НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
„ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Лал Амір Гул

УДК 621.436

ДИСЕРТАЦІЯ

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗГОРЯННЯ В ОПОЗИТНОМУ ДВОТАКТНОМУ ДВИГУНІ З ПРОТИЛЕЖНИМ РУХОМ ПОРШНІВ

142 – Енергетичне машинобудування
14 – Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ А.Г. Лал

Науковий керівник
Парсаданов Ігор Володимирович
доктор технічних наук, професор

Харків – 2023

АНОТАЦІЯ

Лал А.Г. Підвищення ефективності згоряння в опозитному двотактному двигуні з протилежним рухом поршнів. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 142 – Енергетичне машинобудування. – Національний Технічний Університет „Харківський Політехнічний Інститут”, Харків, 2023.

Об’єктом дослідження є процеси сумішоутворення, зокрема динаміка паливного струменя, та згоряння в складних умовах форсованого двотактного дизеля з протилежно рухомими поршнями (ПРП); впливові фактори, що дозволяють забезпечити кращі умови розпилення і повного згоряння палива.

Предметом дослідження опозитний двотактний дизель 6ЧН12/2х12.

В дисертаційному дослідженні вирішена задача визначення перспективи підвищення ефективності згоряння вітчизняних двигунів серії ТД та ступеня впливу окремих конструкторських параметрів на якість сумішоутворення та методів забезпечення найліпших умов розпилювання палива в об’ємі камери згоряння циліндру, до яких, головним чином, слід віднести візуалізацію розвитку паливних струменів й охоплення ними об’єму камери згоряння при різних впливових газодинамічних, гідравлічних, регулювальних і конструктивних факторах.

У вступі означена актуальність роботи по підвищенню ефективності вітчизняних двигунів та енергозабезпечення установок з ними, наведена наукова новизна, практичне значення, інформація щодо особистого внеску здобувача, апробація результатів та перелік публікацій.

У першому розділі проведено аналіз історії і напрямків розвитку дизелів з ПРП, дана оцінка перевагам їх конструкції у порівнянні з традиційними 4-такними двигунами, аналогічними за габаритними параметрами та літражем. Зважаючи на особливості конструкції розкрито практично повна відсутність їх серед приватних транспортних засобів іншого призначення. Натомість дана оцінка їх виправданому використанні для енергетичних установок з потребою

забезпечення максимальної питомої потужності, наприклад в бронетехніці. Визначені основні світові виробники, що мають досвід виробництва даного типу ДВЗ. Проаналізовані публікації з сучасними конкурентними розробками та презентації дослідних зразків, відмічена зацікавленість, зазначені тенденції до налагодження виробництва і появи двигунів ПРП на бронетехніці країн НАТО. Проведено порівняння цих розробок з існуючими вітчизняними та зроблено висновок щодо обґрунтування теми і актуальності поставленою задачі.

Класифіковані основні показники, що характеризують технічний рівень дизельних двигунів ПРП. З огляду на уніфікацію конструктивних елементів серії ТД розглянуті перспективи поширення сфери їх застосування та використання у цивільній техніці.

Другий розділ присвячено дослідженню організації згоряння, відзначається важливість процесів підготовки паливо-повітряної суміші: сумішоутворення, випаровування та вигорання. До детального розгляду пропонується процес сумішоутворення, як основний та передуючий іншим чинник підвищення ефективності згоряння. Двотактні ПРП характеризуються наявністю високих значень швидкостей повітряного вихору у циліндрі, умовами його виникнення. За аналізом безмоторних досліджень визначається вплив інтенсивності обертання вихору на форму струменя рідини, що впорскується. Досліджується розпилення палива при впорскуванні, відмічається вплив дисперсності та однорідності розподілу на подальше випаровування, приводяться аналітичні методи визначення розміру краплі палива

Особлива увага приділена дослідженню розвитку струменя, наводиться модель, що пояснює розпад струменя в умовах протитиску у циліндрі, характеризує етапи формування ядра струменя та оболонки, то дає опис переміщенню переднього фронту струменя, що також підтверджується дослідженнями та відеореєстраціями з оброблених матеріалів.

За процесами сумішоутворення та випаровування, у дизельних двигунах наступає самоспалахування. Розглядається поява осередків запалювання та характеризуються фази згоряння. Встановлюються залежності характеру

зростання тиску у циліндрі (та динамічних навантажень) від тривалості конкретної фази. Зазначається вплив температури стінки камери згоряння на перебіг сумішоутворення та сформулюється умови забезпечення згоряння у об'ємі камери при запобіганні потрапляння палива на дзеркало циліндра і контакту струменів та пристінкових потоків з поверхнею поршня.

У третьому розділі наводяться методи стендових досліджень для визначення наявних резервів та впровадження нових технічних рішень забезпечення необхідної потужності вітчизняних високофорсованих дизельних двигунів ПРП. Формулюються основні технічні вимоги до створення і організації науково-дослідної лабораторії. Значна увага приділена опису безмоторних стендів для дослідження далекобійності струменя та стенду з ГБЦ двигуна з бічним упорскуванням палива та інтенсивним тангенціальним рухом повітря, подібним до ПРП. Отримані дані використовуються для налаштування математичної моделі та подальших теоретичних досліджень та розрахунків.

У четвертому розділі наводиться опис використаної моделі та алгоритм розрахунку знаходження фронту струменя. Відповідно до моделі Разлєйцева, виділяється три стадії розвитку струменя та руху елементарної порції палива, пояснюються залежності, що використовуються у розрахунку далекобійності, кута розкриття струменя та зносу його осі від впливу потоку вихору у циліндрі. Згідно з моделлю визначається межа між ділянками початкового то основного розвитку і приводяться формули для визначення параметрів струменя на кожному з етапів.

У п'ятому розділі виконується ідентифікація математичної моделі та розрахунки динаміки паливного струменя. Проводиться обґрунтування та вибір вихідних даних із опублікованих експериментів. Результати моделювання аналізуються та порівнюються із експериментом. Наводиться порівняння похибок в залежності від етапу розвитку струменя, графічне зіставлення експериментального та модельованого струменя, висувається висновок про можливість використання моделі на ТД двигуні.

Для отримання необхідних вихідний даних стану середовища у кінці такту стиску виконується розрахунок газорозподілу, дещо ускладненого відставанням між колінчастими валами. За отриманими параметрами газу у циліндрі, розраховуються головні параметри розвитку струменя та виконується побудова його візуалізації. Візуалізація та характер розвитку фронту струменя добре узгоджуються з даними безмоторних експериментів. В заключенні приводяться аналіз розрахункових даних, рендеринги 3-Д моделей запропонованих камер згоряння.

За результатами дисертаційного дослідження отримані наступні *наукові результати*:

1. Запропонована математична модель розвитку фронту паливного струменя та ідентифікована за безмоторним експериментом з найменшими відхиленнями наприкінці розвитку струменя, що важливо з огляду мінімізації контакту паливного струменя із гарячою стінкою циліндру.

2. Вперше запропоновано моделювання розвитку фронту паливного струменя для двигунів типу ТД із бічним упорскуванням палива. Врахування параметрів середовища та палив у математичній моделі відкриває можливості прогнозувати рух будь якого рідкого палива, що може використовуватися у двигунів ТД з ПРП, що вкрай актуально для збереження роботи на альтернативних паливах при форсуванні.

Модель розрахунку розвитку фронту паливного струменя також дозволяє отримати візуалізації розвитку паливних струменів в камері згоряння при різних впливових газодинамічних, гідравлічних, регулювальних і конструктивних факторах.

Практичне значення результатів для двигунобудування:

1. Запропонована модель розвитку фронту паливного струменя дозволить вдосконалити паливну апаратуру дизеля, реалізація технічних рішень сприятиме підвищенню паливної економічності та покращенню ТТХ двигунів.

2. На основі отриманих даних та конструкторських особливостей двигуна запропоновано декілька варіантів форми камери згоряння в накладці поршня, наведені ескізи. Здобувач також брав участь у розробці патенту на корисну модель.

3. Результати моделювання динаміки паливного струменя відкривають можливості подальших досліджень, прогнозування розподілу палива за зонами струменя, розрахунку випаровування та тепловиділення.

4. Використання моделі динаміки паливного струменя може бути поширене до розрахунків розвитку струменя у 4-тактному двигуні, головна відмінність -інший закон зміни швидкості тангенціального вихору.

5. Ґрунтуючись на результатах розрахунків досліджень можна значно скоротити кількість дослідних експериментів (зміни характеру розпилення, періоду впорскування та орієнтації паливного струменя, тощо) і проводити тільки найперспективніші.

Результати дисертаційної роботи впроваджені в ДП «Завод імені Малишева» (м. Харків).

Ключові слова: дизель, математична модель, аналіз, згоряння, сумішоутворення, паливний струмінь, розпилювач, камера згоряння, паливоподача, вихрове відношення, тангенціальний вихор.

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати:

1. Марченко А.П., Парсаданов І.В., *Лал А.Г.* Сфера застосування та визначення резервів підвищення ефективності згоряння в опозитних двотактних дизелях із зустрічно-протилежно рухомими поршнями. *Двигуни внутрішнього згоряння,* Харків, 2019. №1. С. 21-26. (Б)

2. *Лал А.Г.*, Парсаданов І.В. Дослідження впливу змін умов сумішоутворення при форсуванні опозитного двотактного дизеля на показники згоряння. *Двигуни внутрішнього згоряння,* Харків, 2020. №1. С. 13-21. (Б)

3. *Лал А.Г.*, Парсаданов І.В. Концепція організації процесу згоряння в опозитному двотактному дизелі при високому рівні форсування. *Двигуни внутрішнього згоряння*, Харків, 2021. №1. С. 45-51. (Б)

4. *Лал А.Г.*, Шелестов М.С. Аналіз існуючих систем наддуву та перспективи застосування електричного приводу у агрегатах наддуву. *Двигуни внутрішнього згоряння,* Харків, 2022. № 1. С. 21-26. (Б)

5. *Лал А.Г.*, Шелестов М.С. Особливості розподілу палива в об’ємі камери згоряння двотактного дизеля із зустрічним рухом поршнів. *Двигуни внутрішнього згоряння,* Харків, 2022. № 2. С. 40-46. (Б)

ANNOTATION

Lal A.G. Increased combustion efficiency in an opposed two-stroke diesel engine with opposing movable pistons. – Qualifying scientific work on the manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 142 – Power engineering. – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2023.

The object of the study are the processes of mixture formation, in particular the dynamics of the fuel jet, and combustion in difficult conditions of a forced two-stroke diesel engine with oppositely moving pistons (OMP); influential factors that allow to provide better spraying conditions.

The subject of the research is a two-stroke diesel 6ChN12/2x12.

In the dissertation research, the problem of determining the perspective of increasing the combustion efficiency of domestic engines of the TD series is solved. The degree of influence of individual design parameters on the quality of mixture formation and methods of ensuring the best fuel atomization conditions in the volume of the cylinder combustion chamber are also determined. Among them, mainly, visualization of the development of fuel jets and their coverage of the combustion chamber under various influential gas-dynamic, hydraulic, regulatory and structural factors.

In the introduction, the relevance of the work on increasing the efficiency of wind turbine engines and the energy supply of installations with them is specified, scientific novelty, practical significance, information on the personal contribution of the acquirer, approbation of the results and a list of publications are given.

In the first section, an analysis of the history of the development of diesel engines with PRP was carried out, an assessment of the advantages of their design in comparison with traditional 4-stroke engines of similar size and displacement was given. Considering the features of the design, their almost complete absence among private vehicles or installations is justified. Instead, an assessment is given to their

justified use for cases with the need for maximum specific power, for example, in armored vehicles. The main producing countries with experience in the production of structures of the investigated type of internal combustion engine have been identified. The publications with modern competitive developments and presentations of experimental samples were analyzed, the interest of other countries was noted, the trends towards establishing production and the appearance of OMP engines on the armored vehicles of NATO countries were noted. A comparison with existing domestic ones was made and a conclusion was made regarding the justification of the topic and the relevance of the task.

The main indicators characterizing the technical level of OMP diesel engines are classified. In view of the unification of the structural elements of the TD series, the prospects for expanding the scope of application and use in civil engineering are considered.

The second section is devoted to the study of the organization of combustion, the importance of the processes of preparation of the fuel-air mixture is noted: mixture formation, evaporation and combustion. The process of mixture formation is proposed for detailed consideration as the main and preceding factor of increasing combustion efficiency. Two-stroke OMP s are characterized by the presence of high values of air vortex velocities in the cylinder, the conditions of its occurrence are determined. The influence of the vortex rotation intensity on the shape of the injected liquid jet is determined based on the analysis of motorless studies. Spraying of fuel on injection is studied, the effect of dispersion and homogeneity of distribution on further evaporation is noted, analytical methods for determining the size of a fuel droplet are given

Special attention is paid to the study of the development of the jet, a model is given that explains the disintegration of the jet under conditions of back pressure in the cylinder, characterizes the stages of formation of the jet core and shell, then gives a description of the movement of the front of the jet, which is also confirmed by research and film recordings of processed materials.

After the processes of mixture formation and evaporation, self-ignition occurs in diesel engines. The appearance of ignition centers is considered and the phases of

combustion are characterized. The dependence of the nature of the increase in pressure in the cylinder (and dynamic loads) on the duration of a specific phase is established. The influence of the temperature of the combustion chamber wall on the course of mixture formation is noted, and the condition for ensuring combustion in the volume of the chamber while preventing fuel from hitting the cylinder mirror and contact of jets and wall flows with the piston surface is formulated.

In the third section, bench research methods are given for determining the available reserves and implementing new technical solutions to ensure the necessary power of domestic high-pressure diesel engines. The main technical requirements for the creation and organization of a research laboratory are formulated. Considerable attention is paid to the description of engineless stands for the study of long-range jet and a stand with a cylinder head of an engine with lateral fuel injection and intensive tangential air movement, similar to a OMP. The obtained data are used to adjust the mathematical model and further theoretical studies and calculations.

The fourth chapter provides a description of the used model and the calculation algorithm for finding the jet front. According to Razleitsev's model, three stages of the development of the jet and the movement of the elementary portion of the fuel are distinguished, the dependencies used in the calculation of range, the opening angle of the jet and wear of its axis due to the influence of the vortex flow in the cylinder are explained. According to the model, the border between the sections of initial and main development is determined and formulas are given for determining the parameters of the jet at each of the stages.

The fifth chapter identifies the mathematical model and calculates the dynamics of the fuel jet. Justification and selection of raw data from published experiments is carried out. The simulation results are analyzed and compared with the experiment. A comparison of errors depending on the stage of jet development, a graphical comparison of the experimental and simulated jet, and a conclusion about the possibility of using the model on the TD engine are presented.

To obtain the necessary output data of the state of the environment at the end of the compression stroke, the calculation of the gas distribution is performed, which is

somewhat complicated by the lag between the crankshafts. Based on the obtained parameters of the gas in the cylinder, the main parameters of the jet development are calculated and its visualization is constructed. The visualization and nature of the development of the jet front agree well with the data of motorless experiments. The conclusion includes the analysis of calculation data, renderings of 3-D models of the proposed combustion chambers.

According to the results of the dissertation research, the *following scientific results* were obtained:

1. A mathematical model of the development of the fuel jet front is proposed and identified by a motorless experiment with the smallest deviations at the end of the jet development. This is important in view of minimizing the contact of the fuel jet with the hot cylinder wall.

2. Modeling of the development of the fuel jet front for TD-type engines with lateral fuel injection is proposed for the first time. Taking into account the parameters of the environment and fuels in the mathematical model opens up the possibility of predicting the movement of any liquid fuel that can be used in TD engines with OMP, which is extremely relevant for maintaining operation on alternative fuels during forcing.

3. The model for calculating the development of the fuel jet front also allows you to obtain visualizations of the development of fuel jets in the combustion chamber under various influential gas-dynamic, hydraulic, regulatory and structural factors.

The practical significance of the results is as follows:

1. 1. The proposed model of the development of the front of the fuel jet will allow to improve the fuel equipment of the diesel engine, the implementation of technical solutions will contribute to increasing the fuel economy and improving the performance characteristics of the engines.

2. Based on the obtained data and design features of the engine, several variants of the shape of the combustion chamber in the piston liner are proposed, sketches are given. The acquirer also participated in the development of a utility model patent.

3. The results of modeling the firing jet dynamics reveal the possibilities of further investigations, predicting the distribution of the firing zones of the jet, the development of vaporization and heat release.

4. The use of the fuel jet dynamics model can be extended to the calculations of the development of the jet in a 4-stroke engine, the main difference being a different law of change in the speed of the tangential vortex.

5. Based on the results of research calculations, it is possible to significantly reduce the number of experimental experiments (changes in the nature of spraying, the injection period and the orientation of the fuel jet, etc.) and conduct only the most promising ones.

The results of the dissertation have been implemented in the State Enterprise "Malyshev Plant" (Kharkiv).

Key words: diesel, mathematical model, analysis, combustion, mixture formation, fuel jet, atomizer, combustion chamber, fuel supply, vortex ratio, tangential vortex.

List of the applicant's publications

1. Marchenko A.P., Parsadanov I.V., *Lal A.G.* The scope of application and determination of reserves for increasing combustion efficiency in opposed two-stroke diesel engines with counter-oppositely moving pistons. *Internal combustion engines*, Kharkiv, 2019. No. 1. P. 21-26. (B)

2. Lal A.G., Parsadanov I.V. Study of the influence of changes in the conditions of mixture formation during the forcing of an opposed two-stroke diesel engine on the combustion parameters. *Internal combustion engines*, Kharkiv, 2020. No. 1. P. 13-21. (B)

3. Lal A.G., Parsadanov I.V. The concept of the organization of the combustion process in an opposed two-stroke diesel engine at a high level of forcing. *Internal combustion engines*, Kharkiv, 2021. No. 1. P. 45-51. (B)

4. Lal A.G., Shelestov M.S. Analysis of existing supercharging systems and prospects for the use of electric drive in supercharging units. *Internal combustion engines*, Kharkiv, 2022. No. 1. P. 21-26. (B)

5. Lal A.G., Shelestov M.S. Peculiarities of fuel distribution in the volume of the combustion chamber of a two-stroke diesel engine with counter-movement of pistons. *Internal combustion engines*, Kharkiv, 2022. No. 2. P. 40-46. (B)