№ 9(50) 2025
Наука і техніка сьогодні
серії: право, економіка, педагогіка, техніка, фізико-математичні науки

УДК 621.3

https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-9(50)-1163-1177

Євсєєва Наталія Олексіївна кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобілів, теплових двигунів та гібридних енергетичних установок, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, https://orcid.org/0000-0002-3398-6537

Рябошапка Наталя Євгеніївна старший викладач кафедри автомобілів, теплових двигунів та гібридних енергетичних установок, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, https://orcid.org/0000-0003-0334-8363

Сухонос Роман Федорович магістр, старший викладач кафедри автомобілів, теплових двигунів та гібридних енергетичних установок, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, https://orcid.org/0000-0001-9683-3389

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПРОЦЕСУ ПОПЕРЕДНЬОГО ВПОРСКУВАННЯ СИСТЕМИ COMMON RAIL НА ЕКОЛОГІЧНІСТЬ РОБОТИ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА

Анотація. Для підвищення ефективності та оптимізації робочих характеристик дизельних двигунів широко застосовуються стратегії багаторазового впорскування палива, що передбачають поділ єдиного циклу впорскування на окремі фази – попередню, основну та/або додаткову. Водночас численні дослідження свідчать, що за певних умов експлуатації вплив таких стратегій на формування викидів оксидів азоту (NO_x) та твердих частинок (сажі) може мати як позитивний, так і негативний характер, що безпосередньо залежить від вибору алгоритмів реалізації розподілу впорскування.

У данній статті представлено результати аналізу впливу параметрів попереднього впорскування палива в системі Common Rail на екологічні показники роботи дизельного двигуна внутрішнього згорання.

Досліджується вплив стратегій попереднього впорскування шляхом систематичної варіації його тривалості та часу витримки між попереднім і основним впорскуваннями за умови збереження сталої загальної маси впорскуваного палива. Отримані результати свідчать про існування різних механізмів, завдяки яким попереднє впорскування здатне модифікувати тривалість затримки запалювання, характер процесів горіння та рівень емісії в

умовах розпиленого полум'я залежно від моменту впорскування. Встановлено, що навіть надзвичайно коротке попереднє впорскування, яке не призводить до самозаймання, може істотно змінювати параметри запалювання та емісійні характеристики основного впорскування. Крім того, підтверджено, що режим горіння при одноразовому впорскуванні може бути трансформований шляхом його поділу на попередню та основну фази. Результати проведеного аналізу також демонструють, що скорочення часу витримки в межах дослідженого діапазону за фіксованого попереднього впорскування потенційно сприяє інтенсифікації процесів окислення сажі, хоча істотного впливу на швидкість її утворення при цьому не спостерігається.

Встановлено, що оптимальний вибір параметрів попереднього впорскування сприяє зниженню пікових значень концентрації сажі, поліпшенню процесів її окислення та, відповідно, підвищенню екологічності дизельного двигуна. Отримані результати можуть бути використані при вдосконаленні систем паливоподачі сучасних дизельних двигунів з метою зниження викидів шкідливих речовин.

Ключові слова: багатофазне впорскування, дизельний двигун, екологічність двигуна, попереднє впорскування, сажа, система Common Rail, тверді частки, викиди.

Yevsyeyeva Natalya Oleksivna PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automobiles, Heat Engines and Hybrid Energy Plants, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, https://orcid.org/0000-0002-3398-6537

Ryaboshapka Natalya Evgeniyevna Senior lecturer of the Department of Automobiles, Heat Engines and Hybrid Energy Plants, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, https://orcid.org/0000-0003-0334-8363

Sukhonos Roman Fedorovych MSc, Senior lecturer of the Department of Internal Combustion Engines, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, https://orcid.org/0000-0001-9683-3389

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE FEATURES OF THE COMMON RAIL PRE-INJECTION PROCESS ON THE ENVIRONMENTAL FRIENDLYNESS OF DIESEL ENGINE OPERATION

Abstract. To improve the efficiency and optimize the performance of diesel engines, multiple fuel injection strategies are widely used, which involve dividing a single injection cycle into separate phases - preliminary, main and/or additional. At

the same time, numerous studies show that under certain operating conditions, the impact of such strategies on the formation of nitrogen oxides (NOx) and particulate matter (soot) emissions can be both positive and negative, which directly depends on the choice of injection distribution algorithms.

This article presents the results of an analysis of the influence of fuel pre-injection parameters in the Common Rail system on the environmental performance of a diesel internal combustion engine.

The effect of pre-injection strategies is investigated by systematically varying its duration and the dwell time between the pre-injection and the main injection while maintaining a constant total mass of injected fuel. The results indicate the existence of various mechanisms by which pre-injection can modify the duration of the ignition delay, the nature of the combustion processes and the level of emissions under atomized flame conditions depending on the injection timing. It was found that even an extremely short pre-injection, which does not lead to self-ignition, can significantly change the ignition parameters and emission characteristics of the main injection. In addition, it was confirmed that the combustion regime during a single injection can be transformed by dividing it into a pre- and main phases. The results of the analysis also demonstrate that a reduction in the dwell time within the studied range at a fixed pre-injection potentially contributes to the intensification of soot oxidation processes, although no significant effect on the rate of its formation is observed.

It has been established that the optimal choice of pre-injection parameters contributes to the reduction of peak values of soot concentration, improvement of its oxidation processes and, accordingly, increase of environmental friendliness of the diesel engine. The obtained results can be used in the improvement of fuel supply systems of modern diesel engines in order to reduce emissions of harmful substances.

Keywords: diesel engine, Common Rail system, emissions, engine environmental friendliness, multi-phase injection, pre-injection, particulate matters, soot.

Постановка проблеми. Сучасні дизельні двигуни є основою транспортних і промислових силових установок, які широко застосовуються у вантажному та пасажирському транспорті, сільськогосподарській та військовій техніці, а також у стаціонарних енергетичних комплексах. Одним із ключових факторів, що визначають ефективність та екологічність дизельного двигуна, є система впорскування палива. Традиційні системи з механічним керуванням сьогодні вже не здатні забезпечити необхідну точність і гнучкість подачі палива. Тому на зміну їм прийшла система Common Rail, яка дозволяє реалізувати високий тиск впорскування, багатофазне подавання палива, точне електронне керування моментом і тривалістю впорскування.

Сучасні дизельні двигуни перебувають під постійним тиском жорстких екологічних норм (Euro 6, EPA Tier IV тощо), що вимагають суттєвого зниження викидів оксидів азоту (NO_x) та твердих частинок без втрати паливної економічності й надійності. Одним із найбільш ефективних шляхів досягнення такого компромісу є застосування систем Common Rail з багатофазним впорскуванням (pilot–main–post). Проте оптимізація кількості впорскувань, їх тривалості, інтервалів та тиску в паливній рейці є складним завданням, оскільки ці параметри одночасно впливають на ефективність процесу згорання, динаміку наростання тиску, рівень шуму, температуру відпрацьованих газів і показники токсичності. Недостатнє дослідження впливу різних комбінацій попереднього, основного та додаткового впорскувань на експлуатаційні характеристики двигуна ускладнює розробку оптимальних алгоритмів впорскування для різних режимів роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Більшість сучасних робіт показують, що підвищення тиску в паливній рейці до 200…250 МПа зменшує середній діаметр крапель, прискорює випаровування та покращує однорідність сумішоутворення. Дослідження багатофазного впорскування демонструють зниження шумності згорання та викидів NO_x при одночасному контролі утворення сажі. Параметри розділення імпульсів і дозування попередніх порцій критично впливають на перебіг початку згорання та тепловиділення.

Для поглибленого розуміння процесів багатофазного впорскування та визначення ролі окремих параметрів в алгоритмах його реалізації сьогодні виконується значна кількість досліджень [1–18]. З метою контролю шкідливих викидів проведено низку числових та експериментальних досліджень багатофазного впорскування дизельного палива, результати яких свідчать про його високу ефективність у зниженні як регульованих, так і нерегульованих компонентів відпрацьованих газів.

Водночас результатів досліджень видно, що за фіксованих умов роботи двигуна вплив на викиди NO_x та сажі значною мірою визначається алгоритмом розподілу впорскування, який може як зменшувати, так і збільшувати ці показники [2–4]. Загально визнано, що попереднє впорскування може впливати на зменшення часу затримки запалювання основного впорскування та на зниження викидів NO_x, CO і незгорілих вуглеводнів. Проте відомо, що попереднє впорскування може потенційно підвищувати викиди сажі основного впорскування [2, 5] у порівнянні з одноразовим впорскуванням.

Мета статті – здійснити аналіз впливу параметрів попереднього впорскування в системі Common Rail на процеси утворення та окислення сажі, визначити їх роль у формуванні екологічних характеристик роботи дизельного двигуна та окреслити можливості підвищення його екологічності шляхом оптимізації режимів багатофазного впорскування.

Виклад основного матеріалу. Common Rail є сучасною системою впорскування палива дизельних двигунів. Відмінність його від традиційних дизелів з низьким тиском подачі палива, в наявності паливного акумулятора (рампи), куди під великим тиском (понад 100 МПа) подається дизельне паливо, яке далі розподіляється між електричними форсунками з соленоїдними клапанами. Третє покоління систем Common Rail відрізняється застосуванням п'єзоелектричних форсунок для збільшення точності впорскування, кількісне збільшення фаз впорскування, а також підвищення тиску подачі палива в рампу (до 180 МПа). В системах Common Rail четвертого покоління досягається тиск 220…300 МПа.

Із початком застосування системи Common Rail суттєво покращились характеристики дизельних ДВЗ – зменшилися витрата палива, рівень шуму двигуна і токсичність відпрацьованих газів. Головною перевагою даної системи є широкий діапазон регулювання тиску палива і моменту початку впорскування, які досягаються завдяки розділенню процесів створення тиску і впорскування.

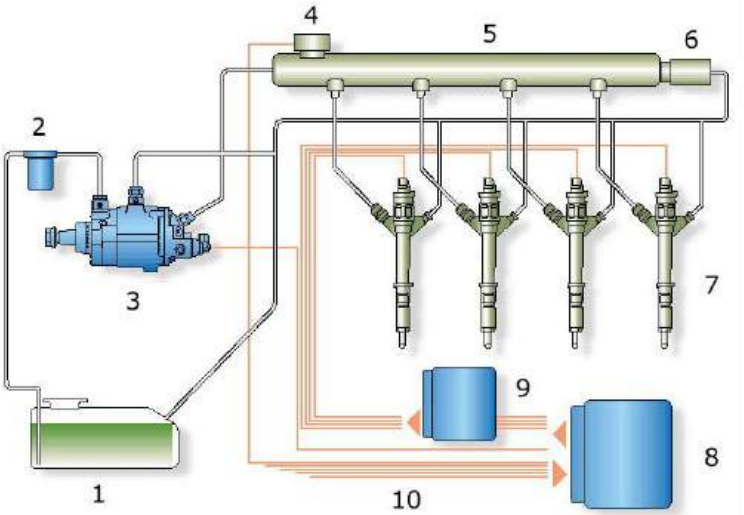


Рис. 1. Схема системи Common Rail [1]
1 – паливний бак; 2 – паливний фільтр; 3 – паливний насос високого тиску (ПНВТ); 4 – датчик тиску палива; 5 – паливна рампа; 6 – регулятор тиску; 7 – форсунки; 8 – електронний блок управління; 9 – підсилювальний блок

При розробці системи Common Rail (рисунок 1) було взято за основу систему із безпосереднім впорскуванням палива у циліндри двигуна. Одним з основних елементів системи є магістральній паливний насос високого тиску який нагнітає паливо в паливний акумулятор. ПНВТ сучасних двигунів з системою Common Rail створюють тиск в рампі понад 220…250 МПа. Тиск в

рампі утримується сталим за допомогою регулюючого клапана, який скидає надлишок в зворотню магістраль, назад до паливного баку. Кількість палива, що потрапляє до паливного насосу високого тиску (ПНВТ), регулюється за допомогою клапана дозування палива, який розташований на самому ПНВТ. Електронний блок управління, спираючись на показники датчиків, розраховує момент початку впорскування, а також його тривалість, і подає електричний імпульс на форсунки. Застосування форсунок з електричним керуванням (соленоїдні чи п'єзоелектричні) дозволяє більш точно керувати кількістю впорскуваного палива, а збільшення тиску впорскування покращує перемішування палива з повітрям у камері згорання. Для зниження вібрацій та шуму, а також покращення характеристик двигуна в різних режимах роботи (холодний пуск, різке прискорення тощо) електронний блок керування може виконувати одне чи кілька незначних впорскувань палива безпосередньо перед основним циклом впорскування. Такі впорскування підвищують швидкість займання основної порцій палива, знижують токсичність викидів, а також підвищують температуру відпрацьованих газів, що необхідно для вигоряння сажі в сажовому фільтрі.

Така система є простішою, аніж класична система з ПНВТ та форсунками, а також забезпечує майже сталий тиск в рампі навіть на низьких обертах двигуна, але має й свої недоліки – більш вибаглива до якості палива та повністю втрачає працездатність при розгерметизації будь-якого з елементів контуру високого тиску. Крім того соленоїдні чи п'єзоелектричні форсунки дорожчі, мають дещо менший ресурс, та потребують калібровки блоку управління після заміни.

На основі даних, що надходять від датчиків, блок управління двигуном визначає необхідну кількість палива, яке паливний насос високого тиску подає через клапан дозування палива. Насос накачує паливо в паливну рампу. Там воно перебуває під певним тиском, який забезпечує регулятор тиску палива.

В потрібний момент блок управління двигуном дає команду відповідним форсункам на початок впорскування і забезпечує визначену тривалість відкриття клапанів форсунки. Залежно від режимів роботи двигуна блок управління двигуном коригує параметри роботи системи впорскування.

Для забезпечення більш ефективної роботи двигуна в системі Common Rail реалізовано багатофазне впорскування палива протягом одного циклу роботи двигуна. При цьому розрізняють: попереднє впорскування, основне впорскування та додаткове впорскування.

Попереднє впорскування невеликої кількості палива відбувається перед основним впорскуванням для підвищення температури і тиску в камері згорання, завдяки чому досягається прискорене самозапалювання основного заряду, зниження шуму і токсичності відпрацьованих газів.

Основне впорскування забезпечує роботу двигуна. Додаткове впорскування здійснюється для підвищення температури відпрацьованих газів і згорання частини сажі в сажовому фільтрі.

У процесі формування алгоритмів багатофазного впорскування важливо враховувати баланс між потенційними вигодами та ризиками. У подібних конструкціях оптимізація процесу впорскування є складним завданням через велику кількість параметрів керування, зокрема умов експлуатації (температура, тиск, концентрація кисню), кількості розділених впорскувань, тривалості кожного з них, часу затримки між імпульсами та нелінійних ефектів їх взаємодії [6].

У дослідженні займання модельного палива (n-додекану) при подвійному впорскуванні було встановлено, що час запалювання для другого впорскування є коротшим, ніж для першого [7]. Кількість сажі виявилася більшою під час другого впорскування, що зумовлено коротшим часом запалювання і меншою локальною концентрацією кисню.

В окремому дослідженні подібного випадку [2] автори зафіксували аналогічне спостереження щодо скорочення внутрішнього впорскування. Для пояснення цього ефекту існує кілька можливих механізмів, які можуть переважати залежно від умов експлуатації.

Скорочення інтервалу впорскування між фазами у поєднанні з прискореним згоранням дози палива основного впорскування може призводити до менш ефективного тепловиділення й, відповідно, зниження ефективності двигуна. Це спостерігається у випадку, коли займання та згорання попереднього впорскування відбуваються під час такту стиснення. Запобігти подібній ситуації можна, змістивши кут попереднього впорскування відносно ВМТ на більш ранній. Отже, при низькій температурі газів у циліндрі (приблизно 750 К) доза палива попереднього впорскування не запалюється до впорскування та займання основної дози.

Подібні впорскування за зниженої температури в циліндрі досліджувалися в експериментах [2, 7] і можуть використовуватися для відтермінування займання попереднього впорскування на будь-який момент після початку основного. Проте реалізація цієї стратегії в двигуні може спричинити надмірне збіднення суміші при попередньому впорскуванні через тривалий час запалювання, що, у свою чергу, здатне підвищити викиди незгорілих вуглеводнів та знизити екологічність роботи двигуна [11]. Відповідно, доцільно підбирати час попереднього впорскування таким чином, щоб воно залишалося незайнятим і не генерувало значної кількості теплоти до моменту запалювання дози палива основного впорскування. У цьому випадку важливо, щоб паливо від попереднього впорскування встигло частково окислитися та виконувало роль ініціатора запалювання для основного впорскування.

Враховуючи вказане, у роботі [1] використано підхід чисельної гідродинаміки для відтворення турбулентних потоків (LES) з метою пояснення базових фізичних механізмів двох імовірних побічних ефектів попереднього впорскування – підвищеного утворення сажі та тепловиділення перед стартом основного впорскування.

З цією метою застосування LES вважається оптимальним, оскільки дозволяє отримати дані про локальний хімічний склад та температуру з достатньою точністю для повного пояснення перебігу процесів у системі. На першому етапі досліджуються механізми впливу моменту попереднього впорскування на запалювання, згорання та викиди основного впорскування. На наступному етапі здійснюється систематична зміна тривалості попереднього впорскування та часу витримки, щоб оцінити обґрунтованість і значущість запропонованих механізмів за різних моментів попереднього впорскування при однакових умовах роботи двигуна

Для дослідження режимів згорання попереднього та основного впорскування авторами роботи [12] прийнята концепція, що передбачає використання поєднання стаціонарного полум’я (горіння без попереднього змішування) та нестаціонарного полум’я (локальне займання й горіння попередньо змішаної суміші).

Ця модель дозволяє відтворювати динаміку займання й горіння попередньо змішаних компонентів.

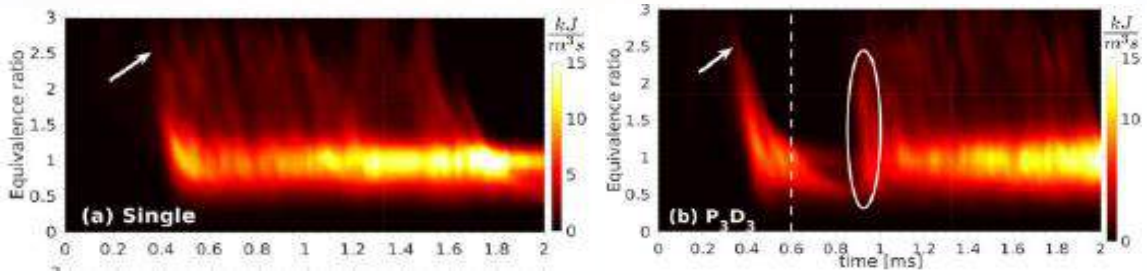
На рисунку 2 наведено часову зміну інтегральної швидкості тепловиділення в межах області для заданих параметрів (вертикальна вісь).

Інтегрування локальних значень у просторі дає сумарну швидкість тепловиділення всієї паливно-повітряної суміші. Для випадку одноразового впорскування до моменту 0,4 мс істотного тепловиділення не спостерігається. Початкове займання виникає в збагаченій паливом зоні (вказано білою стрілкою).

Невдовзі після цього зона активного тепловиділення зміщується у напрямку стехіометричних та збіднених сумішей. У часовому інтервалі між 0,4 мс (початок займання) та 1,5 мс (завершення впорскування) просторовий розподіл швидкості тепловиділення залишається подібним і має максимум поблизу стехіометричних умов, що відповідає квазістаціонарному полум’ю. Аналіз індексу полум’я свідчить, що на пізніших стадіях процес згорання переважно відбувається у режимі дифузійного полум’я.

У випадку подвійного впорскування запалювання попереднього імпульсу відбувається в збагаченій паливом зоні, проте через коротку тривалість воно не формує дифузійного полум’я.

Суміш згорає у режимі попередньо змішаного горіння, що зумовлює низьке утворення сажі [2].



а) б)

Рис. 2. Зміна сумарного тепловиділення в LES [1]
а – одноразове впорскування; б – P_3D_3 впорскування

На рисунку 2, б біла пунктирна лінія позначає момент початку основного впорскування при 0,6 мс. В час близько 0,9 мс паливо, що надходить під час цього впорскування, починає активно виділяти теплоту.

На відміну від одноразового та попереднього впорскувань, де займання відбувається переважно у збагачених паливом зонах (позначено білими стрілками), у випадку основного впорскування тепловиділення відбувається відразу у широкому діапазоні коефіцієнтів еквівалентності (виділено білим овалом).

Це пояснюється тим, що доза палива основного впорскування потрапляє в область з високою температурою продуктів згорання від попереднього впорскування, що забезпечує миттєве займання.

Таким чином, процес тепловиділення відбувається практично одночасно в широкій області, а не шляхом повільного самозаймання у локалізованих осередках. Запалювання основного впорску-вання в режимі P_3D_3 (де P_3 – три попередні впорскування (Pilot injections), D_3 – три основні впорскування (Main injections)) також підтверджується збільшенням концентрації OH-радикалів.

З метою доповнення аналізу горіння при попередньому та основному впорскуванні використано індекс полум’я FI, визначений за ступенем вирівнювання градієнтів палива й окислювача відповідно до підходу [15]:

$$FI = \frac{\nabla Y_F \cdot \nabla Y_{O_2}}{\left|\nabla Y_F\right| \cdot \left|\nabla Y_{O_2}\right|} \quad (1)$$

де Y_F – масова частка палива ($C_{12}H_{26}$) та всіх легших вуглеводневих сполук C_xH_y.

На основі локального розподілу виділено дві зони: область 1 із від’ємними значеннями, що відповідає режиму горіння з протилежними градієнтами або без попереднього змішування; область 2 із додатними значеннями, яка характеризує горіння з вирівняними градієнтами або за наявності попереднього змішування.

Швидкість тепловиділення, що припадає саме на фазу попередньо змішаного згорання, яка зазвичай відбувається одразу після займання та при дифузійному (незмішаному) горінні визначається як частка швидкості виділення теплоти (HRR) з кожної з відповідних областей.

Для аналізу впливу поділу одноразового впорскування на попередню та основну фази впорскування, на рисунку 3 наведено результати для випадків одноразового впорскування, а також режимів P_3D_3 і P_3D_5.

Як видно, рівень попередньо змішаного згорання вищий у випадках багатофазного впорскування, ніж у випадку одноразового впорскування. Інтенсивніше згорання попередньо утвореної суміші відбувається під час інтервалів між двома впорскуваннями та безпосередньо після них. Періоди витримки становлять від 0,3 мс до 0,6 мс у P_3D_3 та від 0,3 мс до 0,8 мс у P_3D_5.

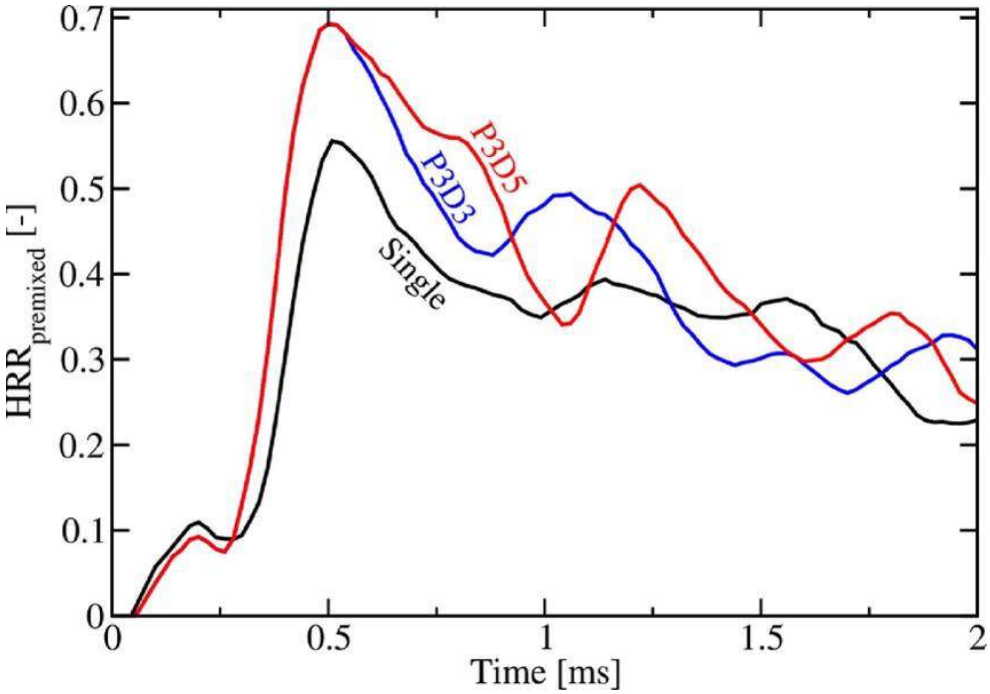


Рис. 3. Частка швидкості виділення теплоти попередньо змішаної суміші для випадків одноразового та попереднього впорскування [1]

В результаті дослідження впливу тривалості попереднього впорскування та часу витримки на утворення та окислення сажі в системі основного впорскування відомо, що коротший час витримки у випадках подвійного впорскування призводить до меншого викиду сажі.

З метою проілюструвати експериментальне дослідження щодо зменшення утворення чистої сажі наведено графік залежності (рисунок 4) загальної маси сажі від часу для одноразового та попередньо-основного впорскування P_3D_3 та P_3D_5.

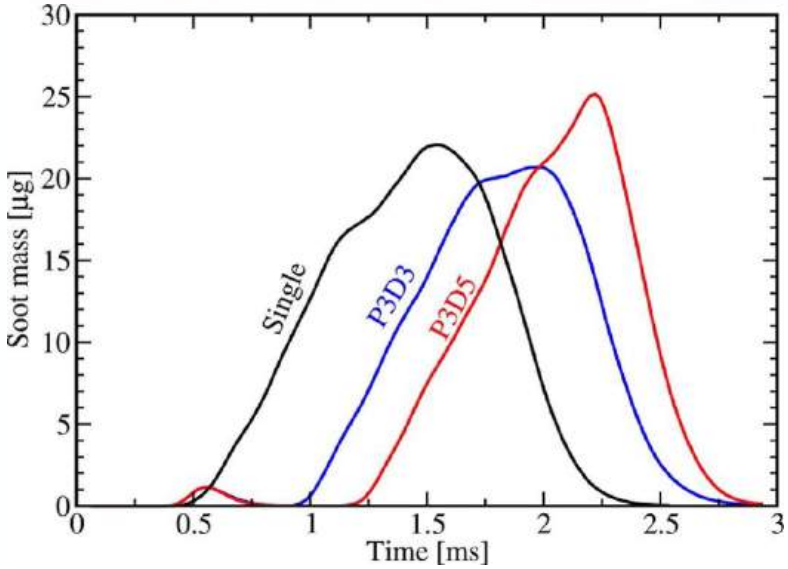
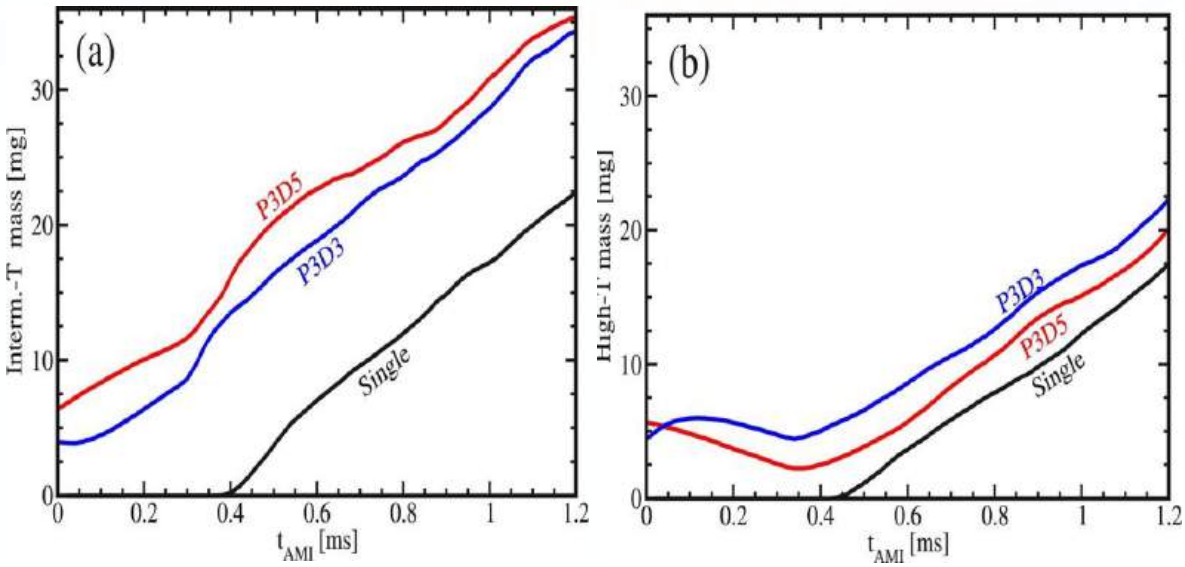


Рис. 4. Порівняння зміни маси сажі для одноразового та попередньо-основного впорскування з коротким і тривалим часом витримки [1]

Два останні випадки мають однакову тривалість першого та другого впорскувань, але різний час витримки. З рисунку 4 видно, що у випадку P_3D_5 пікова маса сажі є вищою відносно одноразового впорскування, тоді як для P_3D_3, навпаки, відзначається нижчий рівень. Збільшення кількості палива перед впорскуванням у випадку P_3D_3 призводить до подальшого утворення та окислення сажі. На відміну від випадку P_1D_3, який має короткий незаймистий період попереднього впорскування, основний період впорскування у випадку P_3D_3 безпосередньо проникає у проміжні та високотемпературні шлейфи, що утворюються після попереднього впорскування, завдяки відносно короткому часу витримки. Таке проникнення основного впорскування у проміжні та високотемпературні шлейфи призво-дить до більшого утворення та окислення сажі. Для випадку P_3D_5 витримка є тривалішою, завдяки чому суміш має більше часу для охолодження перед подачею свіжого повітря та реалізацією основного впорскування. Для P_3D_3 характерна більша зона високих температур та менша зона середніх температур у порівнянні з P_3D_5. В часовому інтервалі 0,2…0,5 мс спостерігається підвищена швидкість локального окислення сажі, що свідчить про більш інтенсивне окислення у даному режимі.

Порівнюючи розподіл температури попереднього впорскування у випадках P_3D_3 та P_3D_5 протягом 0,02…0,4 мс, можна побачити, що високо-температурна область, важлива для окислення сажі, зменшилася до області P_3D_5. Кількісно це проілюстровано на рисунку 5, де показано загальну масу суміші проміжної та високотемпературної областей відповідно після початку основних впорскувань.



а) б)

Рис. 5. Зміна маси суміші після початку основного впорскування [1]
а – проміжна область; б – високотемпературна область

Висновок. Результати аналізу процесів паливоподачі та згорання в дизельних двигунах з системою паливоподачі Common Rail демонструють, що поділ одного впорскування на попереднє і основне сприяє переходу згорання до режиму збідненої суміші та попередньо змішаного горіння під час та відразу після витримки, однак цей вплив істотно зменшується після початку основного впорскування.

Встановлено три механізми впливу на викиди сажі в стратегії попереднього впорскування:

– для попереднього впорскування, продукти стадії низькотемпературного згорання та виділення теплоти посилюють займання основного впорскування, що, у свою чергу, посилює як утворення, так і окислення сажі;

– при тривалому попередньому впорскуванні та помірному часі витримки взаємодія дози палива основного впорскування з середньо- та високо-температурними продуктами горіння попереднього впорскування здатна значно підвищувати утворення сажі та інтенсивність окислення за рахунок локального збагачення реагентів;

– якщо час витримки достатньо великий, це сприяє додатковому надходженню свіжого повітря у високотемпературну область продуктів згорання попереднього впорскування. Внаслідок цього вони охолоджуються до проміжних температур, що сповільнює процес окислення сажі.

Встановлено, що в досліджуваних режимах скорочення часу витримки сприяє зниженню пікової маси сажі, оскільки розширюється область високих температур, що посилює процес окислення сажі.

Література:

1. Hadadpurab A., Xu S., Pang K. M., Baia X.-S., Jang M. Effects of pre-injection on ignition, combustion and emissions of spray under engine-like conditions // Combustion and Flame. 2022. Vol. 241. 112082. DOI: 10.1016/j.combustflame.2022.112082

2. Moiz A. A., Ameen M. M., Lee S.-Y., Som S. Study of soot production for double injections of n-dodecane in ci engine-like conditions // Combustion and Flame. 2016. Vol. 173. P. 123–131. DOI:10.1016/j.combustflame.2016.08.005

3. Bolla M., Chishty M. A., Hawkes E. R., Kook S. Modeling combustion under engine combustion network spray a conditions with multiple injections using the transported probability density function method // Journal of Engine Research. 2017. Vol. 18, Issue 1–2. P. 6–14. DOI: 10.1177/1468087416689174

4. Maes N., Bakker P., Dam N., Somers B. Transient flame development in a constant-volume vessel using a split-scheme injection strategy // SAE International Journal of Fuels and Lubricants. 2017. 10 (2). P. 318–327. DOI: 10.4271/2017-01-0815

5. Chen S. K. Simultaneous reduction of NOx and particulate emissions by using multiple injections in a small diesel engine // SAE Technical Paper. 2000. 2000-01-3084 DOI: 10.4271/2000-01-3084

6. O'Connor J., Musculus M. Post injections for soot reduction in diesel engines: a review of current understanding // SAE International Journal of Engines. 2013. № 6 (1). P. 400–421. DOI: 10.4271/2013-01-0917

7. Skeen S., Manin J., Pickett L. M. Visualization of ignition processes in high-pressure sprays with multiple injections of n-Dodecane // SAE International Journal of Engines. 2015. 8(2). P. 696–715. DOI: 10.4271/2015-01-0799

8. Zhao W., Wei H., Jia M., Lu Z., Luo K. H, Chen R., Zhou L. Flame-spray interaction and combustion features in split-injection spray flames under diesel engine-like conditions // Combustion and Flame. 2019. Vol. 210. P. 204–221. DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.08.031

9. Hadadpour A., Jangi A., Pang K. M., Bai X. S. The role of a split injection strategy in the mixture formation and combustion of diesel spray: a large-eddy simulation // Proceedings of the Combustion Institute. 2019. Vol. 37, Issue 4. P. 4709–4716. DOI: 10.1016/j.proci.2018.09.016

10. Cao J., Leng X., He Z., Wang Q., Shang W., Li B. Experimental study of the diesel spray combustion and soot characteristics for different double-injection strategies in a constant volume combustion chamber // Journal of the Energy Institute. 2020. Vol. 93, Issue 1. P. 335–350. DOI: 10.1016/j.joei.2019.02.006

11. Yang K., Yamakawa H., Nishida K., Ogata Y. Characteristics of free spray development, mixture formation, and combustion under high-pressure split injection // Atomization Sprays. 2018. Vol. 28, Issue 3. P. 217–240. DOI: 10.1615/AtomizSpr.2018025304

12. Hadadpour A., Jangi M., Bai X. S. The effect of splitting timing on mixing in a jet with double injections // Flow, Turbulence and Combustion. 2018. Vol. 101 (4). P. 1157–1171. DOI: 10.1007/s10494-018-9904-8

13. Chartier C., Andersson O., Johansson B., Musculus M., Bobba M. Effects of post-injection strategies on near-injector over-lean mixtures and unburned hydrocarbon emission in a heavy-duty optical diesel engine // SAE International Journal of Engines. 2011. 4 (2011-01–1383). P. 1978–1992. DOI: 10.4271/2011-01-1383

14. Van Oijen J., De Goey L. Modelling of premixed laminar flames using flamelet-generated manifolds // Combustion Science and Technology. 2000. 161 (1). P. 113-137. DOI: 10.1080/00102200008935814

15. Lignell D. O., Chen J. H., Schmutz H. A. Effects of Damköhler number on flame extinction and reignition in turbulent non-premixed flames using DNS // Combustion and Flame. 2011. Vol. 158, Issue 5. P. 949–963. DOI: 10.1016/j.combustflame.2010.10.027

16. Марченко А. П., Рязанцев М. К., Шеховцов А. Ф. Двигуни внутрішнього згорання: Серія підручників у 6 томах. Т. 2. Доводка конструкцій форсованих двигунів наземних транспортних машин. Харків : Прапор, 2004. 288 с.

17. Артюх О. М., Дударенко О. В., Кузьмін В. В., Сосик А. Ю., Щербина А. В. Транспортні енергетичні установки : навчальний посібник. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. 264 с.

18. Євсєєва Н. О., Борзій В. В., Сухонос Р. Ф., Беженов С. О. Дослідження впливу соплових отворів розпилювача форсунки на характеристики дизельного двигуна У2Д6 // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2023. № 3. С. 72–80. DOI 10.15588/1607-6885-2023-3-11.

References:

1. Hadadpurab, A., Xu, S., Pang, K. M., Baia, X.-S., Jang, M. (2022). Effects of pre-injection on ignition, combustion and emissions of spray under engine-like conditions // *Combustion and Flame*, 241, 112082. DOI: 10.1016/j.combustflame.2022.112082 [in English].

2. Moiz, A. A., Ameen, M. M., Lee, S.-Y., Som, S. (2016). Study of soot production for double injections of n-dodecane in ci engine-like conditions // *Combustion and Flame*, 173, 123–131. DOI:10.1016/j.combustflame.2016.08.005 [in English].

3. Bolla, M., Chishty, M. A., Hawkes, E. R., Kook, S. (2017). Modeling combustion under engine combustion network spray a conditions with multiple injections using the transported probability density function method // *Journal of Engine Research*, 18(1–2), 6–14. DOI: 10.1177/1468087416689174 [in English].

4. Maes, N., Bakker, P., Dam, N., Somers, B. (2017). Transient flame development in a constant-volume vessel using a split-scheme injection strategy // *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 10(2), 318–327. DOI: 10.4271/2017-01-0815 [in English].

5. Chen, S. K. (2000). Simultaneous reduction of NOx and particulate emissions by using multiple injections in a small diesel engine // *SAE Technical Paper*, 2000-01-3084 DOI: 10.4271/2000-01-3084 [in English].

6. O'Connor, J., Musculus, M. (2013). Post injections for soot reduction in diesel engines: a review of current understanding // *SAE International Journal of Engines*, 6(1), 400–421. DOI: 10.4271/2013-01-0917 [in English].

7. Skeen, S., Manin, J., Pickett, L. M. (2015). Visualization of ignition processes in high-pressure sprays with multiple injections of n-Dodecane // *SAE International Journal of Engines*, 8(2), 696–715. DOI: 10.4271/2015-01-0799 [in English].

8. Zhao, W., Wei, H., Jia, M., Lu, Z., Luo, K. H, Chen, R., Zhou, L. (2019). Flame-spray interaction and combustion features in split-injection spray flames under diesel engine-like conditions // *Combustion and Flame*, 210, 204–221. DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.08.031 [in English].

9. Hadadpour, A., Jangi, A., Pang, K. M., Bai, X. S. (2019). The role of a split injection strategy in the mixture formation and combustion of diesel spray: a large-eddy simulation // *Proceedings of the Combustion Institute*, 37(4), 4709–4716. DOI: 10.1016/j.proci.2018.09.016 [in English].

10. Cao, J., Leng, X., He, Z., Wang, Q., Shang, W., Li, B. (2020). Experimental study of the diesel spray combustion and soot characteristics for different double-injection strategies in a

constant volume combustion chamber // *Journal of the Energy Institute*, 93(1), 335–350. DOI: 10.1016/j.joei.2019.02.006 [in English].

11. Yang, K., Yamakawa, H., Nishida, K., Ogata, Y. (2018). Characteristics of free spray development, mixture formation, and combustion under high-pressure split injection // *Atomization Sprays*, 28(3), 217–240. DOI: 10.1615/AtomizSpr.2018025304 [in English].

12. Hadadpour A., Jangi M., Bai X. S. (2018). The effect of splitting timing on mixing in a jet with double injections // *Flow, Turbulence and Combustion*, 101(4), 1157–1171. DOI: 10.1007/s10494-018-9904-8 [in English].

13. Chartier, C., Andersson, O., Johansson, B., Musculus, M., Bobba, M. (2011). Effects of post-injection strategies on near-injector over-lean mixtures and unburned hydrocarbon emission in a heavy-duty optical diesel engine // *SAE International Journal of Engines*, 4 (2011-01–1383), 1978–1992. DOI: 10.4271/2011-01-1383 [in English].

14. Van Oijen, J., De Goey, L. (2000). Modelling of premixed laminar flames using flamelet-generated manifolds // *Combustion Science and Technology*, 161(1), 113-137. DOI: 10.1080/00102200008935814 [in English].

15. Lignell, D. O., Chen, J. H., Schmutz, H. A. (2011). Effects of Damköhler number on flame extinction and reignition in turbulent non-premixed flames using DNS // *Combustion and Flame*, 158(5), 949–963. DOI: 10.1016/j.combustflame.2010.10.027 [in English].

16. Marchenko, A. P., Ryazantsev, M. K., Shekhovtsov, A. F. (2004). *Dvyhuny vnutrishn'oho zhorannia: Seriia pidruchnykiv u 6 tomakh. T. 2. Dovodka konstruktsiy forsovanykh dvyhuniv nazemnykh transportnykh mashyn [Internal combustion engines: A series of textbooks in 6 volumes. Vol. 2. Refinement of designs of forced engines of ground transport vehicles]*. Kharkiv: Prapor, 288. [in Ukrainian].

17. Artyukh, O. M., Dudarenko, O. V., Kuzmin, V. V., Sosyk, A. Yu., Shcherbyna, A. V. (2021). *Transportni enerhetychni ustanovky [Transport energy installations]*. Zaporizhzhia: National University "Zaporizhzhia Polytechnic", 264. [in Ukrainian].

18. Yevsyeyeva, N., Borziy, V., Sukhonos, R., Bezhenov, S. (2023). Doslidzhennya vplivu soplovih otvoriv rozpilyuvacha forsunki na harakteristiki dizelnogo dviguna U2D6 [Further investigation of the nozzle openings of the sawing injector on the characteristics of the U2D6 diesel engine] // *Novi materiali i tehnologiyi v metalurgiyi ta mashinobuduvanni [New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering]*, 3, 72–80. DOI 10.15588/1607-6885-2023-3-11. [in Ukrainian].