

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОЗПИЛЕННЯ ЗРІДЖЕНОЇ СУМІШІ ПРОПАН-БУТАНУ ДЛЯ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ

Сірий О.А., Соломаха А.С., Пакош Д.З.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
вул. Політехнічна, 6, 03056, м. Київ
oasiryi@gmail.com, as_solomaha@ukr.net, pprbs90@gmail.com

Робота присвячена вирішенню проблем вдосконалення системи живлення зрідженим газом з метою проведення конвертації двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) автомобільного транспорту та стаціонарних установок середньої потужності, що працюють за газовим або комбінованим циклом. У роботі виконано експериментальне дослідження еволюції струменя зрідженого газу із застосуванням поетапного розгляду процесу, починаючи з адіабатного скипання в соплі і закінчуючи утворенням крапель на його виході. Результати є необхідними для отримання раціональних геометричних та режимних параметрів для системи розпилення, а також забезпечення її ефективності. Отримано необхідну параметричну базу щодо уточнення математичної моделі нестационарного процесу випаровування крапель із урахуванням випаровування перегрітої рідини в рухомому потоці повітря, оскільки моделювання розглядається перспективним інструментом дослідження параметрів проміжку часу температурної релаксації одиночної краплі зрідженого газу, а також аналітичного розрахунку діаметру краплі в кінці процесу охолодження, що залежить від довжини ділянки випаровування та початкових параметрів повітря. Основні результати роботи отримані експериментально. Дослідження проводились за таких умов: температура впорскування 15 ... 50 °С; тиск перед форсункою 8–10 бар; розпилення палива реалізовувалося у потік повітря, що набігає, зі швидкістю 5 ... 40 м/с за значення тиску 101 кПа. Вимірювання температурного поля факелу розпилю фіксується за допомогою тепловізійного блоку та системи термомпар на осі факела. Встановлено кореляцію між основними режимними характеристиками та параметрами факелу розпилю пальної суміші. Експериментально доведено, що застосування системи живлення з впорскуванням зрідженого пропану дозволяє без конструктивних змін двигуна покращити наповнення його циліндрів на 4 ... 5%, що призведе до зростання потужності двигуна. Визначено, що впорскування газу в рідкому стані (LPG) дозволяє підвищити точність дозування, покращити процес сумішоутворення та спалювання. *Ключові слова:* двигун внутрішнього згорання, зріджений газ, факел розпилю палива, температура факелу, миттєве закипання, кут розкриття струменя.

Study of liquid propane-butane mixture atomization for internal combustion engines. Solomakha A., Siryi O., Pakosh D.

The paper is devoted to solving the problems of improving the system of liquefied gas supply for the purpose of conversion of internal combustion engines of road transport and fixed installations of medium power that works on gas or combined cycle. The experimental study of the evolution of the liquefied gas jet using a stepwise consideration of the process: adiabatic boiling in the nozzle, formation of droplets at its outlet. The results are necessary to obtain rational geometric and mode parameters for the spraying system and to ensure its efficiency. The necessary parametric basis for refinement of the mathematical model of the non-stationary process of evaporation of droplets with consideration of evaporation of superheated fluid in the moving air flow is obtained. Thereby modeling is considered as a promising tool for studying the parameters of the time period of temperature relaxation of a single liquid drop, depends on the length of the evaporation area and the initial air parameters. The main results of the work were obtained experimentally. The studies were conducted under the following conditions: injection temperature 15 ... 50 °C; pressure before the nozzle 8-10 bar; fuel spraying was implemented into the flowing air at a speed of 5 ... 40 m/s at a pressure of 101 kPa. The measurement of the temperature field of the spray torch is fixed by means of a thermal imaging unit and a thermocouple system on the torch axis. The correlation between the main mode characteristics and the parameters of the torch of the spray mixture of the mixture was established. It is experimentally proved that the use of a system of injection with liquefied propane allows to improve the filling of its cylinders by 4 ... 5%, without structural changes of the engine, which will lead to an increase in engine power. Liquid gas injection (LPG) has been found to improve dosing accuracy, improve blending and combustion processes. *Key words:* internal combustion engine, liquefied gas, flash boiling, emission characteristics fuel spray torch, torch temperature, instant boiling, jet opening angle.

Актуальність роботи. Відомо, що автомобільний транспорт є одним із основних забруднювачів довкілля. Одним з варіантів зниження шкідливого екологічного навантаження на навколишнє середовище розглядається застосування у якості автомобільного палива зрідженого вуглеводневого газу (LPG). Крім того, зріджені гази також придатні до застосування для двигунів з безпосереднім впорскування бензину (GDI). Слід зазначити, що LPG – це більш дешеве та чисте паливо порівняно з бензином

та дизелем за рівнем викидів забруднюючих речовин у навколишнє середовище [1]. До переваг застосування LPG у ДВЗ слід віднести те, що його можна адаптувати без значних конструктивних змін двигуна.

За статистикою споживання зрідженого газу в Україні зросло до 11,1% у 2019 році порівняно з 2018 роком, склавши різницю у 2,03 млн тонн. Основна причина – коливання ціни на бензин. Таким чином, підвищення використання зрідженого газу за останній рік склало 42,2% [2].

Порівняно з бензином LPG має підвищену температуру спалювання. Крім того, зріджений вуглеводневий газ розпилюється у камері згоряння (колекторі) шляхом миттєвого закипання. Миттєве закипання суміші відбувається під час фазового переходу, при цьому її тиск миттєво знижується нижче тиску насичення за цих умов. Порція розпиленого газу проходить послідовність фізичних процесів: зародження центрів утворення бульбашок, їх зростання, утворення двофазного потоку та його розпилення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значного поширення набули форсунки для двигунів GDI з декількома отворами завдяки більш ефективному розпилю факелу рідини та можливістю більш ефективно керувати цим процесом. Але за певних умов, особливо під час закипання, окремі струмені об'єднуються в один [3]. Для цього типу форсунок цей ефект суттєво змінює процес підготовки паливної суміші та спричиняє негативні наслідки, особливо під час взаємодії струменю палива зі стінкою циліндру [4–7], що спричиняє активний процес утворення сажі [8] та детонаційних явищ у двигуні [9].

Порушення процесу розпилення помітно змінює структуру струменя під час миттєвого закипання. Вплив збільшення температури палива значно зменшує кут розкриття конуса розпилю струменя [10]. Слід зазначити, що глибина проникнення струменя збільшується, але разом з тим відбувається змочування стінки поршня, що призводить до утворення ізольованої рідкої плівки. Наслідком цього є затягування процесу випаровування палива, що призводить до збільшення викидів сажі [11]. Слід зазначити, що роботи щодо більш детального дослідження процесу розпилю перегрітого струменя досі залишаються у активній розробці [12].

У роботі [13] встановлено кореляцію між радіальним розширенням струменю та ступенем перегріву, рівнем нуклеації і хімічного потенціалу фазового переходу ($\Delta\mu$). Упродовж 20 калібрів $20d_0$ уздовж осі встановлена кореляція поступово слабшає і завершується по закінченню фази миттєвого закипання.

Одне з останніх досліджень [14] підтвердило той факт, що наслідками з'єднання розділеного струменя є: зменшення конуса кута розпилення палива; більша глибина проникнення палива та інтенсифікація пароутворення. Покращення процесу розпилення може досягатись у разі використання рідин з більшою в'язкістю. Час впорскування палива спричиняє процес зволоження стінок поршня, що негативно впливає на процес займання паливної суміші.

Безрозмірний ступінь перегріву P_a/P_s , який являє собою відношення тиску навколишнього середовища (P_a) до тиску насичених парів палива (P_s), запропонований автором [15], є універсальним параметром з погляду опису загальної геометрії струменів під час процесу миттєвого закипання. Встановлено, що сусідні струмені починають взаємодіяти, коли відношення P_a/P_s знаходиться в інтервалі від 0,3 до

1,0, при цьому зменшується глибина проникнення палива та збільшується кут розкриття факелу розпилю. З іншого боку, за умов P_a/P_s нижче, ніж 0,3, відбувається з'єднання струменів на осі факелу розпилю, що також збільшує далекобійність факелу та його кут розкриття.

На протигагу роботі [15], у роботі [16] показано, що безрозмірне співвідношення P_a/P_s не є настільки універсальним параметром під час дослідження струменя розпилю, особливо при використанні різних видів палива. Показано помітну різницю у глибині проникнення струменя між важким паливом, що вводиться у високо розріджений простір, та легким паливом, особливо коли різниця у температурі точок кипіння палив значна.

У роботі Mojtabi досліджено вплив кута розпилю струменів та ефекти їх взаємодії [17]. Показано, що зі збільшенням кута розпилю поодиноких струменів зменшується далекобійність факелу розпилю палива. У роботах [18; 19] показано, що взаємодія струменів та їх злиття може бути попереджене більш високим тиском палива. Автор [20] вважає, що процес випаровування палива спричиняє злиття факелу розпилю, коли парова фаза переноситься у середину області низького тиску, що виникає між щільно розташованими струменями.

Згідно з Wu [21; 22] визначальною причиною розпаду струменя у форсунці з одним отвором є процес випаровування, який впливає на рух струменю вже на початковому етапі формування факелу розпилю всередині каналу. Основною ж причиною розпаду струменя у форсунці з декількома отворами є різниця тиску, яка спричиняє круговий рух газу.

У роботі Li [23] досліджували падіння температури та зростання тиску по довжині факелу розпилю, які призводять до конденсації пари, що в кінцевому рахунку спричиняє їх об'єднання.

Постановка задачі. Метою роботи є дослідження процесу розпилю зрідженого газу та розробка рекомендацій для системи живлення зрідженим газом, яка забезпечує ефективний процес сумішоутворення для стаціонарних та середньої потужності транспортних двигунів відповідно до сучасних екологічних стандартів. Експериментальне дослідження розвитку струменя зрідженого газу необхідне для отримання раціональних геометричних та режимних параметрів розпилю палива з ціллю підвищення ефективності системи. Дослідження має базуватись на поетапному огляді процесу, починаючи з адіабатичного кипіння в соплі і закінчуючи утворенням крапель на його виході. Дані експериментальних досліджень також необхідні для уточнення математичної моделі нестационарного процесу випаровування крапель та подальшого дослідження процесу розпилю LPG у перегрітому стані. Враховується процес випаровування перегрітої рідини в рухомому потоці повітря. Суміш пропан-бутану (табл.1) була використана як експериментальне зрідженого палива.

Склад газу вуглеводневого зрідженого

№ п/п	Показник	Одиниця вим.	Фактичне знач.
1.	Октанове число за моторним методом (MON)	-	94,8
2.	Вміст пропану	%	43,2
3.	Вміст пропилену	%	1,7
4.	Вміст бутану	%	53,1
5.	Вміст бутилену	%	0,3
6.	Загальний вміст дієнів, мольний (включаючи 1,3-бутадиєн)	%	менш 0,1
7.	Загальний вміст сірки (після одоруння)	мг/кг	11
8.	Залишок після випарювання	мг/кг	16

Виклад основного матеріалу. Схема лабораторної установки показана на рис. 1.

Паливо, зріджена суміш пропан-бутану зберігається у ємності 1 під надлишковим тиском до 15 атмосфер. Паливним насосом 2 рідка фаза подається паливною магістраллю до електромагнітної форсунки 13, яка дозує необхідний заряд палива у потік повітря, що набігає. На зворотному шляху паливо повертається у бак через мультиклапан 17. Тиск у прямій магістралі та у баку фіксується манометрами 14. Електродвигун 2 та зворотний клапан 16 живляться від блоку напругою 12 В. Дослідна ділянка обладнана можливістю вимірювання температур розпилення факелу 18, тепловізійної 5 та відео і фотозйомки 7. Для дослідження дисперсності розпилу зрідженого газу у факел вноситься

механічний уловлювач з мірними зразками, покритими сажекеросиновою сумішшю, за допомогою якої відбувалася фіксація розміру крапель розпиленого рідкого палива до моменту його повного випарювання. Форсунка 13 керується універсальним двоканальним приладом 8 (який слугує реле часу). На форсунку подається сигнал 12 В з можливістю точного вибору часу її спрацювання та періоду між сигналами з точністю до 1 мс. Повітряний тракт обладнано вентилятором з частотним регулюванням подачі 10. Витрата визначається за перепадом тиску на звужуючому пристрої рідинними манометрами 11 та електронним дифманометром 9. Додатково швидкість набігаючого потоку повітря у зоні мірної ділянки контролювалася електронним термоанемометром Tenmars TM-4001.

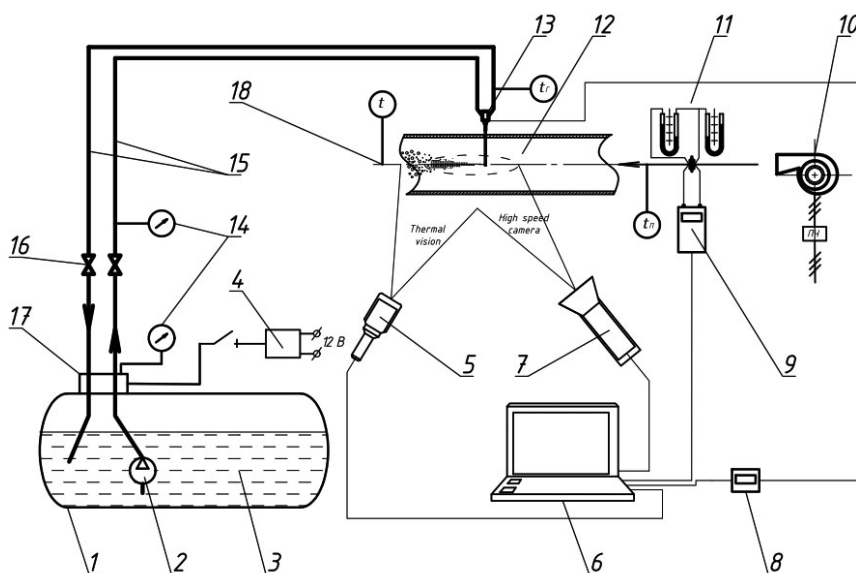


Рис. 1. Схема експериментального стенду

1 – балон для зрідженого газу; 2 – занурений паливний насос; 3 – зріджений газ; 4 – блок живлення паливного насосу; 5 – пристрій для проведення тепловізійного контролю; 6 – компактний комп'ютер; 7 – відеокамера для швидкісної зйомки; 8 – пристрій керування паливною форсункою; 9 – цифровий дифманометр; 10 – вентилятор з пристроєм частотного регулювання обертів вентилятора; 11 – манометри рідинні наклонного типу; 12 – дослідна ділянка; 13 – форсунка; 14 – контроль тиску у системі; 15 – пряма і зворотня паливна магістраль; 16 – зворотний клапан; 17 – мультиклапан; 18 – ділянка вимірювання температури факелу розпилу

Під час дослідження температурного стану факелу розпилення застосовувалися хромель-копелеві термодатчики, розміщення яких реалізовано за схемою рис. 2.

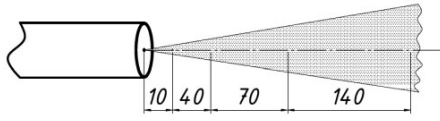


Рис. 2. Схема вимірювання температур в факелі розпилення

Експериментальним шляхом отримано розподілення температури по осі факелу розпиленого зрідженого газу, сигнал з термодатчиків фіксувався у часі, характерний вигляд температурного розподілу якого представлено на рис. 3. Як видно, температура в середині струменя має значення на початковій ділянці свого розвитку нижче -40°C , що відповідає температурі фазового переходу пропану за атмосферного тиску. По мірі віддалення затопленого струменя від форсунки температура підвищується і на відстані 140 мм досягає значення близько 0°C .

Важливим практичним застосуванням результатів приведених досліджень є оцінка ступеню охолодження пального заряду шляхом дроселювання палива.

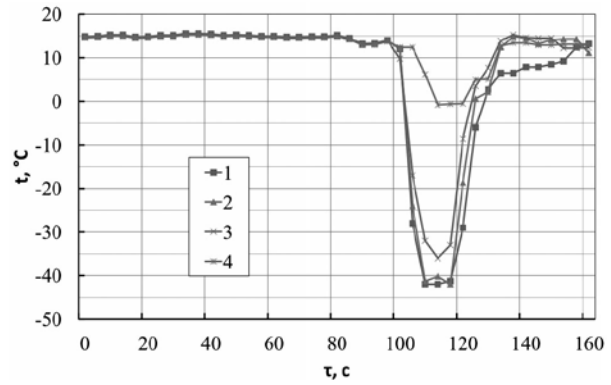
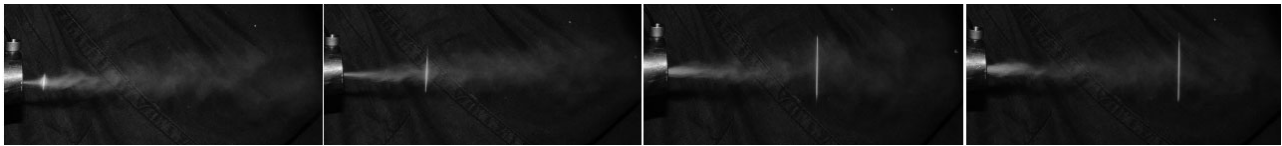


Рис. 3. Розподіл температури по осі затопленого факелу розпилення, 1 - $x=10$ мм, 2 - $x=40$ мм, 3 - $x=70$ мм, 4 - $x=140$ мм

Зниження температури заряду суттєво впливає на коефіцієнт наповнення. Так, охолодження суміші на 20 градусів дозволяє збільшити наповнення циліндру орієнтовно на 5% [24; 25]. Таким чином, процес впорскування зрідженого пропану дозволяє покращити енергетичні показники двигуна без суттєвих конструктивних змін.

Визначення радіального розширення факелу розпилення палива досліджувалося в умовах розвитку процесу під дією потоку повітря, що набігає (рис. 4). При цьому застосовувався наступний перелік обладнання: витратомірні пристрої, датчики температури, лазерне

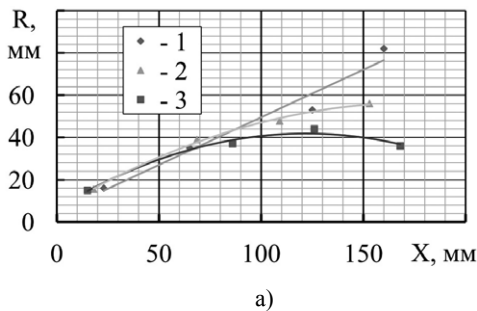


а)

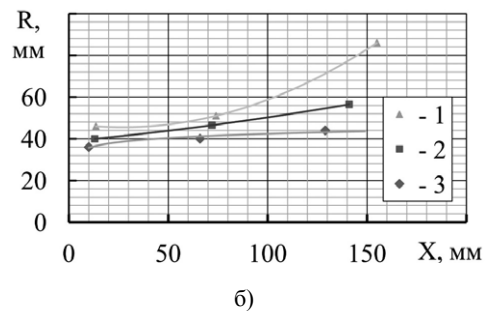


б)

Рис. 4. Візуалізація процесу розвитку паливної суміші лазерним променем при:
а) введенні зрідженого пропан-бутану безпосередньо у колектор, б) затопленого струменя у потоці, що набігає; швидкість повітря $W_a=31,56$ м/с



а)



б)

Рис. 5. Залежність ширини розкриття затопленого (а) струменя та під час введення суміші у колектор (б) по довжині за зміни швидкості потоку повітря, що набігає: 1 - 5 м/с, 2 - 38 м/с, 3 - 50 м/с

підсвічування струменю, обладнання для цифрової фотозйомки. Швидкість потоку повітря з подаючого колектору оцінювалася за допомогою витратомірної діафрагми, коефіцієнт якої становить $K = 0,0157$.

– Швидкість потоку набігаючого повітря визначалась за перепадом тиску на діафрагмі, при цьому додатково фіксувалось значення статичного тиску. Для розрахунку густини повітря вимірювався барометричний тиск, відносна вологість і температура під час вимірювань. Швидкість потоку повітря контролювалася додатково термоанемометром. Різниця показань вимірювань не перевищувала 7%.

За результатами обробки отриманих результатів було виконано графічне зображення розвитку струменя та отримано залежність його радіального розкриття від швидкості повітря та способу введення палива в потік повітря (рис. 4).

Спільною рисою розвитку ширини фронту розпилу для обох випадків є те, що початкова ділянка є геометрично схожою в межах 0...70 мм (рис. 5).

Подальший розвиток струменю чітко визначається швидкістю повітря таким чином: чим більша швидкість потоку, тим менший кут розкриття паливного струменя. За мінімальних швидкостей, діаметр

фронту розпилювання у 2 рази переважав діаметр повітряного колектору, а за максимальних швидкостей – приблизно дорівнював йому.

Головні висновки. Проведене експериментальне та аналітичне дослідження дозволяє розрахувати ступінь охолодження вхідного повітря під час впорскування зрідженого газу у впускний колектор ДВЗ та отримати всі геометричні параметри факелу розпилення, що є необхідним складником під час розробки та переобладнанні цих систем живлення;

– геометричні та фізичні параметри процесу розпилення є базою для розробки математичної моделі процесу миттєвого скипання розпиленої рідкої фази зрідженого газу;

– експериментально доведено, що застосування системи живлення з впорскуванням зрідженого пропан-бутану дозволяє без конструктивних змін двигуна покращити наповнення його циліндрів на 4...5%, що призведе до зростання потужності двигуна за умови забезпечення екологічних показників щодо викидів сажі та твердих частинок;

– результати дослідження можуть бути використані у галузі конструювання стаціонарних двигунів та двигунів внутрішнього згорання.

Література

1. Соломаха А.С., Сірий О.А., Петренко В.Г., Голик А.В., Чирка Т.В. Екологічні аспекти використання зрідженого газу у двигунах внутрішнього згорання. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2018. №5. Том 29(68). Ч. 3. С. 62–67.
2. Бізнес Цензор, Споживання ЗВГ в Україні підвищилось на 11.1% у 2019, Січень 2020: URL: https://biz.censor.net.ua/news/3169199/potreblenie_sjijennogo_gaza_v_ukraine_v_2019_godu_ovelichilos_na_111 (дата звернення: 20.01.2020).
3. Zeng W. et al. Atomization and vaporization for flash-boiling multi-hole sprays with alcohol fuels. *Fuel*. 2012. No. 95 (1). P. 287–297.
4. Guo H.J. et al. Effect of flash boiling on microscopic and macroscopic spray characteristics in optical GDI engine. *Fuel*. 2017. No. 190. P. 79–89.
5. Wang Z.M., et al. Microscopic level study on the spray impingement process and characteristics, *Appl. Energy*. 2017. No. 197. P. 114–123.
6. Wang Z.M., et al. Microscopic and macroscopic characterization of spray impingement under flash boiling conditions with the application of split injection strategy. *Fuel*. 2018. No. 212. P. 315–325.
7. Wang Z.M., et al. Influence of deposit on spray behavior under flash boiling condition with the application of closely coupled split injection strategy. *Fuel*. 2017. No. 190. P. 67–78.
8. Wang B.Y., et al. Modelling soot formation from wall films in a gasoline direct injection engine using a detailed population balance model. *Appl. Energy*. 2016. No. 163. P. 154–166.
9. Wang Z., Liu H., Reitz R.D. Knocking combustion in spark-ignition engines. *Prog. Energy Combust. Sci.* 2017. No. 61, P. 78–112.
10. Guo H., Ma X., Li Y., Liang S., Wang Z., Xu H., Wang J. Effect of flash boiling on microscopic and macroscopic spray characteristics in optical GDI engine. *Fuel*. 2017. No. 190. P. 79–89.
11. Schulz F., Beyrau F. The influence of flash-boiling on spray-targeting and fuel film formation. *Fuel*. 2017. No. 208. P. 587–594.
12. Wu S., Yang S., Wooldridge M., & Xu M. Experimental study of the spray collapse process of multi-hole gasoline fuel injection at flash boiling conditions. *Fuel*. 2019. No. 242, P. 109–123.
13. Wang Z., Jiang C., Xu H., Badawy T., Wang B., Jiang Y. The influence of flash boiling conditions on spray characteristics with closely coupled split injection strategy. *Applied Energy*. 2017. Vol. 187 (Supplement C). P. 523–533.
14. Kale R., Banerjee R. Spray Collapse in a Multi-hole GDI Injector and Its Effect on In-Cylinder Combustion. *Two-Phase Flow for Automotive and Power Generation Sectors / Kaddi, Sangareddy India*: Springer, 2018. P. 43–61.
15. Zeng W., Xu M., Zhang G., Zhang Y., Cleary DJ. Atomization and vaporization for flash-boiling multi-hole sprays with alcohol fuels. *Fuel*. 2012. No. 95, P. 287–97.
16. Lacey J., Poursadegh F., Brear M., Gordon R., Petersen P., Lakey C. Generalizing the behavior of flash-boiling plume interaction and spray collapse for multi-hole direct injection. *Fuel*. 2017. No. 200. P. 345–56.
17. Mojtabi M., Chadwick N., Wigley G., Helie J. The effect of flash boiling on breakup and atomisation in GDI sprays: Proceedings of the 22nd European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems. ILASS Europe, Como Lake, Italy, September 08–10, 2008.
18. Chan Q., Bao Y., Kook S. Effects of injection pressure on the structural transformation of flash-boiling sprays of gasoline and ethanol in a spark-ignition direct-injection (SIDI) engine. *Fuel*. 2014. No. 130. P. 228–40.

19. Jiang C., Parker M.C., Helie J., Spencer A., Garner C.P., Wigley G. Impact of gasoline direct injection fuel injector hole geometry on spray characteristics under flash boiling and ambient conditions. *Fuel*. 2019. No. 241. P. 71–82.
20. Aleiferis P.G., van Romunde Z.R. An analysis of spray development with iso-octane, n-pentane, gasoline, ethanol and n-butanol from a multi-hole injector under hot fuel conditions. *Fuel*. 2013. No. 10. P. 143–68.
21. Wu S., Xu M., Hung D.L., Li T., Pan H. Near-nozzle spray and spray collapse characteristics of spark-ignition direct-injection fuel injectors under sub-cooled and superheated conditions. *Fuel*. 2016. No. 183. P. 322–34.
22. Wu S., Pan H., Xu M., Hung D., Li T. Investigation of rapid atomization and collapse of super heated liquid fuel spray under superheated conditions. *Atom Sprays*. 2016. Vol. 26. P. 1361–1384.
23. Li Y., Guo H., Fei S., Ma X., Zhang Z., Chen L., et al. An exploration on collapse mechanism of multi-jetflash-boiling sprays. *Appl Therm Eng*. 2018. No. 134. P. 20–28.
24. Петренко В.Г., Соломаха А.С., Барабаш П.О. Термодинамічний аналіз процесу впорскування зрідженого пропану до двигуна внутрішнього згорання. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2015. № 2. С. 58–64.
25. Piątkowski P. Testing of Ecological Properties of Spark Ignition Engine Fed with LPG Mixture. *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2011, P. 607–618.