

## ЕНЕРГЕТИЧНЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.43

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2026.112.0.139

СУЧАСНІ МЕТОДИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ПОКАЗНИКІВ  
ФОРСОВАНИХ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ

Афонін В. М.

Приватна фірма «Променерго», м. Мерефа, Україна

**Анотація.** У роботі наведено способи поліпшення техніко-економічних і екологічних показників дизельних двигунів. Розглянуто вплив процесів сумішоутворення та згоряння, зокрема багатостадійного впорскування палива, на перебіг робочого процесу дизеля. Здійснено аналіз систем повітропостачання та паливоподачі сучасних двигунів і методів їх вдосконалення. Зазначено, що використання двофазного впорскування палива для форсованих дизельних двигунів ефективно впливає на перебіг робочого процесу, зокрема знижує швидкість збільшення тиску під час згоряння до 50 %, зменшує максимальний тиск згоряння на 5–10 %, змінює тип кривої тепловиділення та поліпшує екологічні показники й умови роботи двигуна (реалізується через використання двох секцій паливного насоса на одну форсунку, використання форсунок з двома пружинами та реалізацію хвильових явищ у паливній системі – тупикових каналів) за пільної дози палива в межах 15–25 % від основної циклової подачі. Вибрано найбільш раціональні способи вдосконалення процесів наповнення, сумішоутворення та згоряння для форсованого транспортного дизеля типу 6 Ч 15/15.

**Ключові слова:** дизельний двигун, паливна апаратура, упорскування палива, робочий процес, витрата палива, швидкість зростання тиску під час згоряння.

**Вступ**

Підвищення вимог до техніко-економічних показників та ресурсу сучасних форсованих дизельних двигунів потребує пошуку способів і підходів щодо вдосконалення їхньої конструкції і систем, зокрема систем повітропостачання та паливоподачі [1–2].

Так, автори роботи [3] здійснили комплексний аналіз ефективності та перспектив розвитку силових установок міського транспорту в умовах глобальних викликів кліматичних змін, енергетичної трансформації та реалізації Цілей сталого розвитку України. Їхнє дослідження продемонструвало суттєве збільшення кількості науково-дослідних робіт у сфері електромобілів і гібридних установок, що вказує на зміщення глобального вектора інновацій у бік впровадження екологічно чистих рішень [3].

Збільшення коефіцієнта наповнення циліндра способом удосконалення фаз газорозподілу, використання хвильових явищ у впускному колекторі та використання й удосконалення турбонаддуву є пріоритетним напрямом доведення на користь застосування сучасних форсованих дизелів [4–5].

Використання двофазного та багатофазного упорскування палива, оптимізація конфігурації камери згоряння та конструкції

розпилювача паливної форсунки, використання систем рециркуляції відпрацьованих газів (EGR) і підвищення тиску упорскування палива є ефективним підходом до поліпшення показників форсованих дизелів, зокрема для зменшення швидкості збільшення рівня тиску під час згоряння, поліпшення екологічних показників і збільшення моторесурсу двигуна [6–17].

**Аналіз публікацій**

У сучасних дизелях застосовується робочий процес із відкритою камерою згоряння під час використання паливної апаратури з різними тисками впорскування. Дуже велике значення має спільне рішення використання повітряного вихору та параметрів упорскування палива [18].

В основній частині статті буде розглянуто вплив конструктивних і регулювальних факторів на показники робочого процесу сучасних дизелів.

**Мета та постановка задачі**

Метою роботи було визначення раціональних способів поліпшення техніко-економічних й екологічних показників дизельних двигунів.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувались такі завдання:

- здійснити огляд публікацій щодо дослідження процесів сумішоутворення та згоряння в дизелях з відкритою камерою згоряння;
- здійснити аналіз систем повітропостачання та паливоподачі сучасних двигунів і методів їх вдосконалення;
- вибрати найбільш раціональний спосіб удосконалення процесів наповнення, сумішоутворення та згоряння для сучасного форсованого транспортного дизеля;
- розробити науково-практичні рекомендації з поліпшення умов роботи швидкохідного форсованого дизеля типу 6Ч 15/15.

### Викладення основного матеріалу

Аналіз процесу об'ємного сумішоутворення та згоряння, а також способів їх поліпшення здійснено на основі схеми, запропонованої професором А. І. Толстовим та Н. Ніроуасу [18]. Відповідно до неї розрізняють 4 характерні періоди в процесі займання і згоряння, основною відмінною ознакою кожного є величина швидкості згоряння (рис. 1).

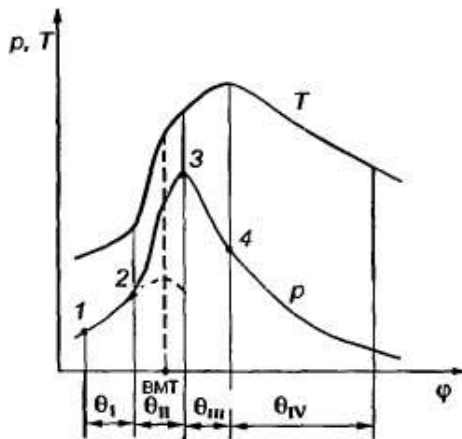


Рис. 1. Індикаторна діаграма та залежність зміни температури газів у циліндрі дизеля від кута п.к.в. [18]

Об'ємно-плівкове та плівкове сумішоутворення має практично такі самі фази згоряння, проте закони зміни тиску та температури будуть дещо відрізнятися.

Перша фаза горіння – затримка займання – починається з моменту надходження палива (точка 1) і завершується в момент відриву кривої згоряння від лінії стиснення (точка 2). Упорскування палива відбувається до приходу поршня в ВМТ. Кут випередження впорскування палива знаходиться в межах  $20\text{--}35^\circ$  повороту колінчастого вала (п.к.в.).

Чинники, які впливають на тривалість першої фази згоряння:

- займання палива, що оцінюється цетановим числом (чим вище цетанове число, тим краще займання);
- тиск та температура повітряного заряду на початку впорскування палива за збільшення тиску та температури період затримки займання скорочується).

Сумішоутворення в дизелі поділяється на три види: плівкове, об'ємно-плівкове, об'ємне. Кожному з них притаманні свої форми камери згоряння та свої переваги й недоліки. Під час використання класичної паливної апаратури (ПА) (тиск упорскування до 100 МПа) в дизелях з невеликою розмірністю здебільшого спостерігається плівкове й об'ємно-плівкове сумішоутворення. У разі збільшення діаметра циліндра та діаметра камери згоряння акцент зміщується в бік об'ємного сумішоутворення.

Конструкції різних камер згоряння в поршні наведено на рис. 2.

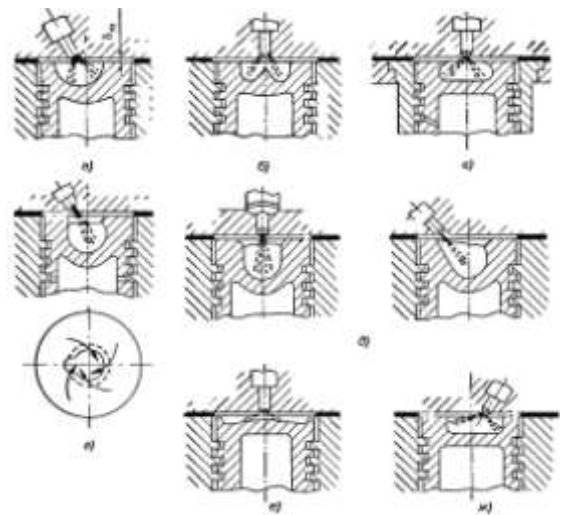


Рис. 2. Різні конструкції камер згоряння в поршні [19]: а – напівсферична (дизелі ВТЗ); б – чотиритактного дизеля з витіснювачем; в – дизеля ЦНДІ трапеціальна; г – дизеля фірми «МАНН»; д – дизеля фірми «Дойтц»; е – дизеля фірми «Гессельманн»; ж – дизеля фірми «Даймлер-Бенц»; з – надпоршневий зазор

Друга фаза горіння – самозаймання та швидке горіння – розпочинається з моменту займання (див. рис.1, точка 2) і завершується в момент досягнення максимального тиску в циліндрі (точка 3). Насамперед згорають однорідні шари суміші палива та повітря, добре перемішані між собою. Полум'я поширюється дуже швидко, отже, швидко збільшується тиск, а в певних випадках з утворенням ударної хвилі, що розповсюджується зі швидкістю звуку. Але на відміну від бензинових

двигунів у дизелях ці хвили не перетворюються на детонаційні, оскільки структура суміші вздовж всього об'єму камери згоряння не є рівномірною. Це дозволяє отримувати більший ступінь стиснення. Після того, як згорить добре підготовлена до займання паливоповітряна суміш, горіння продовжується в зонах, де структура суміші більш нерівномірна. На індикаторній діаграмі спостерігається деякий спад збільшення тиску.

Фактори, що впливають на розвиток і тривалість другої фази [18]:

1 кількість палива, що пройшло передпалум'яну підготовку за період затримки займання і згоряє з великою швидкістю. Чим більше подача палива і дрібніше розпилення, тим інтенсивніше тепловиділення та збільшення тиску;

2 тип камери згоряння. Вплив конструкції камери на першу фазу горіння призводить до певного розвитку та другої фази, оскільки визначає кількість паливоповітряної суміші, підготовленої до займання протягом першої фази;

3 навантаження. Зі зменшенням навантаження тривалість другої фази горіння скорочується, оскільки зменшується величина порції палива, що упорскується, і час його подачі;

4 частота обертання колінчастого вала. Зі збільшенням частоти обертання колінчастого вала покращується якість розпилення, скорочується тривалість упорскування, збільшується тиск і температура заряду. Усе це призводить до скорочення другої фази горіння.

Третя фаза горіння визначається плавною зміною тиску. Початком цієї фази є кінець другої (точка 3), а завершенням – момент досягнення максимальної середньої температури газів у циліндрі (точка 4). До початку третьої фази все паливо, що не згоріло та подане до циліндра під час перших двох фаз, знаходиться у вигляді крапель або згустків пари, які відокремлені від зон з вільним киснем – фронтом полум'я або продуктами горіння. Відбувається термічне розкладання крапель палива (крекінг) з утворенням частинок вуглецю у вигляді сажі, яка, залишаючи циліндр разом з відпрацьованими газами, викликає сильне димлення на випуску. Горіння продовжується за збільшеного об'єму камери, тому тиск плавно знижується.

За час третьої фази виділяється 25–30 % теплоти, тому температура продовжує підвищуватися, досягаючи в кінці фази 1800–2200 К. Тривалість третьої фази – 1–2 мс, що дорівнює 15–25 ° п.к.в.

Чинники, які впливають на розвиток третьої фази [18]:

1 якість розпилення та кількість палива, що упорскується після початку згоряння. Чим менше подано палива до початку третьої фази горіння, тим менше буде виділено теплоти в цій фазі, що є визначальним для роботи дизеля на малих навантаженнях;

2 швидкість руху повітряного заряду. Збільшення швидкості руху заряду збільшує тепловиділення, але це відбувається до певного моменту. За надмірного завихрення заряду тепловиділення в третій фазі знижується, тому що в цьому випадку продукти згоряння із зони одного факела потрапляють до зони іншого, збільшуючи неповноту згоряння;

3 частота обертання колінчастого вала. Зі збільшенням частоти обертання колінчастого вала швидкість руху заряду збільшується, а розпилення покращується. Тривалість третьої фази скорочується.

Четверта фаза горіння – догорання – розпочинається в момент досягнення максимальної температури і продовжується протягом усього часу догорання палива. Протягом цієї фази догорає паливо, що не встигло згоріти в третій, це відбувається це в умовах нестачі кисню, оскільки його значну кількість вже витрачено. Тому догорання відбувається повільно.

За час четвертої фази за повного навантаження дизеля виділяється 15–25 % теплоти. Таким чином, загальна кількість тепловиділення до кінця четвертої фази становить 90–95 %. Інші 5–10 % губляться внаслідок неповноти згоряння палива. Тривалість четвертої фази – 5–35 мс, що дорівнює 50–60 ° п.к.в.

Чинники, що впливають на розвиток четвертої фази згоряння [18]:

1 турбулентний рух заряду, який покращує контакт палива та повітря, а отже, покращує догорання;

2 якість розпилення наприкінці процесу подачі палива. Чим більший діаметр крапель, тим триваліший процес догорання. Нечіткість відсічення палива в кінці упорскування, як і тривале зниження тиску в кінці упорскування, не тільки знижують тепловиділення, а й викликають закоксовування сопел розпилювачів форсунок;

3 потрапляння палива на холодні стінки всередині циліндрового простору призводить до збільшення часу догорання, тому збільшення навантаження дизеля до прогрівання небажано;

4 наддув. Використовуючи наддув, збільшують кількість повітря та палива, що подається зокрема і способом зтяжного впорскування, що призводить до збільшення часу догоряння.

Далі наведено аналіз впливу конструктивних факторів на перебіг робочого процесу в дизельному двигуні.

#### *Рух повітря, що створюється поршнем*

Швидкість повітряного заряду, що рухається, в камері згоряння (КЗ) умовно можна поділити на три складові: радіальну, осьову, тангенціальну. Чисельні значення складових швидкостей істотно залежать від розмірів і форми камери згоряння (КЗ), ступеня стиснення, швидкості руху поршня, профілю впускного каналу, зазору між поршнем і днищем головки циліндрів і підбираються за встановлених параметрів КЗ на основі раціонального їх поєднання з параметрами впорскування паливної апаратури.

На показники робочого процесу з КЗ в поршні істотно впливають кількість і напрямки факелів палива, що впорскується, діаметр соплових отворів і характеристика впорскування. Найкращі показники роботи дизеля досягаються за напрямом осей паливних факелів на внутрішні стінки КЗ у поршні. Інтенсивність повітряного заряду має бути такою, щоб за період упорскування забезпечувалося знесення (поворот) факелів розпорошеного палива на величину кута між ними.

Форму КЗ у поршні оптимізують для формування максимальної швидкості тороїдального вихору, який утворюється в поршні під час стискання повітря в процесі підйому поршня у ВМТ і руху до НМТ.

#### *Вплив конфігурації впускних каналів*

Для забезпечення ефективного сумішоутворення в чотиритактних дизелях з нерозділеними КЗ недостатньо турбулізації потоку повітря внаслідок енергії упорскування палива та форми КЗ. Додатково необхідно створення спрямованого повітряного вихору необхідної інтенсивності через застосування каналів у головці циліндрів – спеціальної форми або пристроїв, що завихрюють потік повітря.

Встановлення ширми на тарілці впускного клапана, екрана (козирка) в горловині впускного каналу, вибірка на площині головки – циліндра у сідла впускного клапана – призводять до більших витрат енергії на створення

одиночності кінетичної енергії руху газу за застосування тангенціальних або гвинтових впускних каналів. Незважаючи на те, що тангенціальні канали найбільше пристосовані до організації інтенсивного спрямованого (обертального) руху, гвинтові канали мають істотно менший аеродинамічний опір.

Тому гвинтові впускні канали застосовують на дизелях, «Даймлер-Бенц», «Сканія», «Штаер», «Вольво», «Ман», «Дойтц» тощо.

Інтенсифікація процесу сумішоутворення та згоряння буде здійснюватися як внаслідок організації руху повітряного заряду, так завдяки підвищенню енергії упорскуваного палива та раціонального розподілу його в обсязі КЗ [21].

Тангенціальне обертання повітря в циліндрі сповільнюється незначною мірою і в процесі наповнення циліндра, і в процесі стиснення, але повітря в КЗ, тобто тангенціальний вихор продовжує обертальний рух (рис. 3).

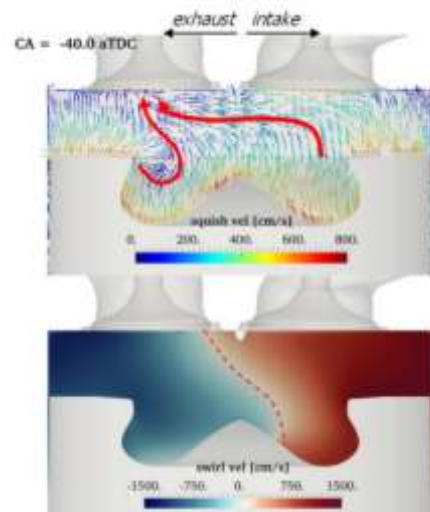


Рис. 3. Тангенціальний рух повітря у КЗ [22]

За такої конструкції впускного каналу помітно знижується наповнення циліндра. Зокрема це помітно в КЗ із плівковим сумішоутворенням.

Вибір форми впускного каналу залежить від застосованої конструкції КЗ, технологічних можливостей виробництва, стабільності процесу, зменшення впливу розкиду показників каналу на показники двигуна.

#### *Робочий процес з паливною апаратурою типу Common Rail*

Принцип організації процесу подачі повітря до КЗ з паливною апаратурою (ПА) типу Common Rail такий самий, як і принцип ор-

ганізації процесу подачі до КЗ з об'ємним сумішоутворенням.

Інтенсифікація сумішоутворення здійснюється завдяки великій кількості паливних факелів. Також застосовуються впускні канали з профілем, що палає, де майже відсутня тангенціальна складова. За допомогою форми КЗ регулюються осьові та радіальні складові руху повітря.

Кут конусності паливного факела за циліндричної форми соплового отвору розпилювача становить 15–20°. Паливо, подане до камери згоряння у вигляді факелів, розподіляється в повітряному заряді нерівномірно, оскільки кількість факелів, що визначається конструкцією розпилювача, обмежена (рис. 4).

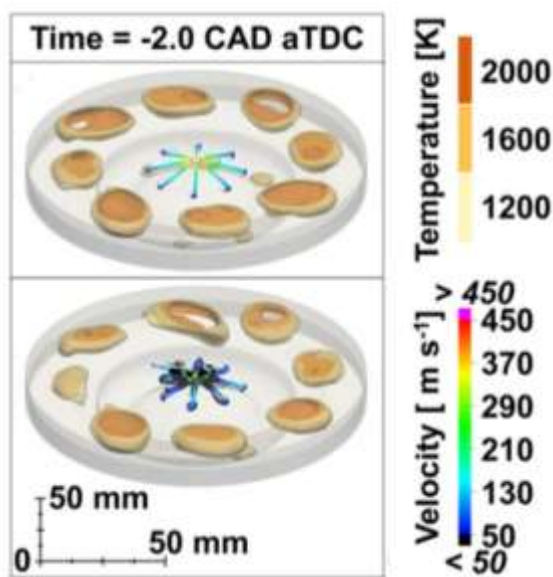


Рис. 4. Інтенсифікація сумішоутворення паливними факелами [23]

За наявності великої кількості надлишкового кисню в камері згоряння, тобто безпосередньо у факелі палива, що згорає, кисню не вистачає. Тому в дизелях з ПА типу Common Rail до процесу долучаються осьові та радіальні складові повітряного вихору. Створюються впускні канали не зі спрямованим тангенціальним вихором (рис. 5), а з каналом, що знижується, де відсутній вихровий рух повітря (рис. 6) [24].

На сьогодні існує декілька способів поліпшення умов роботи форсованих дизельних двигунів, до яких належать такі:

- використання двофазного впорскування палива;
- використання багатофазного впорскування палива;
- збільшення кута та тиску впорскування палива;

- вбір закону паливоподачі та швидкості впорскування;

- оптимізація конструкції розпилювача паливної форсунки;

- використання системи рециркуляції відпрацьованих газів (EGR).

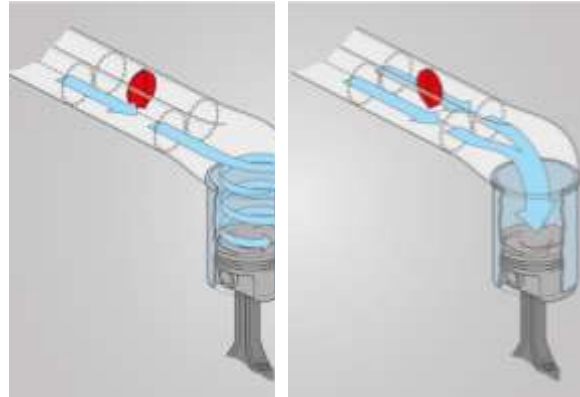


Рис. 5. Повітряний канал із спрямованим вихором

Рис. 6. Повітряний канал з повітряним потоком, що знижується

#### *Аналіз систем повітропостачання та паливоподачі сучасних двигунів і методів їх вдосконалення*

Розглянемо більш детально кожний з них.

#### *Використання двофазного впорскування палива*

Збільшення рівня форсування сучасних дизельних двигунів, зокрема транспортних, які працюють зі значною часткою перехідних процесів скидання – накидання навантаження, потребує всебічного аналізу процесів упорскування, сумішоутворення та згоряння для поліпшення їхніх техніко-економічних показників.

Неминуче збільшення максимального тиску згоряння за збільшення літрової потужності дизельного двигуна є основним фактором, який обмежує рівень форсування.

Використання концепції багатофазного впорскування палива ефективно впливає на процеси сумішоутворення та згоряння і знижує швидкість збільшення тиску в процесі згоряння.

Це призводить до зниження жорсткості процесу згоряння та зменшення навантаження на деталі кривошипно-шатунного механізму, насамперед на підшипники колінчастого вала двигуна.

Вибір раціональних значень кількості впорскувань палива, кутів випередження впор-

скувань, обсягу пілотних та основної дози дизельного палива є перспективним напрямом досліджень для поліпшення техніко-економічних показників дизельних двигунів, зокрема зі збільшенням рівня їх форсування [29].

Згідно з багатофазною стратегією впорскування палива, запропонованої авторами роботи [29], використання двофазного впорскування дає значний ефект щодо зміни характеристики тепловиділення (рис. 7).

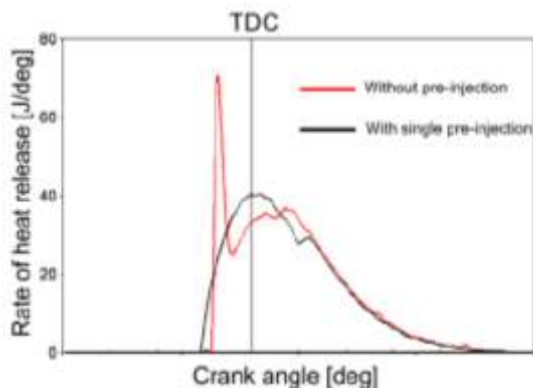


Рис. 7. Зміна характеристики тепловиділення для однофазного та двофазного впорскування палива [29]

Відповідно до наведених результатів (рис. 7), реалізація стратегії попереднього впорскування палива може бути успішно застосована для впливу на процес згоряння палива.

У дослідженнях авторів [30–35] зазначено, що подача пілотної дози палива може знизити швидкість зростання тиску під час згоряння на 43 %. У разі застосування цієї стратегії необхідно зменшити час упорскування, щоб забезпечити ідентичну потужність двигуна. Подвійне попереднє впорскування палива є більш ефективним (зниження швидкості збільшення тиску під час згоряння досягає 61,5 %).

Основним недоліком систем типу Common Rail є складність конструкції, висока вартість компонентів та наявність електронного блока керування зі значної кількістю датчиків [36].

Одним зі способів забезпечення ефективної та надійної роботи дизельного двигуна наземної транспортної машини є використання систем багатофазного впорскування палива без електронного керування. Такі системи, незважаючи на їхні недоліки, дозволяють знизити жорсткість робочого процесу зі збільшенням рівня форсування та працювати в надскладних (екстремальних) умовах роботи наземних транспортних машин.

Для реалізації концепції двофазного впорскування палива для паливних систем без електронного керування існують такі підходи:

- використання двох секцій паливного насоса на одну форсунку;
- використання кулачків приводу секції паливного насоса з двома профілями;
- використання паливних форсунок з двома пружинами;
- використання тупикових каналів (реалізація хвильових явищ під час упорскування палива для подвійної роботи голки розпилювача).

Розглянемо більш детально ці підходи.

#### *Використання двох секцій паливного насоса на одну форсунку*

У роботі авторів наведено порівняльні результати дослідження впливу двостадійного впорскування палива гідромеханічною паливною апаратурою на екологічні показники дизельного двигуна [9–11].

Для реалізації запропонованого підходу автори дообладнали паливний насос високого тиску додатковими секціями, які використовуються для подачі пілотної дози палива [9–11]. Кулачки вала приводу цих секцій випереджають кулачки вала основних секцій на 2–10 град повороту кулачного вала [1]. Автори довели ефективність такого підходу щодо впливу на процес згоряння палива та зниження швидкості збільшення тиску під час згоряння.

#### *Використання кулачків приводу секції паливного насоса з двома профілями*

Реалізація двофазного впорскування можлива за використання кулачків приводу секцій паливного насоса, які мають два профілі.

Перевагою такого підходу є компактність і відносна простота конструкції (відсутність великої кількості додаткових рухомих деталей), що дозволить забезпечити реалізацію концепції подвійного впорскування палива.

До недоліків використання такого підходу належать неможливість регулювання кутів упорскування та об'ємів пілотної й основної дози палива, а також високі контактні тиски в парі кулачок-штовхач, які призводять до зменшення ресурсу пари тертя та сприяють підвищенню механічних втрат в приводі паливного насоса високого тиску.

### Використання паливних форсунок з двома пружинами

У роботі авторів [40] наведено порівняльний експериментальний аналіз впливу одно- та двофазного впорскування палива на енергоекологічні показники одноциліндрового дизельного двигуна з діаметром циліндра 88 мм та ходом поршня 110 мм і частотою обертання колінчастого вала  $1500 \text{ хв}^{-1}$ .

Далі наведено ескіз паливної форсунки (рис. 8) з двома пружинами для реалізації концепції двофазного впорскування палива в дизельному двигуні [40].

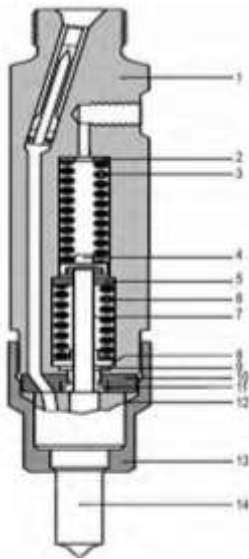


Рис. 8. Паливна форсунка з двома пружинами [40]: 1 – корпус форсунки; 2 – прокладка; 3 – верхня пружина; 4 – натискний штифт; 5 – напрямний елемент; 6 – нижня пружина; 7 – штанга; 8 – прокладка пружини; 9 – прокладка; 10 – проміжний елемент; 11 – стопорна втулка; 12 – голка розпилювача; 13 – накидна гайка; 14 – розпилювач форсунки

Під час порівняльних моторних випробувань було доведено, що використання паливної форсунки з двома пружинами дозволяє зменшити швидкість збільшення тиску в процесі згорання, максимальну температуру циклу, а отже, знизити кількість викидів оксидів азоту [40].

Згідно з результатами літературного аналізу [35–42], розроблення стратегії багатофазного впорскування палива з використанням механічних паливних насосів і вибір раціональних параметрів процесу впорскування, які забезпечать ефективну та безвідмовну роботу дизельного двигуна в екстремальних умовах, є важливим науково-практичним завданням.

### Використання тупикових каналів (реалізація хвильових явищ під час упорскування палива для подвійного ходу голки розпилювача)

Використання хвильових явищ у паливній апаратурі дизельних двигунів групою науковців [43] застосовувалося для організації ступінчастої подачі палива до циліндр дизеля.

Під час проведеного дослідження автор [43] отримав такі результати та сформував висновки:

- доведена можливість отримання в паливній системі з розпилювачем закритого типу законів паливоподачі з різними параметрами за допомогою тупикових каналів у поєднанні з низьким тиском попереднього затягування пружини голки форсунки;

- для отримання різних законів подачі палива запропонована система паливоподачі, яка містить розпилювач закритого типу, пелюстковий клапан з розвантажувальним отвором, тупиковий канал з підведенням палива до форсунки з магістралі низького тиску.

### Використання багатофазного впорскування палива

Удосконалення конструкції паливної апаратури сучасних дизельних двигунів дозволяє реалізувати до 9 упорскувань палива за цикл (системи типу Common Rail) [36]. Водночас вдається домогтися зниження жорсткості робочого процесу, знизити рівень шуму та вібрацій двигуна, поліпшити його екологічні показники (насамперед знизити димність відпрацьованих газів і викиди оксидів азоту) за умови забезпечення високої кономії палива [3–5].

Стратегія багатофазного впорскування палива, яку реалізує компанія MTU на своїх дизельних двигунах, у вигляді графіків наведена на рис. 9 [4, 5].

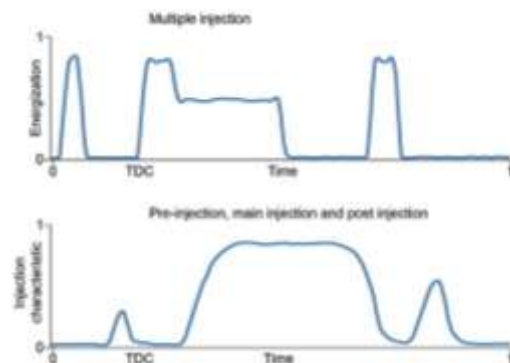


Рис. 9. Стратегія багатофазного впорскування палива в дизельних двигунах фірми MTU [5]

Швидкість упорскування визначає, коли і скільки палива впорскується до циліндра. Для зменшення кількості викидів шкідливих речовин і зниження рівня споживання палива стратегія розвитку системи впорскування палива для двигунів MTU поділяє послідовність упорскування палива на три окремі фази (рис. 9). Час початку впорскування, тривалість і амплітуда визначаються відповідно до карти продуктивності двигуна.

Основна фаза впорскування подає паливо для забезпечення вихідної потужності двигуна. Фаза попереднього упорскування ініціює попереднє згоряння, щоб забезпечити контрольоване згоряння палива на фазі основного впорскування.

Це зменшує викиди оксидів азоту, оскільки різке спалювання запобігає високим піковим температурам. Наступна після процесу основного впорскування фаза зменшує викиди твердих часточок. Це покращує процес змішування палива та повітря під час пізньої фази згоряння для підвищення температури в камері згоряння, що також сприяє окисленню сажі [5].

#### *Збільшення кута та тиску впорскування палива*

У роботах авторів [44, 45] зазначено, що якість процесу згоряння та токсичність відпрацьованих газів можна покращити, використовуючи стратегію багатофазного впорскування палива без зміни конструкції самого двигуна. Вплив багатофазного впорскування палива на показники дизельного двигуна з  $N_e = 370$  кВт за  $n = 2200$  хв<sup>-1</sup> було досліджено під час порівняльних моторних випробувань. Різні кути випередження впорскування та тиски палива використовувались як чинники, які впливають на умови сумішоутворення, згоряння та формування токсичних речовин.

Загальний висновок щодо роботи авторів [45]:

- збільшення кута випередження впорскування палива призводить до збільшення ефективного ККД дизеля, зниження питомої ефективної витрати палива та зниження викидів твердих часточок з відпрацьованими газами, що пояснюється збільшенням максимальної температури циклу, збільшенням температури відпрацьованих газів і підвищенням викидів NO<sub>x</sub>;

- збільшення тиску впорскування палива дозволило на 52 % знизити димність відпрацьованих газів;

- загальним висновком є те, що збільшення тиску та кута впорскування палива дозволяє поліпшити паливну економію та знизити димність відпрацьованих газів, але призводить до збільшення жорсткості процесу згоряння та максимальних температур у циліндрі дизеля.

#### *Вбір закону паливоподачі та швидкості впорскування*

Вплив закону паливоподачі та швидкості впорскування на продуктивність і викиди дизельного двигуна, що працює на дизельному паливі та біодизелі В20, розглянуто в роботі авторів [46] (рис. 10).

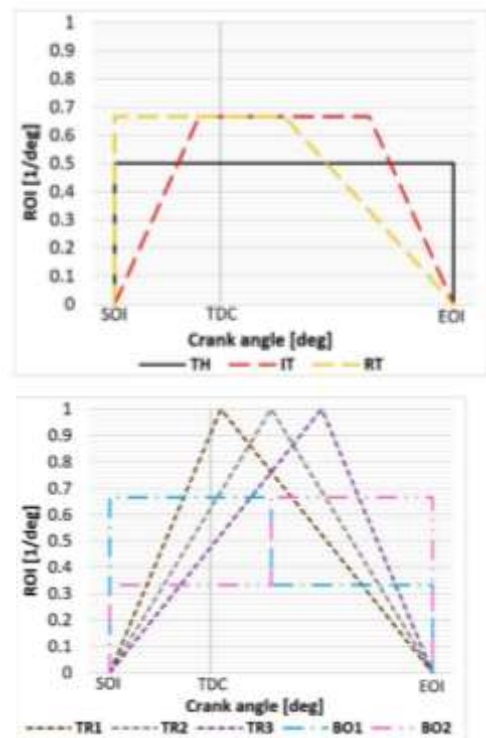


Рис. 10. Вихідні та модифіковані закони паливоподачі [46]

Автори роботи [46] отримали такі розрахункові результати (на режимі максимального крутного моменту та номінальної потужності): трикутна форма закону паливоподачі дозволяє подати до циліндра більшу кількість палива до моменту самозаймання, що в подальшому сприяє збільшенню швидкості згоряння палива та підвищенню ефективного ККД.

#### *Оптимізація конструкції розпилювача паливної форсунки*

Зміна конструктивних параметрів розпилювача паливної форсунки дозволяє вплива-

ти на умови впорскування палива, його розпилювання в КЗ та ефективність роботи двигуна [4–6].

Кількість та взаєморозташування соплових отворів розпилювача паливної форсунки, їхній діаметр та спосіб їх застосування виробники вибирають з огляду на конструктивні особливості двигуна, зокрема на конфігурації КЗ та умови наповнення циліндра свіжим повітрям [5, 6].

Основною вимогою до умов формування та розповсюдження паливних факелів у КЗ є відсутність взаємоперекриття сусідніх паливних факелів (що призводить до формування зон майже повністю заповнених паливом і його паром, що також сприяє різкому погіршенню екологічних показників дизельного двигуна), а також зменшення частки палива, яке потрапляє на стінки КЗ (зменшення частки плівкості) та перехід від об'ємно-плівкового до об'ємного способу сумішоутворення.

Існує декілька сучасних робіт, спрямованих на поліпшення умов течії палива в соплових отворах розпилювача через організацію додаткових каналів, які дозволяють зменшити локальну швидкість потоку палива і сприяють зменшенню впливу гідродинамічної кавітації у соплових отворах розпилювача паливної форсунки на умови впорскування та розпилювання палива [6–8].

Під час проведеного порівняльного дослідження автори отримали такі результати:

- V- та Y-подібні форми соплових отворів дозволяють забезпечити процес упорскування зі збільшеною масовою витратою палива на 15–25 %;

- під час використання V- та Y-подібних форм соплових отворів вдається реалізувати процес упорскування без виникнення гідродинамічної кавітації. Що позитивно позначається на ресурсі розпилювача та на умовах упорскування й розпилювання палива;

- у разі використання Y-подібної форми соплових отворів зменшується розмір крапель у процесі розпилювання, що пояснюється додатковим збуренням потоку палива.

Під час проведеного дослідження було визначено, що збільшення тиску впорскування та кількості соплових отворів суттєво впливає на потужність двигуна.

#### *Використання системи EGR*

Згідно з результатами сучасних досліджень, одним із способів по поліпшення умов роботи ДВЗ, зокрема дизельних, є ви-

користання системи EGR, яка дозволяє зменшити швидкість збільшення тиску під час згоряння та поліпшити екологічні показники двигуна [47–50].

Так, у роботі авторів [47] наведено порівняльні результати аналізу впливу системи EGR на екологічні показники швидкохідного автомобільного дизеля номінальною потужністю  $N_e = 73,5$  кВт при  $n = 4200$  хв<sup>-1</sup>. Ступінь рециркуляції відпрацьованих газів змінювався з 0 до 0,15.

Під час проведених порівняльних досліджень авторами [47] було визначено таке: найбільш ефективним є використання системи EGR під час роботи дизеля із зовнішньою характеристикою за частотах обертання колінчастого вала, наближних до максимального крутного моменту, у цьому випадку викиди оксидів азоту (NO<sub>x</sub>) знижуються майже на 50 %, а викиди твердих часточок – на 20 %.

#### **Основні результати проведеного порівняльного дослідження**

Удосконалення робочого процесу досліджуваного дизеля (типу 6 Ч 15/15) може здійснюватися за трьома напрямками:

- удосконалення КЗ з метою оптимізації радіальної та осьової складових повітряного потоку, необхідні турбулізації повітря в III, IV періодах згоряння, а також для уникнення влучення паливного факела на поверхню КЗ у поршні;

- вибір тангенціального руху повітря внаслідок профілювання впускного каналу;

- оптимізація ПА, зокрема закону подачі палива, напрямки осей розпиленого факела палива, діаметра та кількості соплових отворів розпилювача.

Науково-практичними рекомендаціями з поліпшення умов роботи швидкохідного форсованого дизеля типу 6Ч 15/15 (з урахуванням особливостей конструкції та способу сумішоутворення і згоряння) є такі:

- на основі проведеного аналізу літератури та конструкції визначено, що в проектованого двигуна реалізоване об'ємне сумішоутворення;

- довжини паливних факелів достатньо для випаровування палива в об'ємі КЗ;

- на цьому етапі робіт профілювання впускного каналу не потрібно, тому під час роботи з розроблення форми КЗ можна використовувати досвід робіт як з об'ємного сумішоутворення, так і частково робіт з паливною апаратурою типу Common Rail;

- для зниження швидкості збільшення тиску під час згоряння (жорсткості процесу) рекомендується використовувати дві секції паливного насоса на одну форсунку (для реалізації двофазного упорскування палива) або форсунку з двома пружинами (для реалізації ступінчастого упорскування палива);

- для керування фазами згоряння рекомендується використовувати зовнішню систему EGR [53–57]. Це дозволить реалізувати процес згоряння в потрібний момент часу (під час обертання колінчастого вала) в процесі подачі пилотної дози палива.

### Висновки

Поставлена в роботі мета досягнута.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішені такі завдання:

- здійснено аналіз публікацій з дослідження процесів упорскування, сумішоутворення та згоряння в дизелях з відкритою камерою згоряння;

- проведено аналіз систем повітропостачання та паливоподачі сучасних двигунів і методів їх вдосконалення;

- вибрано найбільш раціональний спосіб удосконалення процесів наповнення, сумішоутворення та згоряння для сучасного форсованого транспортного дизеля;

- визначено, що використання двофазного впорскування палива для форсованих дизельних двигунів дозволяє ефективно впливати на перебіг робочого процесу, зокрема знижувати швидкість збільшення тиску під час згоряння до 50 %, зменшувати максимальний тиск згоряння на 5–10 %, змінювати тип кривої тепловиділення та поліпшувати екологічні показники й умови роботи двигуна (реалізується через використання двох секцій паливного насоса на одну форсунку, а також через використання форсунок з двома пружинами та реалізацію хвильових явищ у паливній системі – тупикових каналів) за пилотної дози палива в межах 15–25 % від основної циклової подачі;

- використання багатозфазного впорскування палива для форсованих дизельних двигунів також дозволяє ефективно впливати на перебіг робочого процесу (можлива кількість упорскувань досягає 9 за цикл), водночас системи типу Common-Rail мають обмежене застосування в двигунах наземних транспортних машин, що пояснюється високими вимогами до якості палива та технічного обслуговування;

- збільшення кута та тиску впорскування палива дозволяє підвищити ефективний ККД

дизеля, а отже, зменшити питому ефективну витрату палива та знизити масовий викид твердих часточок, але сприяє збільшенню максимальної температури та тиску циклу та знижує ресурс двигуна;

- вбір закону паливоподачі та швидкості впорскування дозволяє значно поліпшити експлуатаційні показники дизеля, зокрема використання трикутного закону паливоподачі зі збільшеною швидкістю впорскування палива дозволяє за менших кутів випередження впорскування палива (менших на 5–10 град п.к.в. до ВМТ) скоротити час згоряння та підвищити ефективний ККД двигуна на 2–5 %, але такий метод потребує використання систем типу Common-Rail;

- оптимізація конструкції розпилювача паливної форсунки дозволяє поліпшити умови впорскування та розпилювання палива, підвищити ресурс розпилювача, збільшити швидкість подачі палива до циліндра та сприяє поліпшенню експлуатаційних показників дизеля, зокрема використання V та Y подібних соплових отворів дозволяє уникнути умов, через які виникають гідродинамічної кавітації у соплових отворах розпилювача та сприяє економії палива на 2–4 % завдяки скороченню фази згоряння;

- використання системи EGR (зі ступенем рециркуляції в межах 0,1–0,15) дозволяє ефективно впливати на фази згоряння в дизелі завдяки збільшеній теплоємності очищених від сажі та охолоджених відпрацьованих газів за зовнішньої рециркуляції, водночас поліпшуються екологічні показники дизеля (викиди NO<sub>x</sub> знижуються майже на 50 %, а викиди твердих часточок – на 20 %) і зменшується швидкість збільшення тиску під час згоряння (на 1–5 %) у разі підвищення питомої ефективної витрати палива в межах 1–1,5 %.

- розроблено науково-практичні рекомендації з поліпшення умов роботи швидкохідного форсованого дизеля типу 6Ч 15/15.

### Література

1. Experimental diesel spray characterization of the medium-duty injector with single- and multi-hole nozzle configurations under non-reacting, non-vaporizing conditions / J.-W. Park et al. *Frontiers Mech. Eng.* 2022. Vol. 8. P. 1–7. URL: <https://doi.org/10.3389/fmech.2022.931377> (дата звернення: 21.11.2025).
2. Prediction formula of Aerodynamic Drag Reduction in Multiple-Vehicle Platooning Based on Wake Analysis and On-Road Experiments, SAE Int / K. Tadakuma et al. *J. Passenger Cars – Mech. Syst.* 2016. Vol. 9, № 2. P. 645–656.

- URL: <https://doi.org/10.4271/2016-01-1596> (дата звернення: 21.11.2025).
3. Марченко А. П., Міщенко М. Т., Міщенко С. Г. Аналіз ефективності та перспектив розвитку силових установок наземного транспорту. Двигуни внутрішнього згоряння. 2025. № 1. С. 3–14. URL: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2025.1.01>.
  4. Battistoni M., Som S., Powell C. F. Highly resolved Eulerian simulations of fuel spray transients in single and multi-hole injectors: Nozzle flow and near-exit dynamics. *Fuel*. 2019. Vol. 251. P. 709–729. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.076> (дата звернення: 21.11.2025).
  5. Spray and flame characteristics of wall-impinging diesel fuel spray at different wall temperatures and ambient pressures in a constant volume combustion vessel / B. Chen та ін. *Fuel*. 2019. Vol. 235. P. 416–425. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.07.154> (дата звернення: 21.11.2025).
  6. A numerical study on the in-nozzle cavitating flow and near-field atomization of cylindrical, V-type, and Y-type intersecting hole nozzles using the LES-VOF method / Y. Deng та ін. *Green Process. Synthesis*. 2022. Vol. 11. № 1. P. 129–142. URL: <https://doi.org/10.1515/gps-2022-0015> (дата звернення: 21.11.2025).
  7. Effects of Multiple Injection Strategies on Heavy-Duty Diesel Energy Distributions and Emissions Under High Peak Combustion Pressures / Z. Zhang та ін. *Frontiers Energy Res.* 2022. Vol. 10. P. 1–14. URL: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.857077> (дата звернення: 21.11.2025).
  8. Zhang H., Hasegawa R., Ogawa H. Improvement in DME-HCCI Combustion with Ethanol as a Low-Temperature Oxidation Inhibitor *SAE Int. J. Fuels Lubricants*, 2011. Vol. 5, № 1. P. 41–50. URL: <https://doi.org/10.4271/2011-01-1791> (дата звернення: 21.11.2025).
  9. Авраменко А. М. Сучасні методи до-слідження економічних, екологічних та ресурсних показників дизельних двигунів: монографія. Харків: ПП-Маш НАН України, 2019. 204 с. ISBN 978-966-02-9043-3.
  10. Система двостадійного впорскування палива за допомогою гідромеханічної паливної апаратури: пат. 150726 Україна, МПК (2022.01) F02D 41/10, F02D 1/00 (2006.01), F02M 45/02 (2006.01). № u 2021 06729; заявл. 29.11.2021; опубл. 30.03.2022, Бюл. № 13. 3 с.
  11. Прохоренко А. О., Кравченко С. С., Солодкий Є. І. Організація двостадійного впорскування палива в циліндр дизеля гідромеханічною паливною апаратурою. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я *Information technologies: science, engineering, technology, education, health: тези доп. 30-ї Міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2022*, 19–21 жовт. 2022 р. Харків: НТУ "ХПІ", 2022. С. 107.
  12. Покращення екологічності дизелів з гідромеханічною паливною апаратурою застосуванням двостадійного впорскування палива в циліндр / А. О. Прохоренко та ін. *Проблеми техногенно-екологічної безпеки в сфері цивільного захисту*. 2022. С. 137–139.
  13. Jena A., Agarwal A. *Strategical Evolution of Clean Diesel Combustion*. *Adv. Combustion Sustain. Transport. Energy, Environ., Sustainability*, Springer, Singapore. 2022. P. 9–42. URL: [https://doi.org/10.1007/978-981-16-8418-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-16-8418-0_2)
  14. Knecht W. *Modern Diesel Combustion*. *Des. Develop. Heavy Duty Diesel Engines*. Energy, Environ., Sustainability. 2019. P. 17–65, Springer, Singapore. URL: [https://doi.org/10.1007/978-981-15-0970-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-15-0970-4_2)
  15. Effect of Various Supercharger Boost Pressure to in-Cylinder Pressure and Heat Release Rate Characteristics of Direct Injection Diesel Engine at Various Engine Rotation / E.W. Anggono et al. *E3S Web Conf.*, 2019. Vol. 130. P. 1–9. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913001036> (дата звернення: 21.11.2025).
  16. Simulation analyses of the fuel injection system with two-spring injector for diesel engines / Y. Dong et al. *Neiranji Gongcheng. Chin. Internal Combustion Engine Eng.* Vol. 26, № 5. P. 54–58.
  17. Choi M., Park S. Optimization of multiple-stage fuel injection and optical analysis of the combustion process in a heavy-duty diesel engine. *Fuel Process. Technol.* 2022. Vol. 228. P. 1–8. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.107137> (дата звернення: 21.11.2025).
  18. Hiroyasu H. Diesel engine combustion and its modeling. Міжнародний симпозиум з діагностики та моделювання процесів згоряння в поршневіх двигунах (COMODIA-85). Токуо, 1985. P. 53–75.
  19. Effect of engine variables on combustion characteristics of a dual fuel engine powered by neem oil methyl ester and producer gas / S. S. Halewadimath et al. *Halewadimath Int. J. Ambient Energy*, 2019. P. 1–13. URL: <https://doi.org/10.1080/01430750.2019.1696889> (дата звернення: 21.11.2025).
  20. Laramée R. S., Schneider J., Hauser H. Texture-based flow visualization on isosurfaces. Constance, Germany: IEEE TCVG Symposium on Visualization (VisSym); 19–21 May 2004. P. 85–90.
  21. Jaichandar S., Eswara Prasath V. G., Annamalai K. Effects of tangential air passages to piston bowl on the performance of a DI diesel engine. *Int. J. Ambient Energy*, 2018. P. 1–10. URL: <https://doi.org/10.1080/01430750.2018.1562976> (дата звернення: 21.11.2025).
  22. Piston geometry effects in a light-duty, swirl-supported diesel engine: Flow structure characterization / F. Perini et al. *Perini Int. J. Engine Res.* 2017. Vol. 19. № 10. P. 1079–1098. URL: <https://doi.org/10.1177/1468087417742572> (дата звернення: 21.11.2025)/

23. End-to-end modeling of fuel injection via static coupling of internal flow and ensuing spray / R. Torelli et al. *Commun. Eng.* 2022. Vol. 1, № 1. P. 51–57. URL: <https://doi.org/10.1038/s44172-022-00038-z> (дата звернення: 21.11.2025).
24. “Swirl flaps/Tumble flaps”. Rheinmetall. URL: <https://www.ms-motorservice.com/int/en/technipedia/swirl-flaps-tumble-flaps-363> (дата звернення: 21.11.2025)
25. De Risi A. A Theoretical Investigation on the Effects of Combustion Chamber Geometry and Engine Speed on Soot and NO<sub>x</sub> Emissions. *ASME-ICE*, 1999. Vol. 99-ICE-207. № 33-1. P. 51–59.
26. Darlington T. L., Kahlbaum D., Thompson G. On-Road NO<sub>x</sub> Emission Rates from 1994-2003 Heavy-Duty Diesel Trucks. *SAE Int. J. Commercial Vehicles*, 2008. Vol. 1. № 1. P. 185–199. URL: <https://doi.org/10.4271/2008-01-1299> (дата звернення: 21.11.2025).
27. Effect of engine variables on combustion characteristics of a dual fuel engine powered by neem oil methyl ester and producer gas / S. S. Halewadimath et al. *Int. J. Ambient Energy*. 2019. P. 1–13. URL: <https://doi.org/10.1080/01430750.2019.1696889> (дата звернення: 21.11.2025).
28. “Qué es el efecto Turbulento en las cámaras de combustión – ingeniería y mecánica automotriz”. *Ingeniería y mecánica automotriz.com/que-es-el-efecto-turbulento-en-las-camaras-de-combustion/* (дата звернення: 21.11.2025).
29. Punov P., Evtimov T. Combustion optimization in a modern diesel engine by means of pre-injection strategy // *Scientific proc. XXIII INT. scientific-tech. conf. "trans & motauto '15"*. 2015. № 1. P. 88–91.
30. Majewski A., Jaaskelainen H. Diesel Emissions and Their Control // *Hannu Jaaskelainen SAE International з Product Code R-533*. 2023. P. 1–8.
31. Development and Assessment of an Integrated 1D-3D CFD Codes Coupling Methodology for Diesel Engine Combustion Simulation and Optimization / F. Millo et al. *Energies*, 2020. Vol. 13. № 7. P. 1–9. URL: <https://doi.org/10.3390/en13071612> (дата звернення: 21.11.2025).
32. Investigation of Sectional-Stage Loading Strategies on a Two-Stage Turbocharged Heavy-Duty Diesel Engine under Transient Operation with EGR // *Energies*. 2018. Vol. 11, № 1. P. 67–69. URL: <https://doi.org/10.3390/en11010069> (дата звернення: 21.11.2025).
33. Zamboni G., Sarobianco M., Pham D. Effects of rail pressure control on fuel consumption, emissions and combustion parameters in a turbocharged diesel engine // *Cogent Eng.* 2020. Vol. 7, № 1. P. 1–21. URL: <https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1724848> (дата звернення: 21.11.2025).
34. Investigation of major factors that cause diesel NO<sub>x</sub> formation and assessment of energy and exergy parameters using e-diesel blends / M. N. Nabi et al. *Fuel*, 2021. Vol. 292. P. 1–12. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120298> (дата звернення: 21.11.2025).
35. Fuel injection and combustion study by the combination of mass flow rate and heat release rate with single and multiple injection strategies / Z. Wang et al. *Fuel Process. Technol.* 2015. Vol. 132. P. 118–132. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.11.024> (дата звернення: 21.11.2025).
36. Implementation of Common Rail Direct Injection System and Optimization of Fuel Injector Parameters in an Experimental Single-Cylinder Diesel Engine / Y. H. Teoh et. al. *Processes*. 2020. Vol. 8. № 9. P. 1–22. URL: <https://doi.org/10.3390/pr8091122> (дата звернення: 21.11.2025).
37. Design and advanced manufacturing of electromagnetic interference shielding materials / J. Liu et. al. *Mater. Today*. 2023. P. 245–272. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2023.03.022> (дата звернення: 21.11.2025)
38. Electromagnetic interference analysis of magnetic resistance sensors inside a projectile under complex electromagnetic environments / Q. Guo et al. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2013. Vol. 418. P. 1–8. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/418/1/012082> (дата звернення: 21.11.2025).
39. Problems based on CAM Profiles (Solved) - Engg. Tutorials. *Engineering Tutorials*. URL: <https://engineering.myindialist.com/2013/solved-problems-based-on-cam-profiles-kinematics-of-machines-tutorials> (date of access: 06.08.2024).
40. Kumaresan M., Devaradjane G. Effect of two-springs split injection on the performance and emission characteristics of diesel-oxygenated blends in a DI diesel engine. *Indian J. Eng. Mater. Sci.* 2012. Vol. 19. № 6. P. 411–416.
41. Muhssen H. S., Bereczky Á., Zöldy M. Effects of Auto-Mechanical Diesel Pump Utilization and Diesel Injection Timing on the Fuel Energy Share, Combustion, Performance, and Emissions of NG-Diesel Naturally Aspirated Engine at Constant Speed and Intermediate to High Load // *Results Eng.* 2025. P. 1–21. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104912> (дата звернення: 21.11.2025).
42. Pat. CN100489300C Chania, МПК (2022.01) F02M 61/16 (2006.01). Double-spring fuel injector. 2007.
43. Тимченко І. І. Вплив закону подачі палива на роботу однокамерного тракторного дизеля в різних умовах сумішоутворення: дис. ...канд. техн. наук. Харків, 1970. 224 с.
44. Kang S., Lee S., Bae C. Effects of Multi-Stage Split Injection on Efficiency and Emissions of Light-Duty Diesel Engine. *Energies*. 2022. Vol. 15, № 6. P. 1–9. URL: <https://doi.org/10.3390/en15062219> (дата звернення: 21.11.2025).

45. Fayad M. A. Effect of fuel injection strategy on combustion performance and NO<sub>x</sub>/smoke trade-off under a range of operating conditions for a heavy-duty DI diesel engine. *SN Appl. Sci.* 2019. Vol. 1. № 9. P. 1–10. URL: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1083-2> (дата звернення: 21.11.2025).
46. Niculae A. L., Chiriac R., Racovitza A. Effects of Injection Rate Shape on Performance and Emissions of a Diesel Engine Fuelled by Diesel and Biodiesel B20. *Appl. Sci.* 2022. Vol. 12. № 3, P. 1–18. URL: <https://doi.org/10.3390/app12031333> (дата звернення: 21.11.2025).
47. Парсаданов І. В., Маклаков О. М. Оцінка ефективності рециркуляції відпрацьованих газів за зовнішньою характеристикою автомобільного дизеля [Електронний ресурс]. Вісник Національного транспортного університету. 2014. № 29(1). С. 234–239. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vntu\\_2014\\_29\(1\)\\_30](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vntu_2014_29(1)_30).
48. Doppalapudi A. T., Azad A. K., Khan M. M. K. Combustion chamber modifications to improve diesel engine performance and reduce emissions: A review. *Renewable Sustain. Energy Rev.* 2021. Vol. 152. P. 1–8. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111683> (дата звернення: 21.11.2025).
49. Abdelrazek M. K., Abdelaal M. M., El-Nahas A. M. Piston bowl shape and biodiesel fuel effects on combustion and emission of diesel engines. *J. Eng. Appl. Sci.* 2022. Vol. 69, № 1. P. 1–14. URL: <https://doi.org/10.1186/s44147-022-00158-5> (дата звернення: 21.11.2025).
50. Febbo M. New Volvo Semi Truck Uses Wavy Pistons to Make 1,850 LB-FT of Torque”. *The Drive*. URL: <https://www.thedrive.com/news/new-volvo-semi-truck-uses-wavy-pistons-to-make-1850-lb-ft-of-torque> (дата звернення: 21.11.2025).
51. Study of Ultra-low Emissions Diesel Combustion Systems by Synergetic Application of 3D-CFD and Single Cylinder Engine. Salvatore Roggio. *Politecnico di Torino* 2023. P. 137.
52. The Research and Development of a Jet Disturbance Combustion System for Heavy-Duty Diesel Engines / Y. Liu et al. *Energies*. 2024. Vol. 17. № 5. P. 1–9. URL: <https://doi.org/10.3390/en17051065> (дата звернення: 21.11.2025).
53. Zheng M., Reader G. T., Hawley J. G. Diesel engine exhaust gas recirculation—a review on advanced and novel concepts // *Energy Convers. Manage.* 2004. Vol. 45. № 6. P. 883–900. URL: [https://doi.org/10.1016/s0196-8904\(03\)00194-8](https://doi.org/10.1016/s0196-8904(03)00194-8) (дата звернення: 21.11.2025).
54. Dietsche K.-H., Klingebiel M. (editors). *Bosch Automotive Handbook*, 7th edition, 2007.
55. Heywood J. B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw Hill, New York. 1988.
56. Flexible engine management for innovative combustion systems / L. Däubler et al. *MTZ Worldw.* 2005. Vol. 66. № 9. P. 24–25. URL: <https://doi.org/10.1007/bf03227784> (дата звернення: 21.11.2025).
57. The development of a semi-empirical model for rapid NO<sub>x</sub> concentration evaluation using measured in-cylinder pressure in diesel engines / D. J. Timoney et al. *Proc. Institution Mech. Engineers, Part D: J. Automobile Eng.*, 2005. Vol. 219, № 5. P. 621–631. URL: <https://doi.org/10.1243/095440705x11095> (дата звернення: 21.11.2025).

#### References

1. Park, J.-W. et al. (2022). Experimental diesel spray characterization of the medium-duty injector with single- and multi-hole nozzle configurations under non-reacting, non-vaporizing conditions. *Frontiers Mech. Eng.*, vol. 8. P. 1–7. URL: <https://doi.org/10.3389/fmech.2022.931377> (дата звернення: 21.11.2025).
2. Tadakuma, K., Doi, T., Shida, M., Maeda, K. (2016). Prediction formula of Aerodynamic Drag Reduction in Multiple-Vehicle Platooning Based on Wake Analysis and On-Road Experiments. *SAE Int. J. Passenger Cars – Mech. Syst.* 2016, vol. 9, № 2. P. 645–656. URL: <https://doi.org/10.4271/2016-01-1596> (дата звернення: 21.11.2025).
3. Marchenko, A. P., Mishchenko, M. T., Mishchenko, S. G. (2025). Analysis of the efficiency and perspectives of the development of power plants of land transport // *Intern. Combust. Engines*. № 1. P. 3–14. URL: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2025.1.01> (дата звернення: 21.11.2025).
4. Battistoni, M., Som, S., Powell, C. F. (2019). Highly resolved Eulerian simulations of fuel spray transients in single and multi-hole injectors: Nozzle flow and near-exit dynamics. *Fuel*, vol. 251. P. 709–729. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.076> (дата звернення: 21.11.2025).
5. Chen, B. et al. (2019). Spray and flame characteristics of wall-impinging diesel fuel spray at different wall temperatures and ambient pressures in a constant volume combustion vessel // *Fuel*, vol. 235. P. 416–425. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.07.154> (дата звернення: 21.11.2025).
6. Deng, Y. et al. (2022). A numerical study on the in-nozzle cavitating flow and near-field atomization of cylindrical, V-type, and Y-type intersecting hole nozzles using the LES-VOF method // *Green Process. Synthesis*. 2022, vol. 11, № 1. P. 129–142. URL: <https://doi.org/10.1515/gps-2022-0015> (дата звернення: 21.11.2025).
7. Zhang, Z. et al. (2022). Effects of Multiple Injection Strategies on Heavy-Duty Diesel Energy Distributions and Emissions Under High Peak Combustion Pressures *Frontiers // Energy Res.* 10. P. 1–14. URL: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.857077> (дата звернення: 21.11.2025).
8. Zhang, H., Hasegawa, R., Ogawa, H. (2011). Improvement in DME-HCCI Combustion with Ethanol as a Low-Temperature Oxidation Inhibitor // *SAE Int. J. Fuels Lubricants*, vol. 5,

- № 1. P. 41–50. URL: <https://doi.org/10.4271/2011-01-1791> (дата звернення: 21.11.2025).
9. Avramenko, A. M. (2019). Suchasni metodi dosli djennya ekonomichnih, ekologichnih ta resursnih pokazniki v dizel nih dviguni v: monografiya. Harkiv: IPMash NAN Ukraini, 204 p. ISBN 978-966-02-9043-3.
10. Pat. 150726 Ukrayina, MPK (2022.01) F02D 41/10, F02D 1/00 (2006.01), F02M 45/02 (2006.01). Systema dvostadiynoho vprorskuvannya palyva za dopomohoyu hidromekhanichnoyi palyvnoyi aparatury. № u 2021 06729; zayavl. 29.11.2021; opubl. 30.03.2022, Byul. № 13. 3 s.
11. Prokhorenko, A. O., Kravchenko, S. S., Solodky, E. I. (2022). Organization of two-stage combustion of fire into a diesel cylinder using hydromechanical fire equipment. Information technologies: science, technology, technology, lighting, healththeses add. 30th Mizhnar. scientific-practical conf. MicroCAD-2022, 19–21 June 2022 / ed. E. I. Falcon; way of life G. V. Lisachuk. Kharkiv: NTU "KhPI", 2022. P. 107.
12. Prokhorenko, A. O., Kravchenko, S. S., Kuzmenko, A. P., Solodky, E. I. (2022). Improving the environmental friendliness of diesel engines with hydromechanical firing equipment by stagnation of two-stage injection firing into the cylinder // Problems of technogenic-ecological safety in the sphere of civil protection Problems of technogenic-ecological safety security in the sphere of civil protection. P. 137–139.
13. Jena, A. Agarwal, A. (2022). Strategical Evolution of Clean Diesel Combustion. Adv. Combustion Sustain. Transport. Energy, Environ., Sustainability, Springer, Singapore. P. 9–42. URL: [https://doi.org/10.1007/978-981-16-8418-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-16-8418-0_2)
14. Knecht, W. (2019). Modern Diesel Combustion Des. Develop. Heavy Duty Diesel Engines. Energy, Environ., Sustainability. P. 17–65. Springer, Singapore. URL: [https://doi.org/10.1007/978-981-15-0970-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-15-0970-4_2)
15. Anggono, EW., Ikoma, W., Chen, H., Liu, Z., Ichianagi, M., Suzuki, T. (2019). Effect of Various Supercharger Boost Pressure to in-Cylinder Pressure and Heat Release Rate Characteristics of Direct Injection Diesel Engine at Various Engine Rotation // E3S Web Conf, vol. 130, P. 1–8. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913001036> (дата звернення: 21.11.2025).
16. Dong, Y., Wang, Z., Gu, M., Weng, K., Zhao, Y. Simulation analyses of the fuel injection system with two-spring injector for diesel engines // Neiranji Gongcheng. Chin. Internal Combustion Engine Eng, vol. 26, № 5. P. 54–58.
17. Choi, M., Park, S. (2022). Optimization of multiple-stage fuel injection and optical analysis of the combustion process in a heavy-duty diesel engine // Fuel Process. Technol, vol. 228. P. 1–7. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.107137> (дата звернення: 21.11.2025).
18. Hiroyasu, H. (1985). Diesel engine combustion and its modeling. Міжнародний симпозиум з діагностики та моделювання процесів згоряння в поршневих двигунах (COMODIA-85). Токуо, P. 53–75.
19. Halewadimath, S. S., Banapurmath, N. R., Yaliwal, V. S., Nataraja, K. M. (2019). Effect of engine variables on combustion characteristics of a dual fuel engine powered by neem oil methyl ester and producer gas. Int. J. Ambient Energy. P. 1–13. URL: <https://doi.org/10.1080/01430750.2019.1696889> (дата звернення: 21.11.2025).
20. Laramee, RS, Schneider, J, Hauser, H. (2004). Texture-based flow visualization on isosurfaces. Constance, Germany: IEEE TCVG Symposium on Visualization (VisSym), 19–21 May 2004:85–90.
21. Jaichandar, S., Eswara Prasath, V. G., Annamalai, K. (2018). Effects of tangential air passages to piston bowl on the performance of a DI diesel engine. Int. J. Ambient Energy. P. 1–10. URL: <https://doi.org/10.1080/01430750.2018.1562976> (дата звернення: 21.11.2025).
22. Perini, F. et al. (2017). Piston geometry effects in a light-duty, swirl-supported diesel engine: Flow structure characterization. Int. J. Engine Res, vol. 19, № 10. P. 1079–1098. URL: <https://doi.org/10.1177/1468087417742572> (дата звернення: 21.11.2025).
23. Torelli, R., Pei, Y., Zhang, Y., Som, S. (2022). End-to-end modeling of fuel injection via static coupling of internal flow and ensuing spray. Commun. Eng, vol. 1, № 1. P. 1–11. URL: <https://doi.org/10.1038/s44172-022-00038-z> (дата звернення: 21.11.2025).
24. “Swirl flaps/Tumble flaps”. Rheinmetall. URL: <https://www.ms-motorservice.com/int/en/technipedia/swirl-flaps-tumble-flaps-363> (дата звернення: 21.11.2025).
25. De Risi, A. A. (1999). Theoretical Investigation on the Effects of Combustion Chamber Geometry and Engine Speed on Soot and NOx Emissions. ASME-ICE. Vol. 99-ICE-207, № 33-1. P. 51–59.
26. Darlington, T. L., Kahlbaum, D., Thompson, G. (2008). On-Road NOx Emission Rates from 1994-2003 Heavy-Duty Diesel Trucks. SAE Int. J. Commercial Vehicles, vol. 1, № 1. P. 185–199. URL: <https://doi.org/10.4271/2008-01-1299> (дата звернення: 21.11.2025).
27. Halewadimath, S. S., Banapurmath, N. R., Yaliwal, V. S., Nataraja, K. M. (2019). Effect of engine variables on combustion characteristics of a dual fuel engine powered by neem oil methyl ester and producer gas. Int. J. Ambient Energy. P. 1–13. URL: <https://doi.org/10.1080/01430750.2019.1696889> (дата звернення: 21.11.2025).
28. “Qué es el efecto Turbulento en las cámaras de combustión – ingeniería y mecánica automotriz”. Ingeniería y mecánica automotriz. URL: <https://www.ingenieriyamecanicaautomotriz.com/que-es-el-efecto-turbulento-en-las-camaras-de-combustion/> (дата звернення: 21.11.2025).
29. Punov, P., Evtimov, T. (2005). Combustion optimization in a modern diesel engine by means of pre-injection strategy // SCIENTIFIC PROC.

- XXIII INT. SCIENTIFIC-TECH. CONF. "trans & MOTAUTO '15". № 1. P. 88–91.
30. Majewski, A., Jaaskelainen, H. (2023). Diesel Emissions and Their Control. Hannu Jaaskelainen SAE International з Product Code R-533. P. 1135.
31. Millo, F., Piano, A., Peiretti, Paradisi, B., Marzano, M. R., Bianco, A., Pesce, F. C. (2020). Development and Assessment of an Integrated 1D-3D CFD Codes Coupling Methodology for Diesel Engine Combustion Simulation and Optimization. *Energies*, vol. 13, № 7. P. 1–21. URL: <https://doi.org/10.3390/en13071612> (дата звернення: 21.11.2025).
32. "Investigation of Sectional-Stage Loading Strategies on a Two-Stage Turbocharged Heavy-Duty Diesel Engine under Transient Operation with EGR", *Energies*. 2018, vol. 11, № 1. P. 67–69. URL: <https://doi.org/10.3390/en11010069> (дата звернення: 21.11.2025).
33. Zamboni, G., Capobianco, M., Pham, D. (2020). Effects of rail pressure control on fuel consumption, emissions and combustion parameters in a turbocharged diesel engine. *Cogent Eng*, vol. 7, № 1. P. 1–21. URL: <https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1724848> (дата звернення: 21.11.2025).
34. Nabi, M. N., Rasul, M. G., Arefin, M. A., Akram, M. W., Islam, M. T., Chowdhury, M. W. (2021). Investigation of major factors that cause diesel NO<sub>x</sub> formation and assessment of energy and exergy parameters using e-diesel blends. *Fuel*, vol. 292. P. 1–21. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120298> (дата звернення: 21.11.2025).
35. Wang, Z., Wyszynski, M. L., Xu, H., Abdullah, N. R., Piaszyk, J. (2015). Fuel injection and combustion study by the combination of mass flow rate and heat release rate with single and multiple injection strategies. *Fuel Process. Technol*, vol. 132, P. 118–132. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.11.024> (дата звернення: 21.11.2025).
36. Teoh, Y. H., How, H. G., Peh, C. G., Le, T. D., Nguyen, H. T. (2020). Implementation of Common Rail Direct Injection System and Optimization of Fuel Injector Parameters in an Experimental Single-Cylinder Diesel Engine. *Processes*, vol. 8, № 9. P. 1–8. URL: <https://doi.org/10.3390/pr8091122> (дата звернення: 21.11.2025).
37. Liu, J., Yu, M.-Y., Yu, Z.-Z., Nicolosi, V. (2023). Design and advanced manufacturing of electromagnetic interference shielding materials. *Mater. Today*. P. 245–272. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2023.03.022> (дата звернення: 21.11.2025).
38. Guo, Q., Gao, M., Lu, Z., Yang, P. (2013). Electromagnetic interference analysis of magnetic resistance sensors inside a projectile under complex electromagnetic environments. *J. Phys.: Conf. Ser*, vol. 418, P. 1–12. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/418/1/012082> (дата звернення: 21.11.2025).
39. Problems based on CAM Profiles (Solved) – Engg. Tutorials. *Engineering Tutorials*. URL: <https://engineering.myindialist.com/2013/solved-problems-based-on-cam-profiles-kinematics-of-machines-tutorials> (date of access: 06.08.2024).
40. Kumaresan, M., Devaradjane, G. (2012). Effect of two-springs split injection on the performance and emission characteristics of diesel-oxygenated blends in a DI diesel engine. *Indian J. Eng. Mater. Sci*, vol. 19, № 6. P. 411–416.
41. Muhssen, H. S., Bereczky, Á., Zöldy, M. (2025). Effects of Auto-Mechanical Diesel Pump Utilization and Diesel Injection Timing on the Fuel Energy Share, Combustion, Performance, and Emissions of NG-Diesel Naturally Aspirated Engine at Constant Speed and Intermediate to High Load. *Results Eng*. P. 1–12. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104912> (дата звернення: 21.11.2025).
42. Pat. CN100489300C Chania, МРК (2022.01) F02M 61/16 (2006.01). Double-spring fuel injector / 2007.
43. Timchenko, I. I. (1970). The infusion of the law of supply of fire into the work of a single-chamber tractor diesel engine in different minds is a crazy thing. Kharkiv: Kharkiv Polytechnic Institute. Dis. for free Secondary degree, Ph.D. tech. Sci. 224 p.
44. Kang, S., Lee, S., Baе, C. (2022). Effects of Multi-Stage Split Injection on Efficiency and Emissions of Light-Duty Diesel Engine // *Energies*, vol. 15, № 6. P. 1–8. URL: <https://doi.org/10.3390/en15062219> (дата звернення: 21.11.2025).
45. Fayad, M. A. (2019). Effect of fuel injection strategy on combustion performance and NO<sub>x</sub>/smoke trade-off under a range of operating conditions for a heavy-duty DI diesel engine. *SN Appl. Sci*, vol. 1, № 9. P. 1–10. URL: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1083-2> (дата звернення: 21.11.2025).
46. Niculae, A. L., Chiriac, R., Racovitza, A. (2022). Effects of Injection Rate Shape on Performance and Emissions of a Diesel Engine Fuelled by Diesel and Biodiesel B20. *Appl. Sci*, vol. 12, № 3. P. 1–21. URL: <https://doi.org/10.3390/app12031333> (дата звернення: 21.11.2025).
47. Parsadanov, I. V., Maklakov, O. M. (2014). Assessment of the efficiency of recycling of processed gases based on the current characteristics of an automobile diesel engine [Electronic resource]. *Bulletin of the [National Transport University]*. No. 29(1). P. 234–239. Access mode: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vntu\\_2014\\_29\(1\)\\_30](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vntu_2014_29(1)_30)
48. Doppalapudi, A. T., Azad, A. K., Khan, M. M. K. (2021). Combustion chamber modifications to improve diesel engine performance and reduce emissions: A review. *Renewable Sustain. Energy Rev*, vol. 152. P. 1–8. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111683> (дата звернення: 21.11.2025).
49. Abdelrazek, M. K., Abdelaal, M. M., El-Nahas, A. M. (2022). Piston bowl shape and biodiesel fuel effects on combustion and emission of diesel engines. *J. Eng. Appl. Sci*, vol. 69, № 1. P. 1–14.

- URL: <https://doi.org/10.1186/s44147-022-00158-5> (дата звернення: 21.11.2025).
50. Febbo, M. New Volvo Semi Truck Uses Wavy Pistons to Make 1,850 LB-FT of Torque. The Drive.]. URL: <https://www.thedrive.com/news/new-volvo-semi-truck-uses-wavy-pistons-to-make-1850-lb-ft-of-torque> (дата звернення: 21.11.2025).
51. Study of Ultra-low Emissions Diesel Combustion Systems by Synergetic Application of 3D-CFD and Single Cylinder Engine. Salvatore Roggio. Politecnico di Torino 2023. P. 137
52. Liu, Y., Su, W., Wu, B., Wang, J. (2024). The Research and Development of a Jet Disturbance Combustion System for Heavy-Duty Diesel Engines. *Energies*, vol. 17, № 5. P. 1–9. URL: <https://doi.org/10.3390/en17051065> (дата звернення: 21.11.2025).
53. Zheng, M., Reader, G. T., Hawley, J. G. (2004). Diesel engine exhaust gas recirculation – a review on advanced and novel concepts. *Energy Convers. Manage.*, vol. 45, № 6. P. 883–900. URL: [https://doi.org/10.1016/s0196-8904\(03\)00194-8](https://doi.org/10.1016/s0196-8904(03)00194-8) (дата звернення: 21.11.2025).
54. Dietsche, K.-H., Klingebiel, M. (2007) (editors), Bosch Automotive Handbook, 7th edition.
55. Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw Hill, New York.
56. Däubler, L., Gratzke, R., Predelli, O., Rempel, A. (2005). Flexible engine management for innovative combustion systems // *MTZ Worldw*, vol. 66, № 9. P. 24–25. URL: <https://doi.org/10.1007/bf03227784> (дата звернення: 21.11.2025).
57. Timoney, D. J., Desantes, J. M., Hernández, L., Lyons, C. M. (2005). The development of a semi-empirical model for rapid NOx concentration evaluation using measured in-cylinder pressure in diesel engines. *Proc. Institution Mech. Engineers, Part D: J. Automobile Eng.*, vol. 219, № 5. P. 621–631. URL: <https://doi.org/10.1243/095440705x11095> (дата звернення: 21.11.2025).

**Афонін Валентин Миколайович**, генеральний директор,  
тел. (057) 748-47-98,  
prm187@ukr.net,

Приватна фірма «Променерго»,  
вул. Довженка Олександра, 187-Г, м. Мерєфа,  
Харківський р-н, Харківська обл., Україна.

### Modern methods for improving the performance of high-power diesel engines

**Abstract. Problem.** The methods to improve the technical, economic and environmental performance of diesel engines are presented. The paper examines the impact of mixture formation and combustion processes, particularly, multi-stage fuel injection, on the course of the diesel engine working process. The air supply and fuel supply systems of modern engines and methods for their improvement are analysed. **Goal.** The aim of the work was to determine rational ways to improve the technical, economic and envi-

ronmental performance of diesel engines. **Methodology.** To achieve the goal, the following tasks were set and solved in the work: to conduct a review of publications on the study of the processes of mixture formation and combustion in diesel engines with an open combustion chamber; to conduct an analysis of air supply and fuel supply systems of modern engines and methods for their improvement; to choose the most rational method to improve the processes of filling, mixture formation and combustion for a modern high-power transport diesel engine; to develop scientific and practical recommendations for improving the operation conditions of a high-speed high-power diesel engine of the 6-cylinder, 4-stroke 15/15 type. **Results.** The work shows that the use of two-phase fuel injection for high-power diesel engines allows to effectively influence the course of the working process, in particular, to reduce the rate of pressure increase during combustion by up to 50 %, reduce the maximum combustion pressure by 5–10%, change the nature of the heat release curve and improve environmental performance and engine operating conditions (carried out by using two sections of the fuel pump per nozzle, applying nozzles with two springs and implementing wave phenomena in the fuel system – dead-end channels) with a pilot dose of fuel within 15–25 % of the main cyclic supply. The most rational methods of improving the filling, mixture formation and combustion processes for a high-power transport diesel engine of the 6-cylinder, 4-stroke 15/15 type have been selected. **Originality.** Scientific novelty lies in the formation of directions for improving the technical, economic and environmental performance of modern transport diesel engines using various approaches and design solutions. **Practical value.** It is shown that for high-power transport diesel engines with a small Hesselman combustion chamber, the most effective method to reduce the rate of pressure increase during combustion is to use two-phase or multi-phase fuel injection. The implementation of such an approach, using high-pressure fuel pumps with mechanical control, will allow, in the future, to increase the level of boosting the engine and maneuverability of the vehicle. **Keywords:** diesel engine, fuel equipment, fuel injection, working process, fuel consumption, rate of pressure increase during combustion.

**Valentyn Afonin**, General Director,  
tel. (057) 748-47-98,  
prm187@ukr.net,

Promenergo Private Company, 187-G Dovzhenka  
Oleksandra Str., Merєfa, 62472, Kharkiv district,  
Kharkiv region, Ukraine.

Стаття надійшла до редакції / Received:  
06.01.2026.

Прийнята до друку після рецензування / Revised  
and Accepted: 20.01.2026.

Дата публікації статті / Published: 11.05.2026.