

О.А. Сірий, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0001-5811-9037
А.С. Соломаха, канд. техн. наук, доц. ORCID 0000-0002-1061-6277
Т.В. Чирка, канд. техн. наук, наук. співр. ORCID 000-0002-8843-7025
Д.З. Пакош, магістр, ORCID 0000-0001-5811-9037
Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗПИЛЕННЯ ЗРІДЖЕНОГО ГАЗУ ДЛЯ ДВЗ

В роботі представлені результати чисельного моделювання процесу розпилення зрідженої суміші пропан-бутану. Метою роботи є розробка чисельної моделі термогідродинамічного процесу розпилення зріджених газів та визначення теплофізичних та геометричних параметрів факелу розпилю з ціллю удосконалення існуючої схеми паливоподачі двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ). У роботі представлено теоретичні аспекти процесу розпилення зрідженого газу та визначено основні теплофізичні параметри, необхідні для проведення чисельних розрахунків досліджуваного явища. Застосовано метод чисельного моделювання, що базується на усередненому за Рейнольдсом рівнянні Нав'є-Стокса, модель налаштована за методом скінченних об'ємів. Виконано чисельні експерименти при впорскуванні зрідженої суміші пропан-бутану у потік повітря протягом періоду часу, достатнього для згорання в циліндрі ДВЗ. Встановлено залежність глибини проникнення паливного струменю у потік окисника, що набігає, в залежності від тиску подачі газу. Отримані профілі швидкостей, температур та концентрацій впорскуваної суміші та газової фази. Проведено теоретичну оцінку середнього розміру краплин розпилюваної рідини.

Ключові слова: глибина проникнення струменю, розпил, атомізація, зріджений газ, чисельна модель.

Вступ. Розпилення рідин в газових середовищах є важливим технологічним процесом в багатьох галузях. Існує велика кількість пристроїв для розпилю рідини, які являють собою розпилювачі чи форсунки. Розпилення струменю рідини відбувається за рахунок кінетичної енергії рідини, приведеного до високої швидкості повітря чи газу чи механічної енергії, прикладеної ззовні обертовим чи віброуючим пристроєм. Оскільки процес розпилення має випадковий характер, то результуюча розпилювана рідина характеризується широким діапазоном розмірів краплин.

Одним з важливих напрямків застосування розпилювання - двигуни внутрішнього згорання (ДВЗ). Згорання рідкого пального в дизельних двигунах, двигунах з іскровим запалюванням, газових турбінах, ракетних двигунах та промислового паливоспалюючому обладнанні залежить від ефективності розпилення палива в об'ємі окисника, що призводить до зростання питомої площі поверхні палива і дозволяє досягнути високого ступеня змішування та випаровування. У більшості систем спалювання зменшення розміру краплини палива приводить до вищих об'ємних показників теплоти спалювання, легшого запалювання, ширшого діапазону горіння, нижчих показників забруднюючих викидів з вихлопними газами.

Як правило, для здійснення розпилення використовують розпилювачі (атомізатори), основною вимогою при цьому являється висока відносна швидкість між рідиною, що розпилюється, та середовищем, куди здійснюється впорскування. Деякі атомізатори дозволяють досягнути таких параметрів за рахунок витоку рідини із високою швидкістю у відносно повільний потік газу чи повітря. Альтернативним підходом досягнення значної різниці швидкостей між рідною та газоподібним середовищем є повільне виштовування рідини у високошвидкісний потік газу (розпилення повітряним потоком).

При витіканні рідини через малий отвір під високим надлишковим тиском потенційна енергія перетворюється у кінетичну (швидкість). Для типового гідрокarbonатного палива при відсутності втрат на тертя тиск у соплі падає до 138 кПа, продукуючи швидкість на виході 18,6 м/с. Так як швидкість зростає як квадратний корінь тиску, то при 689 кПа швидкість становитиме 41,5 м/с, а при 5,5 МПа - 117 м/с.

Простий кільцевий отвір використовують для впорскування рідини в навколишнє повітря. Найкраще розпилення досягається за рахунок зменшення розміру отвору, але на практиці зазвичай обмежують мінімальний розмір отвору приблизно 0,3 мм. Найчастіше прості отвори атомізаторів (сопел) використовують у турбореактивних паливниках, дизельних та ракетних двигунах.

Характеристики процесу розпилення залежать від розміру та геометрії, фізичних властивостей розпилюваної фази (впорскуваної рідини) і нерозривної фази (газового середовища, у яке здійснюється впорскування). Для простих сопел діаметр отвору є вирішальним в процесі розпилення рідини. Теорія передбачає і експеримент підтверджує, що середній розмір краплини є приблизно пропорційний до квадратного кореня діаметру струменя рідини. Отже, збільшення у розмірах сопла приводить до зменшення подрібнення крапель розпалюваної рідини.

Характеристики потоку рідини та спрею більшості розпилювачів значним чином залежать від властивостей рідини таких як густина, в'язкість і поверхневий натяг. Значимість густини для процесу розпилення є применшеною тим фактом, що більшість рідин показують лише мінорні різниці у цій властивості. Більше того, наявні дані впливу густини рідини на середній розмір краплини показує її досить низький вплив.

Важливою характеристикою рідини в процесі розпилення є поверхнєве напруження, що відображає силу опору формування нових поверхонь (процесу руйнування струменю на краплини). Число Вебера являється відношенням сил інерції до сил поверхневого натягу, що є корисним безрозмірним параметром для кореляції розміру краплин. Для більшості чистих рідин в контакт з повітрям поверхневий натяг зменшується зі зростанням температури [1].

Не менш вагомий вплив на атомізацію має в'язкість, зростання якої приводить зниження числа Рейнольдса і також затримує розвиток будь-якої природної нестабільності в струмені. Комбінований ефект полягає в затримці дезінтеграції та зростанні розміру краплин у розпилюваній рідині. В загальному, зростання в'язкості при використанні простих конічних сопел має несприятливий на якість розпилення вплив, оскільки втрачає достатньо великі, то відповідно менше енергії залишається для розпилення і результати розпилення є більш «грубими» [2].

Мета дослідження. Метою роботи є розробка і тестування спрощеної чисельної моделі теплогідродинамічного процесу розпилення зріджених газів та визначення вхідних параметрів з використанням результатів експериментальних досліджень. Використання уточненої чисельної моделі спростить процес вдосконалення системи живлення двигуна зрідженим газом, яка забезпечує ефективне сумішоутворення для стаціонарних та середньої потужності транспортних двигунів відповідно до сучасних екологічних стандартів.

Розуміння процесу атомізації рідини та його ключових параметрів складають основу у розробці спрощеної чисельної моделі теплогідродинамічного процесу розпилення зріджених газів та вимагають попередньої детермінації в якості вхідних параметрів.

Теоретичні основи і результати досліджень. Вивчення випаровування багатокомпонентних рідких краплин слід розпочинати з розгляду випаровування однієї краплини з точки зору рівнянь збереження маси, часток та енергії рідкої та газової фаз. Додаткові припущення і спрощення ведуть до простіших моделей випаровування, придатних для CFD моделювання. Маса- та теплопереносу у моделюванні процесу випаровування спрею виражаються за допомогою критеріїв Шервуда та Нуссельта, відповідно.

Випаровування – процес фазового переходу, у якому молекули рідини долають сили міжмолекулярного притягування і відділяються у навколишнє газове середовище. При підведенні теплоти до рідини її температура, а, отже, і кінетична енергія молекул рідини, зростає, що характеризується пришвидшенням процесу випаровування. Також зменшення навколишнього тиску збільшує спричиняє зростання швидкості випаровування.

Чисельне моделювання виконано з використанням пакету прикладних програм газової динаміки (CFD) ANSYS CFX 14.5.

Дискретизації моделі здійснена з використанням методу скінченних об'ємів, що дозволяє проводити розрахунки при низькому споживанні оперативної пам'яті та характеризується швидкістю отримання результатів навіть при високих значеннях числа Рейнольдса турбулентних потоків.

Серед наявних літературі підходів у моделюванні процесу випаровування рідини вприскуваної рідини та виборі моделі турбулентності можна виділити пряме числове моделювання (DNS), усереднені по Рейнольдсу рівняння Нав'є-Стокса (RANS) та метод великих вихорів (LES). DNS ґрунтується на прямому розв'язанні рівнянь Нав'є-Стокса та отриманні детальної картини турбулентних потоків [3-6], але має обмеження у застосуванні, а саме для низьких значень чисел Рейнольдса, що не відповідає запитам поточного дослідження. LES полягає у явному розрахунку значних за масштабами ділянок турбулентності, тоді як вплив дрібних вихорів розраховується з використанням правил підсіткового замикання. Не дивлячись на підвищену точність розрахунку турбулентних потоків LES вимагає значні обчислювальні потужності. Оскільки в даному дослідженні цікавить прикладна сторона процесу випаровування, а саме теплогідродинамічна задача утворення парогазової суміші та її теплотехнічні характеристики, отримання усереднених по часу полів швидкостей за допомогою RANS із суттєвою економією обчислювальних ресурсів [7] визначає подальше застосування його в якості моделі турбулентності та k-ε моделі обчислення в'язкості вихору.

Розрахунок процесу вприску суміші зріджених газів пропану та бутану ґрунтується на основі рівнянь транспорту, а саме рівняння нерозривності, моменту та збереження енергії.

Рівняння нерозривності має вигляд

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho U) = 0 \quad (1)$$

де $\nabla(\rho U)$ - дивергенція густини потоку частинок рідини;
 ρ - густина частинок рідини, t - час.

Рівняння руху

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla(\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \tau + S_M \quad (2)$$

де тензор напруженості τ відноситься до швидкості деформації

$$\tau = \mu \left(\nabla U + (\nabla U)^T - \frac{2}{3} \delta \nabla U \right) \quad (3)$$

Рівняння енергії

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla(\rho U h_{tot}) = \nabla(\lambda \nabla T) + \nabla(U \tau) + US_M + S_E \quad (4)$$

де h_{tot} - ентальпія, що відноситься до статичної ентальпії $h(T, p)$ через

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} U^2 \quad (5)$$

$\nabla(U \tau)$ - відображає роботу, що відповідає в'язкому напруженню. Це моделює внутрішнє нагрівання у рідині за рахунок в'язкості і нехтується у потоці рідини.

US_M - відповідає за роботу моментів зовнішніх джерел, які нехтуються при моделюванні.

Краплини описуються розміром – діаметром, швидкістю, температурою та складом. Діаметр являється найбільш загальною мірою [2]. Як правило, розмір краплини описується певним середнім значенням – середнім діаметром Саутера (SMD, d_{32}) та залежить від типу сопла, витрати рідини, тиску подачі та розпилювача. SMD – діаметр такої краплини, що має відношення об'єму до площі поверхні рівне відношенню між сумою всіх об'ємів краплин до суми всіх площ поверхонь краплин.

Оскільки експериментальне визначення середнього розміру краплин розпилюваної рідини характеризується певною специфікою та складністю реалізації (зйомка з низьким рівнем експозиції, аналіз лазерної дифракції (LDA) [8], а також не являється безпосередньою метою даного дослідження (теплотехнічні параметри технології розпилення зрідженого газу в системі ДВЗ), то доцільно скористатися існуючими емпіричними рівняннями.

Серед емпіричних рівнянь для визначення середнього діаметру краплини часто використовують рівняння Ніроюасу та Kadota (1974), Ніроюасу та Arai (1990) [8], що базуються на числі Рейнольдса, числі Вебера та діаметрі випускового отвору сопла d_0 . При повному розпиленні рідини застосовується формула $SMD = 8,7(Re_i We_i)^{-0,28} d_0$ (6)

Існуючі формули [9-12] застосовувалися до різних типів сопел та умов розпилювання та вимагають уточнення та корегування у відповідності з досліджуваною моделлю та експериментом. Тому розрахункове рівняння повинне відповідати якнайближче параметрам рідини та використовуваного сопла.

Вприск суміші зрідженого газу здійснюється за допомогою сопла під тиском (LPi). Розпилення здійснюється з певним конічним профілем (full cone), тобто при виході із отвору сопла краплини слідує траєкторії, визначеній формою вихідного отвору сопла. В результаті таке розпилення має стійкий кут та однорідний розподіл краплин. Розмір краплин та розподіл розпилення характеризуються значною передбачуваністю та незалежністю від ламінарного потоку.

У виборі формули для розрахунку середнього діаметру краплин слід також враховувати розпилення рідини, що супроводжується її фазовою зміною внаслідок падіння тиску та відповідних температур (так звані спалахуючі спреї).

Гемчі [13] дослідив спалахуючу атомізацію гідрокарбонатів, що містять n-гексадекан та n-бутан (рис. 1).

Дослідження розміру краплини здійснювалося на основі аналізу отриманих фотознімків та зведені до наступної кореляції (відносна похибка вимірювання 6 % при довірчій ймовірності $W = 0,95$):

$$SMD = 118,4 - 28,3(\Delta T^* - K) \quad (6),$$

де ΔT^* – безрозмірний ступінь перегріву,

K – безрозмірне число кавітації, що показує різницю тисків та вимірює опір потоку до кавітації.

$$K = \frac{P_0 - P_v}{1/2 \rho U^2} \quad (7),$$

де P_0 – тиск середовища, у яке здійснюється впорскування,

P_v – тиск середовища подачі рідини до сопла,

ρ – густина рідини,

U – швидкість витікання рідини із сопла.

$$\Delta T^* = \Delta T / \Delta T_{crit} = (T_{inj} - T_{sat}(P_0)) / (T_{sat}(P_{inj}) - T_{sat}(P_0)) \quad (8),$$

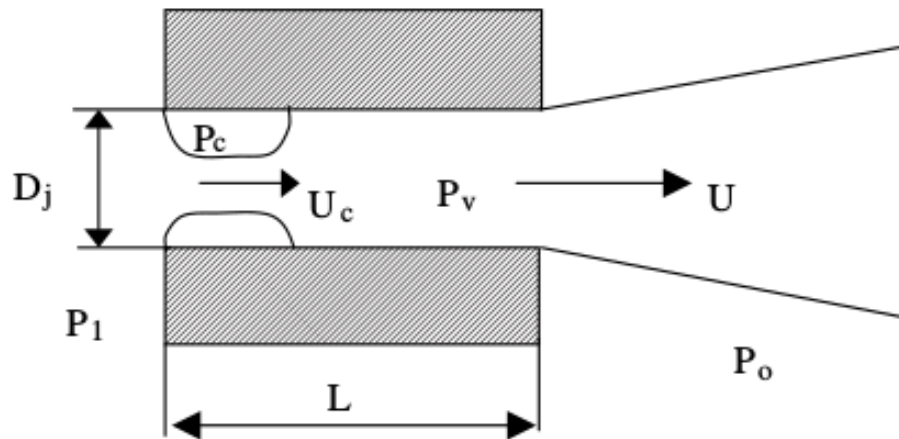


Рисунок 1 – Параметри форсунки та розпилюваної рідини

де T_{inj} – температура рідини, що впорскується, К;

$T_{sat}(P_0)$ – температура насичення рідини при тиску навколишнього середовища P_0 , К;

$T_{sat}(P_{inj})$ – температура насичення рідини при тиску перед подачею в сопло, К;

В статті розглядається нестационарна задача моделювання високошвидкісного струменю суміші пропану і бутану у зрідженому стані з форсунки LPG 2A (рис. 2, а) та представляє собою поліпропіленову трубку із внутрішнім діаметром 1мм та довжиною 150 мм, захищену латунним корпусом, що установлюється безпосередньо у канал, де здійснюється розпилювання. Геометрична комп'ютерна модель, що побудована для проведення чисельного експерименту, завдяки симетричності може бути представлена у половинному вигляді (рис 2, б).

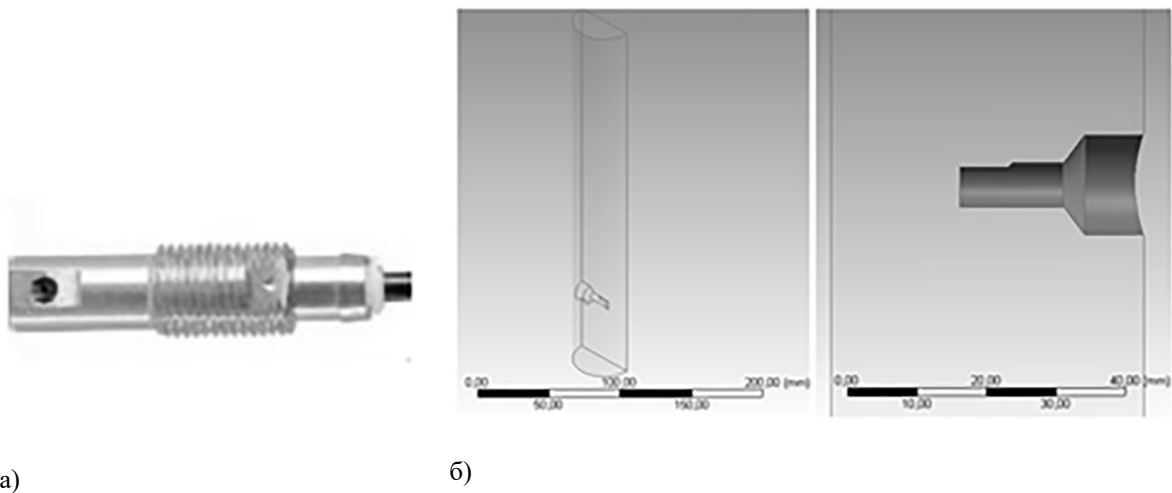


Рис. 2 – Форсунка типу LPG 2A та її геометрична модель чисельної симуляції процесу розпилення зрідженого газу (повне зображення моделі та ділянка з деталізацією форсунки)

Дискретизація моделі здійснена з використанням методу скінченних об'ємів, тому генерування сіткою найвної геометричної моделі здійснено тетраедрами (рис. 3).

Граничні умови наступні: подача суміші зріджених пропану та бутану у співвідношеннях (100:0, 50:50, 0:100) газу при температурі 293 К в трубу діаметром 45 мм та довжиною 300 мм при різних швидкостях у повітряний потік з температурою 293 К та швидкістю 30 м/с, що відповідає наближеній витраті повітря необхідній для спалювання суміші пропану та бутану.

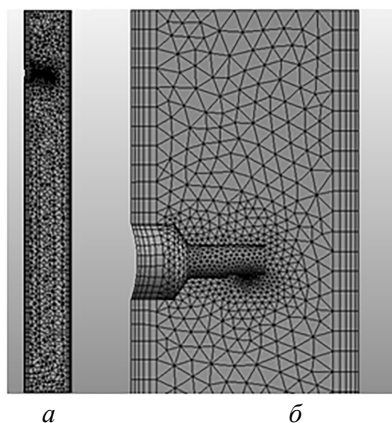


Рис. 3 – Згенерована сітка геометричної моделі: *a* – повне зображення моделі; *б* – ділянка з деталізацією форсунки

На виході задані граничні умови вихідного потоку в середовище з тиском 1 атм. Впорскувана суміш зрідженого газу розглядається як така, що являє собою еквівалентну за масою кількість палива, необхідного для виконання такої ж роботи, яку отримують при спалюванні дизельного палива. Розрахунки необхідної кількості впорскуваного у циліндр зрідженого газу та повітря приведені у табл. 1 для усереднених показників двигунів Isuzu автобусів «Богдан» міського типу. Експериментальні дослідження виконані в умовах дослідного експериментального стенду [14].

Таблиця 1 – Розрахунок середнього діаметру краплин розпилюваної зрідженої пропан-бутанової суміші

Компоне нт	P_0 , МПа	P_1 , МПа	ΔP , МПа	P_2 , МПа	ρ , кг/м ³	U , м/с	T_{inj} , К	$T_{sat}(P_0)$, К	$T_{sat}(P_{inj})$, К	K_{crit}	K	ΔT^*	SMD, μm	SMD _{avg} , μm
C ₃ H ₈	0,1	0,5	0,095	0,405	528	39,9	293	230,9	268,18	0,82	0,72	1,67	50,78	68,61
C ₄ H ₁₀	0,1	0,5	0,104	0,396	582	39,9	293	272,2	314,34	0,82	0,64	0,49	86,45	68,61
C ₃ H ₈	0,1	1	0,189	0,811	528	56,43	293	230,9	292,11	0,82	0,84	1,01	65,80	77,34
C ₄ H ₁₀	0,1	1	0,208	0,792	582	56,43	293	272,2	341,86	0,82	0,74	0,30	88,87	77,34
C ₃ H ₈	0,1	2	0,378	1,622	528	79,8	293	230,9	320,78	0,82	0,90	0,69	73,25	81,65
C ₄ H ₁₀	0,1	2	0,417	1,583	582	79,8	293	272,2	374,87	0,82	0,80	0,20	90,04	81,65

Моделювання випаровування та конденсація пропано-бутанової суміші ґрунтується на масових потоках та відтоках в підобластях випаровування та конденсації. Проведення моделювання теплогідродинамічного процесу впорскування суміші зріджених газів вимагає попереднього обчислення параметрів границі розділення рідини та газу, міжфазного коефіцієнту дифузії, теплоти випаровування, коефіцієнту масоперенесення між рідиною та газом для суміші пропан-бутану, локальний крок лінеаризації міжфазного масопереносу.

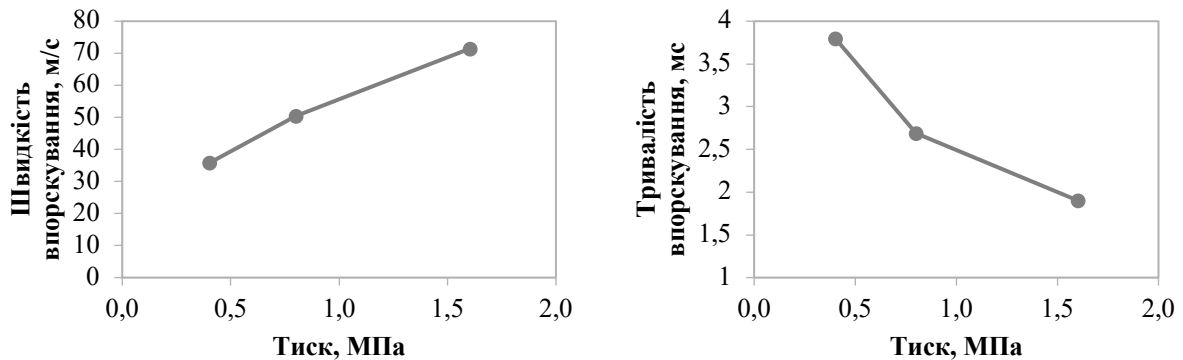
Оскільки подача пального через форсунку є дозованою та обмеженою у часі, тому розглядаємо нестационарну задачу із завданням тривалості подачі суміші зрідженого палива, що залежить від швидкості впорскування, та кроком розрахунку 0,1 мс. Оскільки тривалість залежить від швидкості впорскування, що в свою чергу залежить від тиску, тоді слід використати залежності тривалості впорскування та швидкості впорскування від тиску (рис. 4).

Для моделювання процесу впорскування було використано матеріали із бібліотеки розрахункового комплексу – суміші зріджених пропану-бутану та повітря. Причому, газова суміш пропан-бутану після випаровування вважається змінною за компонентами суміш за рахунок змішування з повітрям, тоді як впорскувана суміш зріджених газів пропан-бутану – незмінна за складом компонентів.

Проведенню чисельного розрахунку передувала перевірка літератури на наявність даних, які б могли бути використані для верифікації розробленої числової моделі. Близькими за суттю дослідження наведені у джерелі [15], де розглядається процес впорскування зрідженого бутану при різному надлишковому тиску та різній тривалості впорскування при кімнатній температурі.

Порівняння результатів розрахунку впорскування зрідженого бутану при тиску 2 МПа та тривалістю впорскування 2 мс з літературними даними здійснено на основі глибини проникнення та приведені на (рис. 5, а) [8]. Середньоквадратичне відхилення результатів досягає 25% та значною мірою визначається відмінностями геометричних характеристик застосовуваних інжекторів, заданих фізичних властивостей зрідженого газу та середнього розміру розпилюваної краплини, розрахованої на основі відомої в літературі емпіричної формули. Тому отримані результати дають можливість якісно оцінити отримані в подальшому результати чисельного розрахунку впорскування зрідженого газу та потребує уточнюючої верифікації на розробленому експериментальному стенді.

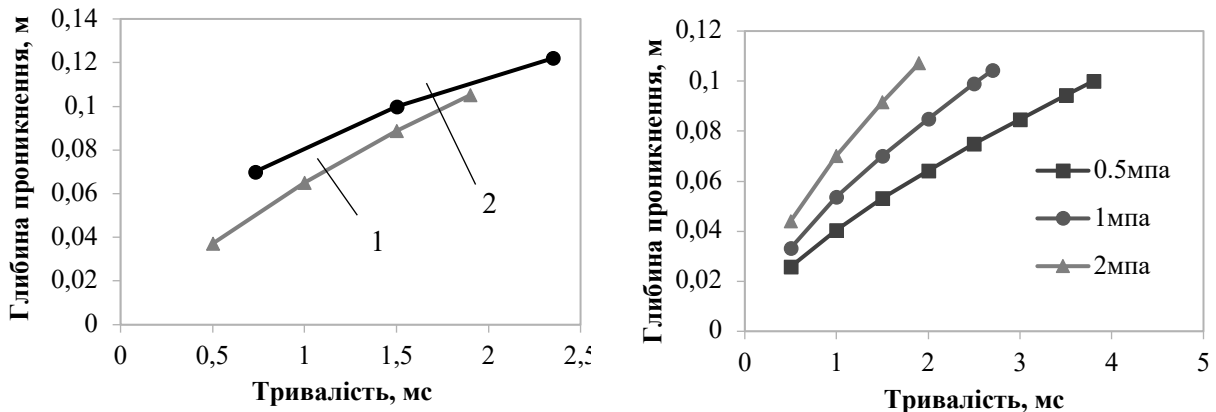
Глибину проникнення доцільніше оцінювати без впливу повітряних потоків для формування суміші згоряння для різних складових зрідженого газу та їх суміші. Проведені чисельні розрахунки швидкості та температури пропану, бутану та їхньої суміші у пропорції 50 %:50 % при швидкості впорскування, що відповідає 2 МПа на вході у форсунку, представлені на рисунках.



а) б)

Рисунок 4 – Швидкість (а) та тривалість (б) впорскування в залежності від тиску

Як видно на рис. 5, б, проведено розрахунки залежності глибини проникнення пропану-бутану при тиску впорскування 0,5 МПа, 1 МПа, 2 МПа в проміжку часу до 4 мс. Впорскування здійснювалося у середовище із атмосферним тиском. Кількість впорскуваної суміші залишається постійною, тому зростання тиску впорскування відображається на тривалості подачі зрідженого газу. Із зростанням тиску впорскування зростає глибина проникнення.



а) б)

Рис. 5 – Глибина проникнення струменя у потік окисника в залежності від часу впорскування (а) та часу відкриття форсунки (б), 1 – розрахунок, 2 – Simón M. et al

Оскільки в реальних умовах пальне формує суміш із повітрям, то результати чисельних розрахунків відповідають схемі при подачі повітря перед форсункою.

Проведені розрахунки процесу впорскування суміші пропану і бутану у повітряний потік представлені на рис. 6 – 8.

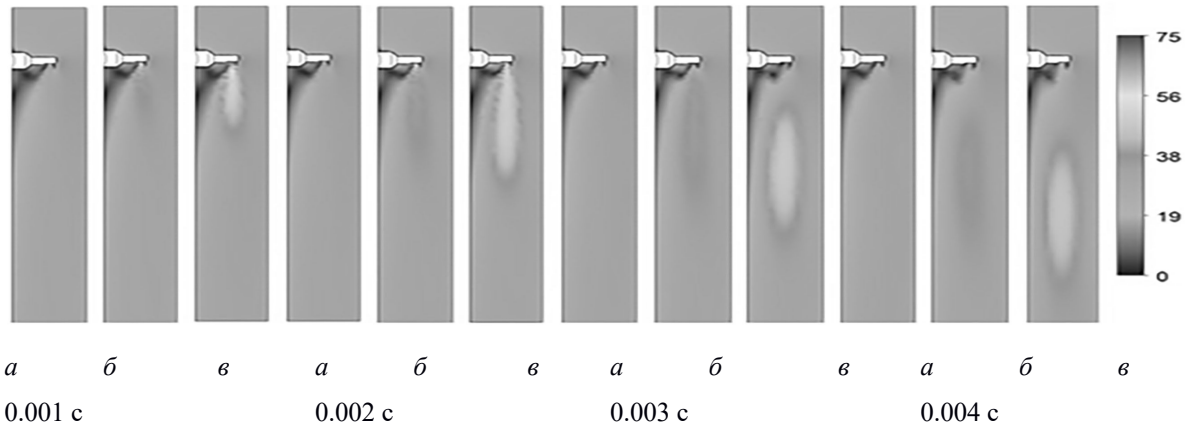


Рисунок 6 – Поля швидкостей повітря та суміші пропан-бутан при зміні часу та тиску впорскування (а – 0,5 МПа, б – 1 МПа, в – 2 МПа)

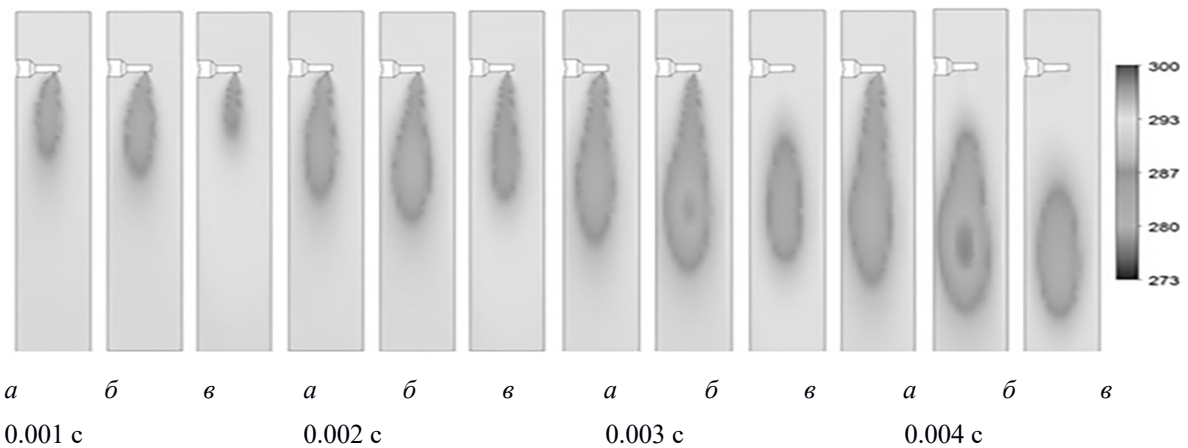


Рисунок 7 – Температурні поля повітря та суміші пропан-бутан при різному часі та тиску впорскування (а – 0,5 МПа, б – 1 МПа, в – 2 МПа)

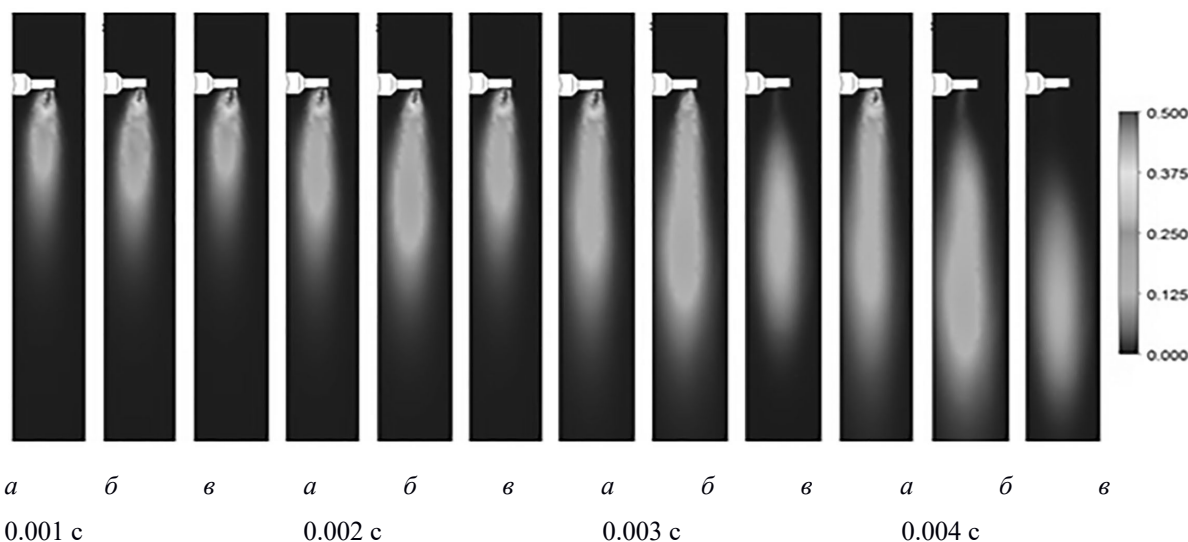


Рисунок 8 – Поля концентрацій суміші пропан-бутан при різному часі та тиску впорскування (а – 0,5 МПа, б – 1 МПа, в – 2 МПа)

При розміщенні форсунки у каналі проявляється вплив повітряного потоку на форму впорскуваної суміші зрідженого газу за рахунок створення ділянок завихрень за інжектором, що зміщує впорскувану рідину у сторону основи монтажу інжектора.

Аналізуючи графіки температурних полів по перерізу каналу на рисунку 7, слід відзначити заохолоджені ділянки нижче 280 К. Випаровування впорскуваного зрідженого газу у зв'язку з різкою зміною його тиску з 2 МПа до атмосферного тиску спричинює заохолодження повітряно-газового потоку, що розглядається перспективним з точки зору підвищення ефективності роботи циклу ДВЗ.

Висновки

1. Систематизовані теоретичні аспекти процесу впорскування зріджених газів та визначено основні фізичні параметри, необхідні для проведення подальшого чисельного моделювання, а саме емпірично встановлено середній розмір розпилюваної краплини в залежності від надлишкового тиску та інші фізичні параметри.

2. Вибраний найбільш оптимальний метод чисельного моделювання, що базується на усередненому за Рейнольдсом рівнянні Нав'є-Стокса та проведена дискретизація моделі за допомогою методу скінченних об'ємів.

3. Розроблена чисельна модель, що дозволяє моделювати теплогідродинамічні процеси впорскування зріджених газів у канал подачі підготовленої повітряно-паливної суміші у циліндр ДВЗ з відносною похибкою 17,8 %.

4. Проведені чисельні експерименти з використанням розробленої моделі з наступними етапами дослідження:

а. Впорскування пропану, бутану та їхньої суміші у повітряне середовище та встановлення глибини проникнення спрею за проміжок часу подачі достатньої для спалювання в одному циклі роботи циліндра ДВЗ та отримані поля швидкостей, температур та концентрацій газової фази.

б. Проведення дослідження впорскування суміші пропану та бутану у співвідношенні 50 %:50 % при різному тиску впорскування: 0,5 МПа, 1 МПа, 2 МПа. Встановлено залежність глибини проникнення від тиску подачі газу.

с. Впорскування суміші пропан-бутану у повітряний потік при різному тиску впорскування: 0,5 МПа, 1 МПа, 2 МПа. Отримані профілі швидкостей, температур та концентрацій газової фази впорскуваної суміші та повітря.

Список використаної літератури

1. Christensen L.S., Steely S.L. Monodisperse atomizers for agricultural aviation applications: NACA CR-159777. 1980, 82p.

2. Nasser Ashgriz, Handbook of Atomization and Sprays: Theory and Applications. Springer Science+Business Media, LLC 2011.

3. Gorokhovski M., Herrmann M., Modeling primary atomization: Annu. Rev. Fluid Mech. pp. 343–366. 2008.

4. Luo, K., Pitsch, H., Pai, M. G., Desjardins, O.. Direct numerical simulations and analysis of three-dimensional n-heptane spray flames in a model swirl combustor: Proceedings of the Combustion Institute. 33(2). 2143–2152. 2011. doi:10.1016/j.proci.2010.06.077.

5. Li Y., Gu W., Wang D., He J. Direct numerical simulation of polydisperse aerosol particles deposition in low Reynolds number turbulent flow: Annals of Nuclear Energy. vol. 121. 223–231. 2018. doi:10.1016/j.anucene.2018.07.034

6. Fréret L., Thomine O., Direct Numerical Simulation of polydisperse evaporating sprays in 3 D jet configuration using Euler-Euler and Euler-Lagrange formalisms. vol.3. 2012.

7. Kolaitis Dionysios I., Maria A., Founti Numerical Simulation of Diesel Spray Evaporation in a “Stabilized Cool Flame” Reactor: A Comparative Study, Flow, Turbulence and Combustion. vol. 82. p.599–619. 2009. doi:10.1007/s10494-008-9171-1.

8. Simón M.-M., Fausto S., Vicente B., J. Manuel Riesco-Avila. Liquid Sprays Characteristics in Diesel Engines, Fuel Injection: IntechOpen. August 17th 2010. DOI: 10.5772/9724.

9. Semião V., Andrade P., Carvalho M. da G. Spray characterization: Numerical prediction of Sauter mean diameter and droplet size distribution. Fuel. 75(15). 1707–1714. 1996. doi:10.1016/s0016-2361(96)00163-9.

10. Dahl H.D., Muschelknautz E. Chem. Eng. Tech. 15:pp. 221-231. 1992.

11. Troesch H.A. Zerstäubung von Flüssigkeiten. Dissertation. Fortschrittsberichte VDI. Reihe 3. Nr. 607, 1999.

12. Glaser H.W., Brennst. Wärme Kraft 38. 5:193-200. 1986.

13. Gemci T., Yakut K., Chigier N., Ho T.C. Experimental study of flash atomization of binary hydrocarbon liquids. International Journal of Multiphase Flow, 30(4), 395–417. 2004. doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2003.12.003.

14. Сірий О.А., Соломаха А.С., Пакош Д.З. Дослідження процесу розпилення зрідженої суміші пропан-бутану для двигунів внутрішнього згорання. Екологічні науки : науково-практичний журнал. 2020. № 2(29). Т. 1. С. 48-53.

15. Piątkowski P., Bohdal T. Testing of Ecological Properties of Spark Ignition Engine Fed with LPG Mixture Rocznik Ochrona Środowiska. T.13. pp.607-618. 2011.

A. Sirij, PhD, Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-5811-9037
A. Solomakha, PhD, Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-1061-6277
T. Chyrka, PhD, RF., ORCID 000-0002-8843-7025
D. Pakosh, Master's student, ORCID 0000-0001-5811-9037

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

FEATURES OF LIQUID GAS SPRAYING PROCESS SIMULATION FOR INTERNAL COMBUSTION ENGINE

The paper presents the results of numerical modeling of the spraying process a propane-butane liquefied mixture. The aim of the work is to develop a numerical model of the thermohydrodynamic process of liquefied gas spraying and to determine the thermophysical and geometric parameters of the spray torch in order to improve the existing fuel supply scheme of the internal combustion engine (ICE). The main theoretical aspects of the liquefied gas spraying process and the main thermophysical parameters required for numerical calculations of the studied phenomenon are presented in the paper. A numerical simulation method based on the Reynolds-averaged Navier-Stokes equation is used, and the model is tuned using the finite volume method. Numerical experiments were performed by injecting a liquefied propane-butane mixture into the air stream for a period of time sufficient for combustion in the internal combustion engine cylinder. The dependence of the depth of penetration of the fuel stream into the flow of oxidizing oxide, depending on the gas supply pressure, is established. Profiles of velocities, temperatures and concentrations of the injected mixture and gas phase are obtained. Theoretical estimation of the average droplet size of the sprayed liquid is carried out.

Keywords: depth of jet penetration, spray, atomization, liquefied gas, numerical model.

REFERENCES

1. L.S. Christensen and S.L. Steely, Monodisperse atomizers for agricultural aviation applications, NACA CR-159777, February 1980.
2. Nasser Ashgriz. Handbook of Atomization and Sprays: Theory and Applications. Springer Science+Business Media, LLC 2011.
3. M. Gorokhovski, M. Herrmann, Modeling primary atomization, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 40 398 (2008) 343–366.
4. K. Luo, H. Pitsch, M.G. Pai, and O. Desjardins, Direct numerical simulations and analysis of three-dimensional n-heptane spray flames in a model swirl combustor. *Proceedings of the Combustion Institute*, 33(2), pp. 2143–2152, 2011. doi:10.1016/j.proci.2010.06.077.
5. Li, Y., Gu, W., Wang, D., & He, J. Direct numerical simulation of polydisperse aerosol particles deposition in low Reynolds number turbulent flow. *Annals of Nuclear Energy*, 121, 223–231. doi:10.1016/j.anucene.2018.07.034
6. L. Fréret, O. Thomine, Direct Numerical Simulation of polydisperse evaporating sprays in 3 D jet configuration using Euler-Euler and Euler-Lagrange formalisms, vol.3, 2012.
7. I. Kolaitis Dionysios and A. Maria, Founti Numerical Simulation of Diesel Spray Evaporation in a "Stabilized Cool Flame" Reactor: A Comparative Study, *Flow, Turbulence and Combustion*, vol. 82, p.599–619. 2009. doi:10.1007/s10494-008-9171-1.
8. Simón Martínez-Martínez, Fausto Sanchez, Vicente Bermudez and J. Manuel Riesco-Avila, Liquid Sprays Characteristics in Diesel Engines, Fuel Injection, Daniela Siano, IntechOpen, August 17th 2010. DOI: 10.5772/9724.
9. V. Semião, P. Andrade and M. da G. Carvalho, Spray characterization: Numerical prediction of Sauter mean diameter and droplet size distribution. *Fuel*, 75(15), 1707–1714. 1996. doi:10.1016/s0016-2361(96)00163-9.
10. H.D. Dahl and E. Muschelknautz, Measurement of the droplet size distribution of a full cone nozzle, *Chem. Eng. Tech.* 15:221-231, 1992.
11. H. A. Troesch, Zerstäubung von Flüssigkeiten, Dissertation, Fortschrittsberichte VDI, Reihe 3, Nr. 607, 1999.
12. H. W. Glaser, *Brennst. Wärme Kraft* 38, 5:193-200, 1986.
13. T. Gemci, K. Yakut, N. Chigier and T.C. Ho, Experimental study of flash atomization of binary hydrocarbon liquids. *International Journal of Multiphase Flow*, 30(4), 395–417. 2004. doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2003.12.003
14. O. Siriyi, A. Solomakha, D. Pakosh Investigation of the process of spraying a liquefied propane-butane mixture for internal combustion engines. *Ecological sciences: scientific and practical journal*, Vol. 2(29), pp. 48-53, 2020.
15. P. Piątkowski and T. Bohdal., Testing of Ecological Properties of Spark Ignition Engine Fed with LPG Mixture. *Rocznik Ochrona Środowiska*, Vol. 13, pp.607-618, 2011.

Надійшла 15.07.2020

Received 15.07.2020