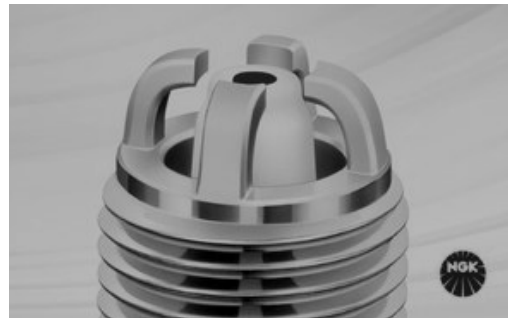


Рис. 2. Свічка запалювання фірми NGK із поверхневим розрядом

Вплив діелектрика на зниження пробивної напруги пов'язаний із формуванням більш неоднорідного електричного поля між електродами з відповідним локальним його збільшенням.

Фізика такого впливу базується на відмінності діелектричної проникності повітря та твердого діелектрика, що особливо проявляється за наявності мікрозазору між діелектриком і електродом або мікротріщини на поверхні діелектрика. На цих ділянках забезпечується розвиток іонізаційних процесів, продукти яких (іони, електрони), потрапляючи в основний проміжок, створюють місцеве по-

силення поля, що призводить до зменшення пробивної напруги.

Навіть за сухої та гладкої поверхні діелектрика розподіл напруженості електричного поля між електродами має вигляд (рис. 3). З рисунка видно, що відбувається посилення напруженості поля біля одного з електродів, що забезпечує зниження напруги пробиття.

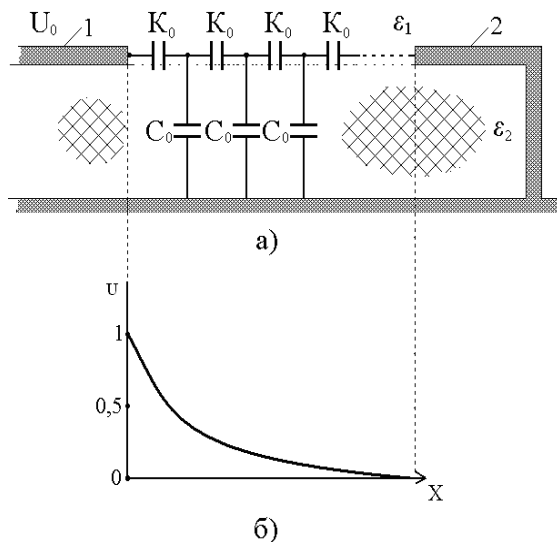


Рис. 3. Розподіл напруг поверхню ізолятора: а – схема заміщення у вигляді кола ємностей; б – розподіл напруги уздовж поверхні ізоляції

На відміну від класичних свічок запалювання, забруднення поверхні ізолятора у свічці поверхневого розряду буде сприяти зниженню напруги електричного пробоя. Отже, сажоутворення на поверхні діелектрика свічки під час роботи двигуна після завершення холодного пуску покривають умови для подальшого використання свічки.

Окрім вимог щодо типу свічки, було сформовано низьку технічних параметрів її режиму роботи в дизельному двигуні. Свічка має сприймати значні механічні, теплові, електричні та хімічні навантаження.

У форсованих дизельних двотактних двигунах на експлуатаційних режимах роботи в камері згорання, де безпосередньо розташовуються свічки розжарювання, параметри тиску та температури робочих газів показано в табл. 1.

Таким чином виходячи з вище згаданого вимоги до свічки розжарювання для дизельного двотактного двигуна формуються таким чином:

- надійна робота в умовах різких змін тиску та температури;
- підвищена електрична міцність ізолятора у зв'язку з високими значеннями напруги, що подається, та стійкість електроду до ерозії під впливом навантажень струмом;
- герметичність конструкції свічки за визначених умов тиску газів;

Таблиця 1

Умови запалювання розряду у двигунах типу 5 ТДФ [5]

Робочі процеси у циліндрі двотактного дизельного двигуна	Температура газів, К	Тиск газів, МПа
Наприкінці такту стиску	800-1200	9-11
У процесі згорання	1900-2000	11-13
Наприкінці продування	200-250	0,1-0,24

– збереження технічних характеристик щодо забезпечення якості розряду на протязі експлуатаційного ресурсу (має збігатися з міжремонтним ресурсом двигуна).

У карбюраторних двигунах застосовують бензин як паливо, що має властивість більшого випаровування порівняно з дизельним паливом. Це впливає не тільки на якість сумішоутворення, але й на мінімальну енергію, за якої відбувається запалювання палива.

Ця властивість щодо випаровування особливо виявляється за низьких температур.

Тому, на запалювання дизельне повітряної суміші потрібно витратити збільшену енергію, порівняно з бензино-повітряною сумішшю. Відповідно системи іскрового запалювання, що застосову-

ють на карбюраторних двигунах, не придатні для запалювання дизельне повітряних сумішей безпосередньо в камері згорання двигуна із-за обмеження в енергії іскрового розряду.

За даними [6], залежність мінімальної енергії запалювання у відповідних паливно-повітряних сумішах в залежності від стехіометричного коефіцієнту має вигляд.

Неідеальні умови сумішоутворення та погіршені умови випаровування, що мають місце у дизельному двигуні під час холодного пуску, зумовлюють необхідність збільшення мінімальної енергії запалювання. З рис. 4 маємо, що на збіднених сумішах мінімальна енергія запалювання сягає 200 мДж та вище. Це потребує розроблення спеціальних систем запалювання.

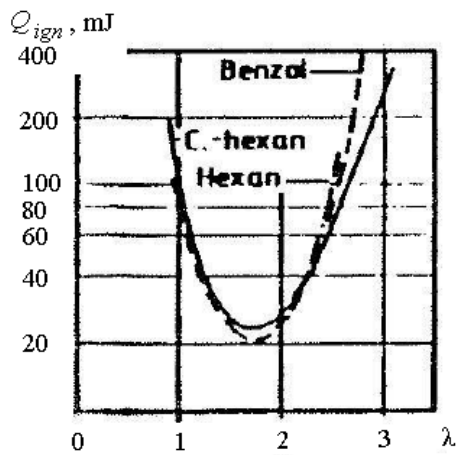


Рис. 4. Залежність мінімальної енергії запалювання в залежності від стехіометричного коефіцієнту за даними [6]

Таким чином, виникають специфічні вимоги до системи запалювання:

Іскровий розряд має виникати за тиску в циліндрі двигуна не меншого ніж 5 – 8 МПа;

Енергія іскрового розряду має перевищувати 200 мДж (для порівняння – у бензинових двигунах енергія іскри, як правило, дорівнює близько 20 мДж).

## ВИСНОВКИ

Під час проектування свічок запалювання для потужних дизельних двигунів, що застосовуються для примусового запалювання паливно-повітряної суміші на режимі холодного пуску, потрібно враховувати збільшені термомеханічні навантаження на свічки порівняно з умовами роботи свічок у бензинових двигунах. Для обмеження максимальної електричної напруги у системі електророзрядного

пуску доцільне застосування свічок запалювання з поверхневим розрядом.

## Список літератури

1. Cold start aids for commercial vehicles // Technical information. – No 01. – BorgWarner BERU Systems GmbH [Електронний ресурс]. – Режим доступу до матеріалу: [www.beru.com](http://www.beru.com).
2. Коритченко К.В. Можливість застосування плазмових технологій у засобах пуску танкових дизельних двигунів / К.В. Коритченко, В.М. Замана // Збірник тез доповідей Третьої Всеукраїнської науково-технічної конференції «Перспективи розвитку озброєння та техніки Сухопутних військ», Академія Сухопутних військ. – 2010. – С. 73.
3. Коритченко К.В. Теоретичне обґрунтування вимог до іскрового розряду в системі холодного пуску дизельного двигуна / В.М. Замана, К.В. Коритченко, С.А. Соколовський [та ін.] // Збірник наукових праць: Академії внутрішніх військ МВС України. – Х., 2012. – № 1 (19) – С. 14-18.
4. Райзер Ю.П. Фізика газового розряду: учеб. руководство / Ю.П. Райзер – М.: Наука, 1987. – 592 с.
5. Рязанцев. Н.К. Конструкция форсированных двигателей наземных транспортных машин / Н.К. Рязанцев. – Х.: ХДПУ, 1996. – Ч. 1. – 388 с.
6. Weib M. Forced ignition: Minimum ignition energy, flame propagation and the influence of the Markstein number on flame phenomena / M. Weib, N. Zarzalis. – SAFEKINEX-workshop, Saint-Denis La Plaine, November, 2006.

Надійшла до редколегії 6.04.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.К. Шаша, Національна академія Національної гвардії України, Харків.

## ТРЕБОВАНИЯ К СВЕЧЕ ЗАЖИГАНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ЗАЖИГАНИЯ ТОПЛИВНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ДИЗЕЛЬНОМ ДВИГАТЕЛЕ НА РЕЖИМЕ ХОЛОДНОГО ПУСКА

А.В. Серпухов, Д.В. Бизоньч, И.В. Цебрюк, К.В. Корытченко, В.А. Темников

В работе проведен анализ термомеханических нагрузок, которые возникают в цилиндрах дизельных двигателей. Сформированы требования к свечам зажигания, в случае их применения для принудительного зажигания топливно-воздушной смеси в мощных дизельных двигателях на режиме холодного пуска. Обосновано применение свечей зажигания с поверхностным разрядом.

**Ключевые слова:** дизельный двигатель, свеча зажигания, холодный пуск, принудительное зажигание.

## REQUIREMENTS TO SPARK PLUG WHICH IS USED FOR FORCED IGNITION OF FUEL-AIR MIXTURE IN DIESEL ENGINES DURING COLD START

O.V. Serpukhov, D.V. Bizonych, I.V. Tsebryuk, K.V. Korytchenko, V.A. Temnikov

The analysis of the thermo-mechanic loads which take place in the cylinders of powerful diesel engines was carried out in the work. Requirements to the spark plugs in the case of their application for forced ignition of fuel-air mixture in powerful diesel engines on the mode of the cold starting were formed. Application of spark plugs with a suffer discharge was grounded.

**Keywords:** diesel engine, the spark plug, cold start, forced ignition.