

УДК 66.071.4

doi: 10.32620/aktt.2025.6.06

О. В. ШИПУЛЬ, Д. А. БРЕГА, О. А. ПАВЛЕНКО, В. О. ГАРИН, О. В. ТРИФОНОВ

Національний аерокосмічний університет

«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ УТВОРЕННЯ ПАЛИВНОЇ СУМІШІ В КАНАЛІ ГАЗОДЕТОНАЦІЙНОГО РОЗМІНОВУВАЧА

Предметом дослідження є газодинамічний процес циклічного утворення паливної суміші та заповнення нею каналу розміновувача. **Метою** роботи є мінімізація відхилень параметрів суміші від стехіометричного складу, визначення кількості, необхідної витратної характеристики та просторового положення клапанів подачі для палива та окисника. **Завдання дослідження** полягають у проведенні числових експериментів наповнення каналу розміновувача паливною сумішшю, оцінці якості отриманої суміші з урахуванням обмежень щодо часу наповнення. Задля вирішення поставленої задачі необхідно розробити математичну модель фізичного процесу змішування компонентів палива з урахування особливостей газодинамічної течії у каналах. Отримано наступні **результати**: запропоновано конструктивне виконання системи циклічного сумішоутворення, що задовольняє функціональним вимогам до працездатності розміновувача, а саме: час заповнення $-0,05\text{с}$, та стехіометричний склад. Однорідність утвореної суміші була опосередковано підтверджена експериментальними випробуваннями шляхом порівняння максимальних значень температури з теоретично досяжними для ідеальної суміші. Дана якісна та кількісна оцінка технічним рішенням запропонованого конструктиву. Створено математичну модель процесу генерації суміші із заданим компонентним складом й проведено серію числових експериментів. Моделювання здійснено з використанням програмного забезпечення ANSYS Fluent. Розрахунок виконано в нестационарній постановці. Базуючись на результатах розрахунку, отриманих значеннях швидкостей газового потоку, поля тиску й температури визначено вимоги до клапанів та їх витратну характеристику. Результати моделювання показали, що запропоновані конструктивні рішення щодо кількості, типу та взаємного розташування клапанів подачі окисника і палива забезпечують необхідну швидкість заповнення каналу з дотриманням стехіометричного складу, що забезпечує стійке горіння суміші в детонаційному режимі. Досягнуто стехіометричний склад газової суміші із точністю не нижче 3%. **Наукова новизна** отриманих результатів полягає у визначенні взаємозв'язку геометричних та газодинамічних параметрів змішувача, що дозволяють отримувати суміш з необхідними характеристиками гомогенності для вихрового методу змішування. Проаналізовано компонентний склад як у переддетонаційній камері так і в основному каналі розміновувача, потрапляння кисню в основний канал може стати додатковим тригером детонаційних процесів, які можуть бути змодельовані базуючись на запропонованій математичній моделі.

Ключові слова: математична модель багатокомпонентної течії, стехіометрична суміш, числове моделювання, детонація, горіння.

1. Вступ

На сьогодні проблема розмінування потребує далекоглядного планування та стратегічних рішень, адже існуючі технології не в змозі забезпечити необхідний рівень ефективності у короткостроковій перспективі. Переважна більшість машин розмінування працює спираючись на контактну взаємодію катків або цепків машини з вибухівкою, що суттєво впливає на їх ресурс і собівартість розмінування. Україна на сьогодні не виробляє такі машини, а здебільшого отримує їх в якості гуманітарної допомоги. З урахування загальної площі територій які потребують моніторингу, перевірки та розмінування, без налагодження серійного виробництва таких машин на очи-

щення територій потрібно десятиріччя.

На разі багатообіцяючою технологією розмінування є використання принципу безконтактної імпульсної дії, в основі якої лежить використання енергії від керованої детонації газової суміші для створення ударної хвилі яка ініціюватиме спрацювання детонатора боєприпасу. Слід зазначити, що використання безконтактного газодетонаційного розміновувача дозволяє суттєво підвищити швидкість розмінування та знизити собівартість за рахунок легкого масштабування технології – збільшення кількості секцій детонаційних труб які можуть бути встановлені на будь-яку платформу.

Застосування даного принципу накладає певні вимоги щодо конструктивного виконання системи



[Creative Commons Attribution
NonCommercial 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

подачі, дозування та сумішоутворення. На сьогодні існує декілька методів сумішоутворення які відрізняються за швидкістю процесу та однорідністю суміші: за рахунок інтенсивного макро-перемішування хвилями, індукованими вихровим обертанням, у поєднанні з локальною турбулізацією [1], на основі впускного закручування потоку в циліндричному каналі [2], на основі зустрічних струменів, який належить до пасивного струменевого змішування шляхом колізії зустрічних ко-лінійних джетів [3], на основі статичного гвинтового міксеру зі спіральними елементами [4]. Найбільш розповсюдженими є технології пасивного, струменевого та вихрового змішування. Пасивне змішування відбувається за рахунок інтеграції в канал лопаток або інших геометричних елементів, що локально збуджують потік утворюючи зони циркуляції. Серед недоліків слід зазначити суттєвий час змішування, необхідність узгодження геометричних параметрів каналу, насамперед його довжини з швидкісним напором компонентів суміші. Струменеве змішування базується на інерційній взаємодії швидких струменів, що дозволяє збільшити ефективну поверхню змішування та зменшити відстань молекулярної дифузії. Для даного методу характерна висока продуктивність процесу та за різними оцінками [5, 6] помірні відхилення від однорідності суміші. Перш за все це можна пояснити недостатньою керованістю процесу, адже і для струменевого принципу і для вихрового ступінь однорідності визначається турбулентністю потоків, їх взаємодією та організацією течії. В рамках струминного методу необхідно забезпечити зустрічний рух потоків, що передбачає співставні швидкості обох компонент, у випадку з паливною сумішшю частка окисника відрізняється від частки палива, а отже швидкості потоків будуть відрізнятися, що в цілому може негативно позначитися на однорідності суміші [7, 8]. Суттєвий вплив на неоднорідність змішування має співвідношення витрат компонентів [9]. Окрім того, наявність додаткових конструктивних рішень (закрутка) покращують ефект змішування [10]. Для вихрових методів характерно використання більш складної системи подачі компонентів суміші, найчастіше використовують тангенціальну подачу для палива, та осьову для окисника. Тангенціальна подача формує єдину вихрову структуру, що взаємодіє з осьовим потоком, суттєво збільшуючи рівномірність та гомогенність суміші, що дуже важливо, адже забезпечення однорідного складу газової суміші є необхідною умовою для гомогенного процесу згоряння [11].

Виходячи з геометричних розмірів переддетонаційного каналу - довжина 400 мм, діаметр 40 мм запропоновано для подальших досліджень використовувати саме вихровий метод. В даній конфігурації неможливо забезпечити положення клапанів подачі

для перехресного або зустрічного руху потоків.

Наступним логічним кроком верифікації ефективності роботи запропонованого метода отримання паливної суміші є дослідження процесу перемішування компонент суміші під час перетікання через розроблений змішувач. Тому метою цієї роботи є науково-експериментальна оцінка конструкції змішувача щодо забезпечення точності й гомогенності газової суміші, а завдання полягають у проведенні числових експериментів з дослідження перетікання компонентів газового потоку через сопла змішувача системи генерації суміші, що забезпечують її стехіометричний склад, й визначену однорідність суміші.

2. Об'єкт дослідження

В якості об'єкта дослідження виступає проточна частина розмінювача, рис.1, а саме камера ініціації детонаційного режиму горіння (3). Робота приладу відбувається за наступним алгоритмом: камера (3) заповнюється окиснювачем та паливом, парціальний тиск компонентів регулюється блоком керування електромагнітних клапанів (5), в камері (2) формується вторинна паливна суміш, яка за нормальних умов може горіти лише в дефлаграційному режимі, вторинна суміш через циклічний клапан (1) потрапляє в основний канал (6) витісняючи атмосферне повітря. Ініціація горіння відбувається за допомогою свічки розпалу (4). Первинна суміш ініціює детонаційний режим горіння, фронт якого поширюється на вторинну суміш в основному каналі, далі відбувається перекриття детонаційного каналу з наступною фазою формування первинної та вторинної суміші.

В якості окисника для первинної суміші використовується кисень, а для вторинної повітря. Ефективність роботи розмінювача визначається саме здатністю первинної суміші переходити в детонаційний режим. Серед основних чинників, що впливають на характер розповсюдження фронту горіння можна виділити геометричні параметри каналу – діаметр та довжина, енергетичні параметри системи підпалювання, наявність локальних збудників турбулентності та якість паливної суміші яка передбачає мінімальні відхилення від стехіометрії [12, 13].

Слід зазначити, що в рамках даної роботи обмеженням щодо часу сумішоутворення є період циклу наповнення, що становить 10 Hz відповідно до частоти обертання крокового двигуна. За консервативною оцінкою час наповнення та ініціації горіння повинен становити $< 0,05$ с. Таку швидкість сумішоутворення можна отримати лише вихровим або струменевим змішуванням.

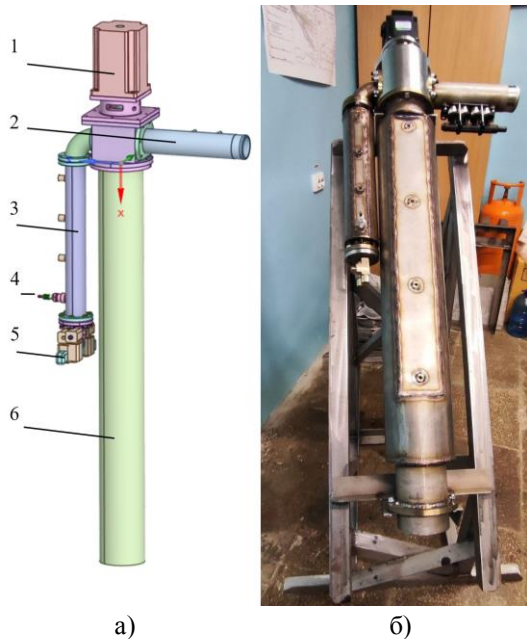


Рис. 1. Геометрія розмінювача (а) та лабораторний зразок для проведення експериментальних досліджень

З урахування циклу наповнення визначимо необхідні параметри клапанів подачі окисника та палива. В якості палива передбачено використання пропану. Об'єм камери для заповнення сумішшю пропан-кисень становить $0,0006152 \text{ м}^3$. Стехіометричний склад горючої суміші передбачає об'єм кисню в камері – $0,000482 \text{ м}^3$ та пропану $0,000133 \text{ м}^3$.

Витратна характеристика клапану подачі кисню $K_v = 0,00964 \text{ м}^3/\text{с}$, пропану – $0,00266 \text{ м}^3/\text{с}$. Відповідно до отриманих значень конфігурація системи змішування включатиме 3 клапани подачі кисню та один клапан подачі пропану. Геометрію моделі змішувача для розрахунків наведено на рис. 2

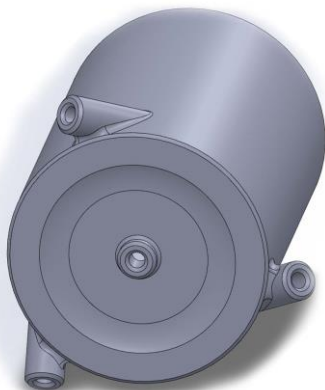


Рис. 2. Геометрія моделі змішувача

Канали подачі пропану виконано з кутами нахилу 60° у радіальному та 45° в осьовому напрямку. Така комбінація дозволить отримати більші значення дотичних швидкостей в порівнянні з осьовими

компонентами і створить вихрову структуру з зоною розрідження вздовж осі, що підвищить інтенсивність процесів дифузії компонент.

Дослідженню підлягає процес наповнення переддетонаційного каналу киснем та пропаном та сумішоутворення з витісненням повітря в основний канал розмінювача. Конструкція каналу виконана з урахуванням вимог щодо простоти його виготовлення та достатнього запасу міцності для сталої безпечної експлуатації. Основна частина каналу це сталева цільнотягнута труба з звареними посадковими місцями для розміщення клапанів подачі компонент паливної суміші, а також блоку керування системи ініціації горіння.

3. Моделювання процесу змішування компонентів газової суміші

Числове моделювання газодинамічного процесу сумішоутворення з заданим компонентним складом під час перетікання через змішувач в системі генерації суміші виконано за методом скінчених елементів з використання програми Ansys-Fluent [14] із метою визначення параметрів швидкостей газового потоку, масової витрати компонентів газової суміші та її однорідності.

Геометрія моделі і її дискретизація. Для розрахунку була підготовлена модель яка являє собою внутрішню порожнину ділянки змішувача (рис. 3). В зазначених зонах розрахункова модель складається з двох доменів зі спільним інтерфейсом. Геометрія внутрішньої порожнини досліджуваного змішувача ідентична реальному. Моніторинг проводився з урахуванням середнього значення масової концентрації кисню та пропану на виході зі змішувача.

Для моделювання наповнення киснем та пропаном використовуються моделі ідеального газу. Розрахункову модель розбито на 1,1 млн. скінчених елементів (рис. 3), значення числа Куранта $C < 5$.

Для розв'язання визначальних рівнянь моделі використано метод скінчених об'ємів [15], за яким значення фізичних змінних розраховувалися (і зберігалися) лише в центрах скінчених елементів, а на гранях цих елементів розраховувалися потоки маси, імпульсу та енергії. Водночас просторові похідні апроксимувалися з використанням неявних різнице-вих операторів другого порядку точності. У межевому шарі створено п'ять шарів скінчених елементів для коректного відображення пристінкової течії.

Граничні й початкові умови. В розрахунковій моделі визначено входні границі, де задані умови масової витрати палива та окисника який забезпечує подачу компонентів паливної суміші у стехіометричному співвідношенні, причому відхилення молярної концентрації встановлено не вище 1%.

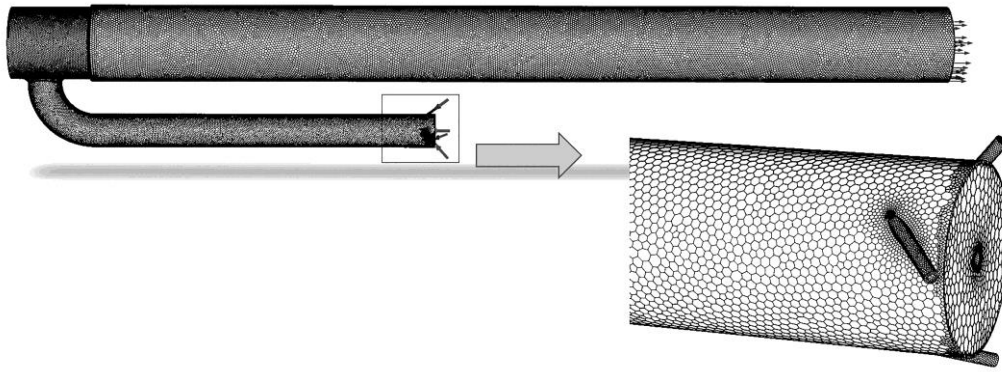


Рис. 3. Скінчено-елементна розрахункова модель проточної частини переддетонаційної камери і основного каналу

Зокрема досліджувалася пропан-киснева суміш у співвідношенні 1:5 відповідних компонентів ($C_3H_8 + 5O_2 = 3CO_2 + 4H_2O$). Напрямок потоку для палива – по нормалі до входу, для окисника задані компоненти вектора швидкості для моделювання тангенціальної подачі. Режим потоку – надзвуковий. Теплообмін між газовою сумішшю і стінками каналу не моделювався з огляду на технічну можливість контролювати значення температури кожного компоненту суміші.

Експериментальні дослідження передбачено проводити за температури оточуючого середовища – 25° С (рис. 5). Розрахунок задачі здійснено у нестационарній постановці

Визначальні рівняння. Однофазний багатокомпонентний потік взято за модель для опису процесу сумішоутворення. Рівняння для розрахунку складу суміші застосовані у вигляді [16, 17]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{d\vec{u}}{dt} = \text{div} \vec{P} + \vec{f}, \quad (2)$$

$$\rho \frac{de}{dt} = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + \vec{P} \cdot \text{grad} \vec{u}, \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial c_i}{\partial t} = -\text{div} \vec{I}_i, \quad i = 1, \dots, N-1, \quad (4)$$

де $\rho(\rho_i)$ – густина суміші та її компонентів i ;

c_i – масова концентрація компонентів i ;

$\vec{u}$ – вектор швидкості;

$\vec{P}$ – тензор напружень;

$\vec{I}_i = \rho_i \vec{w}_i$ – вектор дифузійного потоку;

T – температура газу;

λ – коефіцієнт теплопровідності газу;

e – внутрішня енергія газу.

При визначенні вектору дифузійного потоку ефекти термо- та бародифузії в моделі не враховувалися, а тому швидкість дифузії в (4) була задана законом Фіка [18, 19]:

$$\vec{w}_i = -D_i \text{grad} c_i, \quad (5)$$

де D_i – коефіцієнт дифузії компонентів i у суміші з N компонентами.

У цьому випадку дія об'ємних сил $\vec{f}$ (гравітація) враховується для забезпечення можливості розшарування паливної суміші від компонентів різної густини. При розрахунку щільності та газової константи суміші використовуються стандартні правила змішування:

$$\frac{1}{\rho} = \sum_{i=1}^N \frac{c_i}{\rho_i}, \quad R = \sum_{i=1}^N c_i R_i, \quad (6)$$

Математична модель (1)–(6) замикається рівнянням SST моделі турбулентності [20]. Такий вибір обґрунтований можливістю врахування особливостей течії, як в об'ємі камери, так і в пристінкових шарах, що особливо важливо для аналізу складу суміші в порожнинах деталі.

Для визначення ступеня гомогенності суміші використовуватимемо наступний вираз:

$$\vartheta = \frac{\sigma C_n}{[C_n]}, \quad (7)$$

де $[C_n]$ – задане значення молярної концентрації палива, яке, як правило, відповідає стехіометричному співвідношенню;

σC_n – найкраща оцінка середньоквадратичного відхилення молярної концентрації палива, визначена як:

$$\sigma C_n = \sqrt{\sum_N (C_{nk} - MC_{nk})^2 \bar{V}_k}, \quad (8)$$

де MC_n – математичне очікування молярної концентрації палива (9).

$$MC_n = \sum_N \bar{V}_{kk} C_{nk}. \quad (9)$$

Налаштування вирішувача. Початковий крок розв'язання рівнянь за часом встановлено 10^{-6} секунди, та згодом він збільшується до 10^{-4} секунди. Схема за часом – Second Order Backward Euler. Інші – High Resolution.

Для визначення залежностей розрахункових параметрів процесу за часом використана мова CEL, відповідно до якої параметр оцінки якості перемішування суміші у потоку (7) на виході зі змішувача має вигляд:

$$\text{sqrt}(\text{areaAve}((\text{areaAve}(\text{C3H8IdealGas.MolarFraction})@\text{Outlet}) - \text{C3H8IdealGas.MolarFraction})^2)@\text{Outlet}) / (\text{areaAve}(\text{CH4IdealGas.MolarFraction})@\text{Outlet}) \quad (10)$$

4. Аналіз отриманих результатів

Відповідно до визначених вище завдань дослідження проведено числовий експеримент та отримано поля швидкостей газового потоку, масову витрату компонентів газової суміші через змішувач, поля тиску й концентрацій.

На рис. 4 - 6 наведено поля швидкостей та концентрацій повітря за перетином у змішувачі та у каналах. Результати моделювання показали, що за необхідний час – 0,05 с з заданими витратними характеристиками вдається зменшити концентрацію повітря та досягти певної однорідності суміші пропан-кисень. Проте швидкості заповнення паливом та окисником не узгоджені, що призводить до потрапляння кисню в основний канал змішувача (рис. 7), що може призводити до раннього виникнення детонації і порушені циклу роботи приладу.

Слід зазначити чіткий патерн вихрової структури в каналі змішування, що має позитивний вплив на однорідність і контрольованість сумішоутворення.

Розподілення кисню вздовж переддетонаційного каналу – однорідне за виключенням зони інжекції



Рис. 4. Поля швидкостей у центральному перерізі змішувача у каналах розміновувача

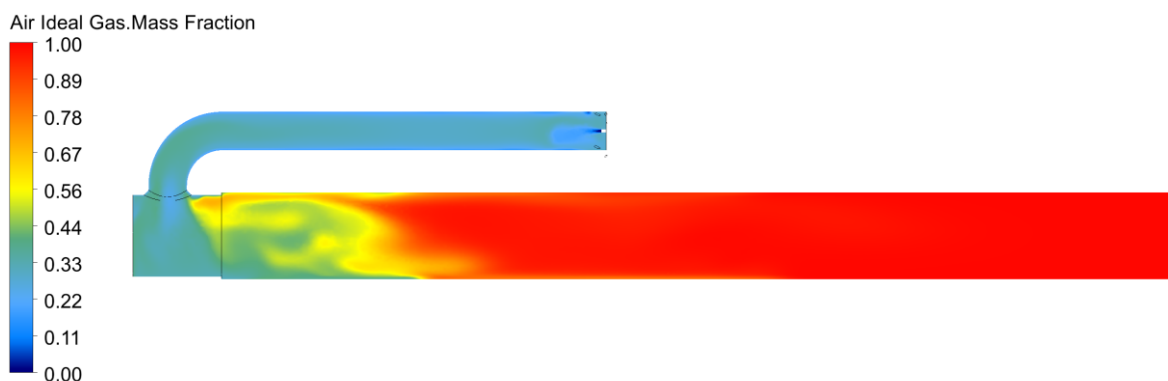


Рис. 5. Масова концентрація повітря у центральному перерізі змішувача та на каналах подачі компонент суміші

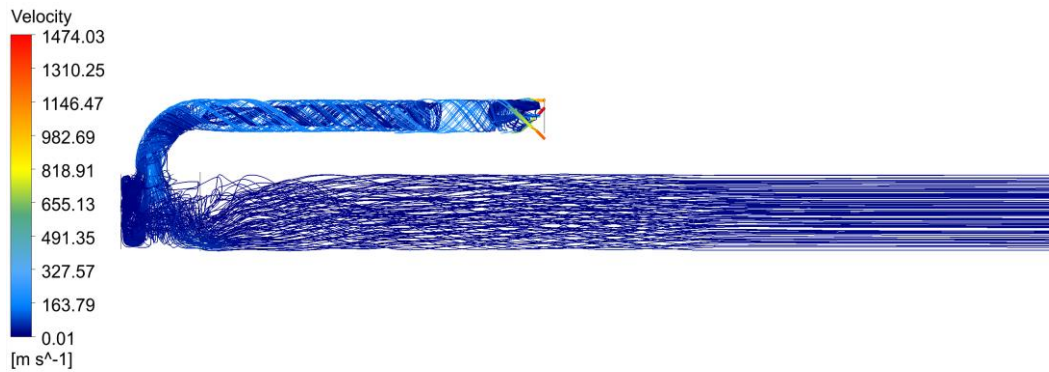


Рис. 6. Вихрова структура потоку у каналах розмішувача.

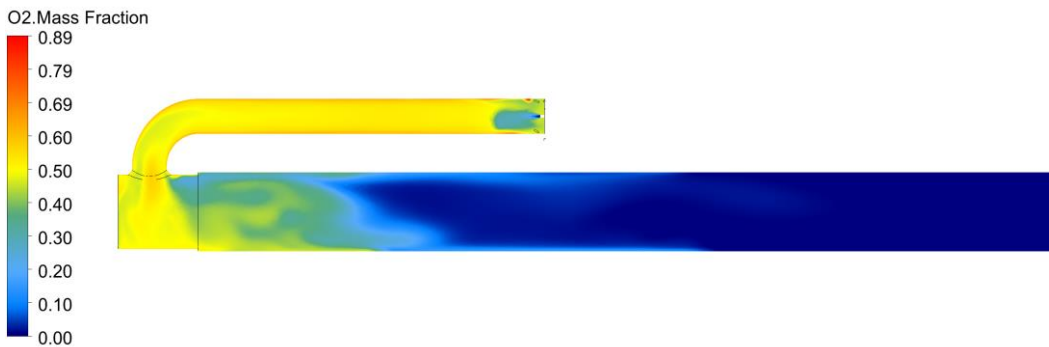


Рис. 7. Масова концентрація кисню у центральному перерізі змішувача



Рис. 8. Масова концентрація палива у центральному перерізі змішувача.

пропану, подальше покращення режимів змішування та адаптація під режими – легко реалізуються зміною кутів радіальної та осьової подачі кисню.

На рисунку 8 наведено поле розподілення молярної концентрації метану на виході зі змішувача.

Аналіз результатів газодинамічних параметрів течії через розроблену конструкцію змішувача дозволяє визначити, що утворення гомогенної суміші відбувається з показником нормалізованої оцінки середньоквадратичного відхилення молярної концентрації пропану що дорівнює 0,03 або 3%.

5. Висновки

Створено математичну модель процесу генерації суміші із заданим компонентним складом й про-

ведено серію числових експериментів з дослідження її перетікання через змішувач.

На входах в змішувач визначено співвідношення початкового тиску компонентів суміші, що забезпечує її стехіометричний склад. Отримані поля швидкостей газового потоку, масову витрату компонентів газової суміші через змішувач, поля тиску й температури. За умови постійності початкових значень тисків компонентів суміші на вході у змішувач може бути досягнуто стехіометричний склад газової суміші з точністю не нижче 3%.

Проведено оцінку змішувача системи сумішоутворення виходячи з можливості створення гомогенної паливної суміші за введеним показником. Отримані значення показника гомогенності суміші повністю задовольняють вимогам системи сумішоу-

творення для формування умов детонаційного горіння. Змішувач потребує подальшого доопрацювання конструкції, але може бути використаний за умови витримки суміші в камері й додаткової дифузії компонентів в об'ємі.

Внесок авторів: формулювання мети та постановка задач досліджень – О. В. Шипуль, Д. А. Брега; огляд та аналіз інформаційних джерел – О. А. Павленко, О. В. Трифонов; визначення принципу дії змішувача – В. О. Гарін, О. А. Павленко; аналіз результатів, формулювання висновків – О. В. Шипуль, Д. А. Брега.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо матеріалів цієї публікації, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування. Робота виконана в рамках Проєкту № 2023.04/0027 за грантовим фінансуванням Національним фондом досліджень України.

Доступність даних. Рукопис не має пов'язаних даних.

Використання засобів штучного інтелекту. Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Takatsuka, Yu. *Effect of swirl motion on mixing time in water bath agitated by upward gas injection* [Text] / Yu. Takatsuka, & M. Iguchi // *ISIJ International*. – 2001. – Vol. 41, iss. 2. – P. 124–127. DOI: 10.2355/isijinternational.41.124.
2. Swirl driven solute mixing in narrow cylindrical channel [Text] / D. Kumar, S. H. Gaikwad, P. Kaushik, & P. Mondal // *Physics of Fluids*. – 2023. – Vol. 35, iss. 6. – Article no. 063604. DOI: 10.1063/5.0153818.
3. Impinging jet mixers: A review of their mixing characteristics, performance considerations, and applications [Text] / C. Devos, S. Mukherjee, P. Inguva, S. Singh, Yi. Wei, S. Mondal, H. Yu, G. Barbasthis, T. Stelzer, R. D. Braatz, & A. S. Myerson // *AIChE Journal*. – 2024. – Vol. 71, iss. 1. – Article no. e18595. DOI: 10.1002/aic.18595.
4. Hobbs, D. *The Kenics static mixer: a three-dimensional chaotic flow* [Text] / D. Hobbs, & F. Muzzio // *Chemical Engineering Journal*. – 1997. – Vol. 67, iss. 3. – P. 153–166. DOI: 10.1016/S1385-8947(97)00013-2.
5. *Flow physics and mixing quality in a confined impinging jet mixer* [Text] / Y. Hao, J.-H. Seo, Y. Hu, H. Q. Mao, & R. Mittal // *Physics of Fluids*. – 2020. – Vol. 10, no. 4. DOI: 10.1063/5.0002125.
6. Knowles, K. *A review of jet mixing enhancement for aircraft propulsion applications* [Text] / K. Knowles, & A. Saddington // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part G: Journal of Aerospace Engineering*. – 2006. – Vol. 220, iss. 2. – P. 103–127. DOI: 10.1243/09544100G01605.
7. Srisamran, C. *Numerical simulation of flow and mixing behavior of impinging streams of shear-thinning fluids* [Text] / C. Srisamran, & S. Devahastin // *Chemical Engineering Science*. – 2006. – Vol. 16, iss. 15. – P. 4484–4892. DOI: 10.1016/j.ces.2006.03.031.
8. Xie, J. *Effects of the swirler on the performance of an advanced vortex combustor* [Text] / J. Xie, J. Pan, & Yu. Zhu // *Applied Thermal Engineering*. – 2023. – Vol. 230, Part A. – Article no. 120752. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120752.
9. Numerical simulation of hydrogen mixing process in T-junction natural gas pipeline [Text] / Y. Tian, T. Tian, G. Ren, & J. Zhang // *Materials*. – 2025. – Vol. 18, iss. 8. – Article no. 1879. – 45 p. DOI: 10.3390/ma18081879.
10. *Simulation and experimental investigation on the static mixer of natural gas mixed with hydrogen* [Text] / J. Wang, X. Hao, H. Zhang, Zh. Chen, & Ch. Qin // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2025. – Vol. 99. – P. 1–14. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.12.045.
11. *Advances in hydrogen blending and injection in natural gas networks: A review* [Text] / N. Rosa, N. A. Fereidani, B. J. Cardoso, N. Martinho, A. Gaspar, & M. G. da Silva // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2025. – Vol. 105. – P. 367–381. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2025.01.314.
12. Pitsch, H. *Large-eddy simulation of turbulent combustion* [Text] / H. Pitsch // *Annual Review of Fluid Mechanics*. – 2006. – Vol. 38. – P. 453–482. DOI: 10.1146/annurev.fluid.38.050304.092133.
13. Jiang, Y. *Space-Time Conservation Element and Solution Element Method and Its Applications* [Text] / Y. Jiang, C.-Y. Wen, & D. Zhang // *AIAA Journal*. – 2020. – Vol. 58, iss. 12. DOI: 10.2514/1.J058928.
14. Turn, S. R. *An introduction to combustion: concepts and applications* [Text] / S. R. Turns, & D. C. Haworth. – 4th ed. – New York : McGraw-Hill Education, 2020. – 768 p. – Available at: <https://www.amazon.com/Introduction-Combustion-Concepts-Applications/dp/126047769X#> – 10.08.2025.
15. *Fluent User's Guide. Release 2024 R1* [Text]. – Canonsburg : ANSYS Inc., 2024. – 3290 p.
16. Versteeg, H. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method* [Text] / H. Versteeg, & W. Malalasekera. – 3rd ed. – London : Pearson, 2017. – 520 p.
17. Fox, R. *Introduction to fluid mechanics* [Text] /

R. Fox, A. McDonald, & P. Pritchard. – 9th ed. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2016. – 896 p.

18. Thompson, P. *Fundamentals of gas dynamics [Text]* / P. Thompson. – Cambridge : Cambridge University Press, 2021. – 468 p.

19. *Fundamentals of heat and mass transfer [Text]* / F. Incropera, D. DeWitt, T. Bergman, & A. Lavine. – 8th ed. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2017. – 1040 p.

20. Kundu, P. *Heat and mass transfer: fundamentals and applications [Text]* / P. Kundu, & I. Cohen. – 5th ed. – New York : McGraw-Hill Education, 2020. – 960 p.

21. Menter, F. *Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [Text]* / F. Menter // *AIAA Journal*. – 1994. – Vol. 32, iss. 8. – P. 269–289. DOI: 10.2514/3.12149.

References

1. Takatsuka, Yu., & Iguchi, M. Effect of swirl motion on mixing time in water bath agitated by upward gas injection. *ISIJ International*, 2001, vol. 41, iss. 2, pp. 124–127. DOI: 10.2355/isijinternational.41.124.

2. Kumar, D., Gaikwad, S. H., Kaushik, P., & Mondal, P. Swirl driven solute mixing in narrow cylindrical channel. *Physics of Fluids*, 2023, vol. 35, iss. 6, article no. 063604. DOI: 10.1063/5.0153818.

3. Devos, C., Mukherjee, S., Inguva, P., Singh, S., Wei, Yi., Mondal, S., Yu, H., Barbastathis, G., Stelzer, T., Braatz, R. D., & Myerson, A. S. Impinging jet mixers: A review of their mixing characteristics, performance considerations, and applications. *AIChE Journal*, 2024, vol. 71, iss. 1, article no. e18595. DOI: 10.1002/aic.18595.

4. Hobbs, D., & Muzzio, F. The Kenics static mixer: a three-dimensional chaotic flow. *Chemical Engineering Journal*, 1997, vol. 67, iss. 3, pp. 153–166. DOI: 10.1016/S1385-8947(97)00013-2.

5. Hao, Y., Seo, J.-H., Hu, Y., Mao, H.Q., & Mittal, R. Flow physics and mixing quality in a confined impinging jet mixer. *Physics of Fluids*, 2020, vol. 10, no. 4. DOI: 10.1063/5.0002125.

6. Knowles, K., & Saddington, A. A review of jet mixing enhancement for aircraft propulsion applications. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2006, vol. 220, no. 2, pp. 103–127. DOI: 10.1243/09544100G01605.

7. Srisamran, C., & Devahastin, S. Numerical simulation of flow and mixing behavior of impinging streams of shear-thinning fluids. *Chemical Engineering Science*, 2006, vol. 61, no. 15, pp. 4484–4892. DOI: 10.1016/j.ces.2006.03.031.

8. Xie, J., Pan, J., & Zhu, Yu. Effects of the

swirler on the performance of an advanced vortex combustor. *Applied Thermal Engineering*, 2023, vol. 230, part A, article no. 120752. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120752.

9. Tian, Y., Tian, T., Ren, G., Zhang, J. Numerical simulation of hydrogen mixing process in T-junction natural gas pipeline. *Materials*, 2025, vol. 18, iss. 8, article no. 1879. 45 p. DOI: 10.3390/ma18081879.

10. Wang, J., Hao, X., Zhang, H., Chen, Zh., & Qin, Ch. Simulation and experimental investigation on the static mixer of natural gas mixed with hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, vol. 99, pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.12.045.

11. Rosa, N., Fereidani, N., Cardoso, B., Martinho, N., Gaspar, A., & da Silva, M. G. Advances in hydrogen blending and injection in natural gas networks: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, vol. 105, pp. 367–381. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2025.01.314.

12. Pitsch, H. Large-eddy simulation of turbulent combustion. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2006, vol. 38, pp. 453–482. DOI: 10.1146/annurev.fluid.38.050304.092133.

13. Jiang, Y., Wen, C.-Y., & Zhang, D. Space-Time Conservation Element and Solution Element Method and Its Applications. *AIAA Journal*, 2020, vol. 58, iss. 12. DOI: 10.2514/1.J058928.

14. Turns, S. T., & Haworth, D. C. *An introduction to combustion: concepts and applications*. 4th ed., New York, McGraw-Hill Education, 2020. 768 p. Available at: <https://www.amazon.com/Introduction-Combustion-Concepts-Applications/dp/126047769X#> (accessed 10.08.2025).

15. *Fluent User's Guide. Release 2024 R1*. Canonsburg: ANSYS Inc., 2024. 3290 p.

16. Versteeg, H., & Malalasekera, W. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. 3rd ed. London, Pearson, 2017. 520 p.

17. Fox, R., McDonald, A., & Pritchard, P. *Introduction to fluid mechanics*. 9th ed. Hoboken, John Wiley & Sons, 2016. 896 p.

18. Thompson, P. *Fundamentals of gas dynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. 468 p.

19. Incropera, F., DeWitt, D., Bergman, T., & Lavine, A. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 8th ed. Hoboken, John Wiley & Sons, 2017. 1040 p.

20. Kundu, P., & Cohen, I. *Heat and mass transfer: fundamentals and applications*. 5th ed. New York, McGraw-Hill Education, 2020. 960 p.

21. Menter, F. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 1994, vol. 32, no. 8, pp. 269–289. DOI: 10.2514/3.12149.

Отримано 10.09.2025, отримано у доопрацьованому вигляді 25.09.2025

Дата ухвалення 17.11.2025, дата публікації 08.12.2025

MODELING OF THE FUEL MIXTURE FORMATION PROCESS IN THE CHANNEL OF A GAS DETONATION DEVICE

Olga Shypul, Oleksii Pavlenko, Dmytro Brega, Vadym Garin, Oleg Tryfonov

The gas-dynamic process of cyclic fuel mixture formation and filling it into the deminer channel is the **subject** of the study. This study **aims** to minimize the deviations of the mixture parameters from the stoichiometric composition determine the quantity, required consumption characteristics, and spatial position of the supply valves for fuel and oxidizer. **The objectives** of this study are to conduct numerical experiments on filling the deminer channel with the fuel mixture and to assess the quality of the resulting mixture, considering the limitations on the filling time. To solve this problem, a mathematical model of the physical process of mixing fuel components must be developed, considering the features of the gas-dynamic flow in the channels. **The following results** were obtained: a design of a cyclic mixture formation system that satisfies the functional requirements for the deminer's operability, namely: filling time of 0.05 s and stoichiometric composition, was proposed. The homogeneity of the formed mixture was indirectly confirmed by experimental tests by comparing the maximum temperature values with those theoretically achievable for an ideal mixture. A qualitative and quantitative assessment of the proposed design's technical solution is given. A mathematical model of the mixture generation process with a given component composition is created, and a series of numerical experiments are conducted. The modeling is performed using the ANSYS Fluent software. The calculation is performed in a non-stationary setting. The obtained values of the gas flow rate, pressure field, and temperature, the requirements for the valves, and their consumption characteristics are determined based on the calculation results. The modeling results showed that the proposed design solutions regarding the number, type, and mutual arrangement of the oxidant and fuel supply valves provide the required channel filling rate while maintaining the stoichiometric composition, which ensures stable combustion of the mixture in the detonation mode. The stoichiometric composition of the gas mixture was achieved with an accuracy of not less than 3%. **The scientific novelty** of the obtained results lies in determining the relationship between the geometric and gas-dynamic parameters of the mixer, which allows obtaining a mixture with the necessary characteristics of homogeneity for the vortex mixing method. The component composition was analyzed both in the pre-detonation chamber and in the deminer's main channel. The ingress of oxygen into the main channel can become an additional trigger of detonation processes, which can be simulated based on the proposed mathematical model.

Keywords: mathematical model of multicomponent flow, stoichiometric mixture, numerical modeling, detonation, combustion.

Шипуль Ольга Володимирівна – д-р техн. наук, проф., проф. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Брега Дмитро Андрійович – канд. техн. наук, доц., проф. каф. аеродинаміки, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Павленко Олексій Анатолійович – канд. техн. наук, доц., доц. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Гарін Вадим Олегович – канд. техн. наук, старш. дослідник, старш. наук. співроб. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Трифонов Олег Валерійович – канд. техн. наук, доц., доц. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Olga Shypul – Doctor of Technical Science, Professor, Professor of the Department at the Technologies of Aircraft Manufacturing, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: o.shipul@khai.edu, ORCID: 0000-0002-1356-5831, Scopus Author ID: 57192959380.

Oleksii Pavlenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of the Technologies of Aircraft Manufacturing, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: alexey.pavlenko@khai.edu, ORCID: 0000-0002-1628-2239, Scopus Author ID: 57220201408.

Dmytro Brega – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at the Aerodynamic Department, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: d.brega@khai.edu, ORCID: 0000-0002-5134-4351, Scopus Author ID: 57209302559.

Vadym Garin – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the Department of the Technologies of Aircraft Manufacturing, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: v.garin@khai.edu, ORCID: 0000-0001-7788-0593, Scopus Author ID: 57219015898.

Oleg Tryfonov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of the Technologies of Aircraft Manufacturing, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: o.trifonov@khai.edu, ORCID: 0000-0001-8058-8649, Scopus Author ID: 57192959255.