

УДК 66.071.4:519.6

doi: 10.32620/aktt.2021.6.05

В. Є. ГАЙДАЧУК¹, О. В. ШИПУЛЬ¹, С. О. ЗАКЛІНСЬКИЙ¹,
В. О. ГАРІН¹, О. В. ТРИФОНОВ¹, С. І. ПЛАНКОВСЬКИЙ²

¹ Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Україна

² Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

ЧИСЛОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІШУВАННЯ В СИСТЕМІ ГЕНЕРАЦІЇ ГАЗОВОЇ СУМІШІ

Предметом дослідження є газодинамічний процес сумішоутворення з заданим компонентним складом під час перетікання через змішувач в системі генерації суміші. **Метою** роботи є науково-експериментальна оцінка технічних рішень змішувача щодо забезпечення точності й гомогенності газової суміші. **Завдання дослідження** полягають у проведенні числових експериментів перетікання газового потоку через сопла змішувача системи генерації суміші із забезпеченням її стехіометричного компонентного складу й гомогенності. Поставлене завдання розв'язується шляхом створення адекватних математичних моделей газодинамічної течії й аналізу результатів числового моделювання. Отримано такі **результати**. Розроблено змішувач системи сумішоутворення й дана оцінка технічним рішенням щодо його конструкції. Експериментально встановлені площі прохідного перерізу сопел змішувача. Створено математичну модель процесу генерації суміші із заданим компонентним складом й проведено серію числових експериментів з дослідження перетікання її компонентів через змішувач. Моделювання здійснено з використанням програмного забезпечення ANSYS CFX. Застосовано стаціонарну постановку задачі. В соплах закритичного перетікання змішувача ураховано теплообмін газового потоку зі стінками за рахунок розв'язання задачі і визначення відповідних коефіцієнтів теплопередачі. 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 результатами моделювання встановлено, що конструкція розробленого змішувача забезпечує створення газової суміші зі гомогенністю не нижче 3 %. За умови постійності початкових значень тисків компонентів суміші на вході у змішувач може бути досягнуто стехіометричний склад газової суміші із точністю не нижче 1%.

Ключові слова: математична модель газодинамічного процесу; закритичне перетікання; числове моделювання; гомогенність газової суміші; коефіцієнт теплопередачі.

Вступ

Напрямок розвитку високоточних механізмів, включаючи технології 3D-друку, підвищує вимоги до надійності та ресурсу, в основному за рахунок промислової чистоти поверхонь та якості обробки кромки [1, 2]. Широко впроваджені технології для обробки кромки та очищення поверхонь, зокрема різні проточні абразивні процеси [3], ультразвукове миття [4], бездеформаційні методи обробки кромки [5], наприклад, електрохімічні [6], електроерозійні [7], лазерні [8], не позбавлені недоліків, наприклад, можуть призводити до вторинного забруднення поверхонь або не забезпечують одночасне поєднання обробки кромки та очищення поверхні. Загальною проблемою для всіх технологій обробки кромки та очищення поверхонь є відсутність автоматизованої системи керування високої точності та спеціальних методів розрахунку режимів обробки з передбачуваною точністю [9, 10].

Маючи з цієї точки зору унікальні переваги, термоенергетичний метод (ТЕМ) [11, 12] успішно впроваджується в класичні технології обробки [13, 14]. В рамках науково-дослідних робіт [15] та [16] розроблено функціональні системи установки для прецизійної обробки детонуючими газовими сумішами, у тому числі систему генерації паливної суміші. Під час дослідження зазначених систем визначено, що одним з найважливіших факторів впливу на точність термоімпульсної обробки є якість паливної суміші, як енергетичного джерела обробки. Під якість паливної суміші тут мається на увазі визначений компонентний склад й гомогенність у межах припустимих відхилень.

Сучасні дослідження впливу підготовки газових сумішей на їх якість, й, як наслідок, на процес їх згоряння, стосуються здебільшого покращення екологічних показників бензинових двигунів. Наприклад, в роботі [17] було проаналізовано вплив компоновки інжекторного розпилення і стратегії вприскування на

якість суміші двигуна DISI. А в роботі [18] досліджено вплив структури сопла на однорідність газової суміші судового газового двигуна, й подальше згорання й викиди. Робота [19] присвячена фундаментальному дослідженню й аналізу основних фізичних й термодинамічних властивостей горючих газів та їх впливу на змішувальність палива й продуктивність двигуна. В монографії [20] наведено огляд методів створення газових сумішей, які застосовуються в різноманітних технологічних процесах. Роботи [21, 22] про створення газових сумішей із заданою точністю базуються на відомому способі послідовного напуску компонент газової суміші.

Стосовно до зазначеної вище системи сумішоутворення термоімпульсної установки в роботі [23] запропоновано спосіб генерації паливних сумішей на основі методу критичних отворів, який відрізняється тим, що при сумішоутворенні використовується вільне витікання газів з попередньо наповнених проміжних ємностей. У тій же роботі розроблено методику розрахунку параметрів генератора суміші, що дозволяє за заданим складом і тиском суміші визначити співвідношення площ критичних отворів, об'ємів ємностей, початкового тиску в них і часу наповнення камери. Питання впливу гомогенності газової суміші на енергоефективність під час термоімпульсній обробці розглянуто у роботі [24].

Наступним логічним кроком верифікації ефективності роботи розробленого генератора 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 визначенні гомогенності.

Об'єкт дослідження

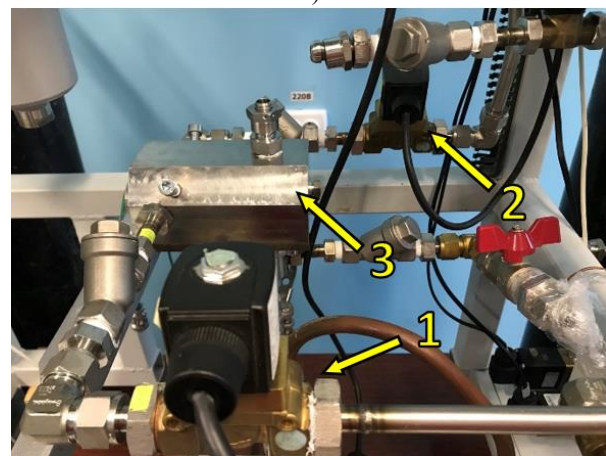
Дослідженню підлягає блок змішування компонентів паливної суміші системи генерації суміші автоматизованого термоімпульсного комплексу [15]. Лабораторний стенд дослідження генерації суміші наведено на рис. 1.

Конструкція змішувача (модель наведено на рис. 2), являє собою сталевий корпус 1, кришки 2, технологічні корки 3. Змішувач розроблено відповідно до реалізації схеми подачі компонентів газової суміші через спеціальні жиклери 4 й подальшим перемішуванням суміші зустрічними потоками у камері 5. Використання жиклерів 4 із різними площами перерізу прохідного отвору для палива й окиснювача

відповідно, під час надкритичного перетікання з постійним тиском, забезпечують задане (стехіометричне) співвідношення компонентів суміші. Корпус змішувача виготовлено з масиву металу задля зменшення впливу на параметри перетікання умов навколишнього середовища.



а)



б)

Рис. 1. Лабораторний стенд дослідження генерації паливної суміші: а) зовнішній вигляд; 2) блок змішувача (1, 2 – електроклапан Burkert, 3 – змішувач)

Конструкція змішувача дозволяє при переході на інший склад паливної суміші замінити жиклери через технологічні корки 3, а для проведення додаткових досліджень встановлювати необхідні датчики 7. Для запобігання можливості загорання при експлуатації в конструкції змішувача передбачені штуцери 6 для продувки камери 5 нейтральним газом через відповідні канали.

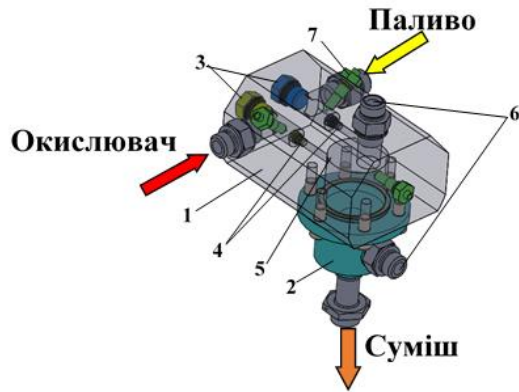


Рис. 2. Модель змішувача 1 – корпус; 2 – кришка; 3 – корки; 4 – жиклери; 5 – камера змішувача; 6 – штуцери; 7 – датчики

За умови постійного співвідношення тиску для забезпечення надкритичного характеру течії на вході до камери змішувача використовуються жиклери з каліброваними отворами (рис. 3, а). Незалежно від технології виготовлення жиклерів отримані в них отвори мають відхилення як за розмірами, так за формою від заданих, що у подальшому призводить до похибки визначення масової витрати при перетіканні через них. Визначення реальних розмірів і форми отворів у жиклерах проведено за методикою, розробленою авторами у роботі [25], з використанням інструментальний мікроскоп з цифровим відліком БМІ-1Ц (ціна поділки 0,0001мм).

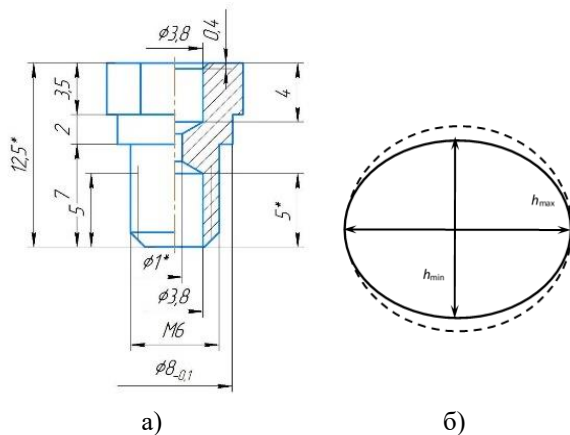


Рис. 3. Жиклер змішувача: а) типова конструкція; б) схема побудови профілю критичного отвору

За отриманими значеннями розмірів h_{max} та h_{min} в двох перпендикулярних перетинах побудовано профілі отворів (рис. 3, б) жиклерів, що входять в конструкцію змішувача, та розраховано відповідні площини (табл. 1)

Таблиця 1
Дослідження отворів у жиклерах

№	$D_{ном}$, мм	h_{min} , мм	h_{max} , мм	Зображення	Площа, мм ²
1	1,65	1,7478	1,7487		2,400474
2	1	1,0750	1,0802		0,912016

В подальших дослідженнях використані отримані значення при побудові розрахункової моделі.

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 використанням програми Ansys-CFX [26] із метою визначення параметрів швидкостей газового потоку, масової витрати компонентів газової суміші та поля тиску й температури.

Геометрія моделі і її дискретизація. Для розрахунку була підготовлена модель яка являє собою внутрішню порожнину ділянки змішувача генератора газової суміші та частини металевого корпусу змішувача (рис. 4), який потрібен для врахування теплообміну при критичному перепаді тиску в жиклерах. Саме в критичних отворах жиклерів швидкість перетікання газів відбувається з місцевою швидкістю звука. 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 молярної концентрації кисню та метану на виході зі змішувача.

Для моделювання наповнення киснем та метаном використовуються моделі ідеального газу. Розрахункову модель розбито на 703 тис. скінчених елементів (рис. 5), значення числа Куранта $C < 5$.

Для розв'язання визначальних рівнянь моделі використано метод скінчених об'ємів [26], 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 різницьових операторів другого порядку точності. У межевому шарі створено п'ять шарів скінчених елементів для коректного відображення пристінкової течії.

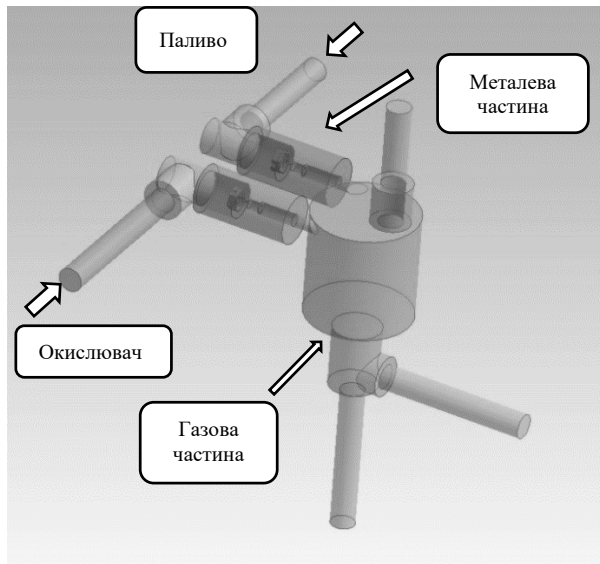


Рис. 4. Геометрична модель, що еквівалентна реальному змішувачу генератора газової суміші

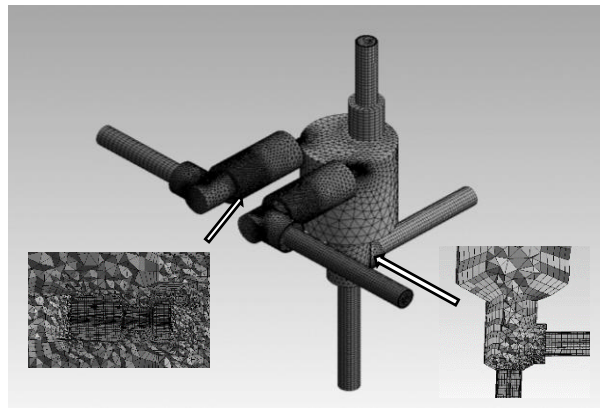


Рис. 5. Скінчено-елементна розрахункова модель змішувачу генератора газової суміші

Граничні й початкові умови. В розрахунковій моделі визначено входи, де задані умови постійного тиску палива та окислювача який забезпечує подачу компонентів паливної суміші у стехіометричному співвідношенні, причому відхилення молярної концентрації встановлено не вище 1%. Зокрема досліджувалася метано-киснева суміш у співвідношенні 1:2 відповідних компонентів ($\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$). Напрямок потоку – по нормалі до входу. Режим потоку – надзвуковий. Теплообмін між газовою сумішшю і стінками жиклера є дуже вагомим параметром газодинаміки течії під час перетікання через критичні отвори, тому у відповідних зонах здійснено моделювання теплообміну газів зі стінками жиклерів (див. рис. 5). Розрахунок задачі здійснено у стаціонарній постановці.

Визначальні рівняння. Однофазний багатокомпонентний потік взято за модель для опису процесу

сумішоутворення. Рівняння для розрахунку складу суміші застосовані у вигляді [27]:

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

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

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

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

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 [28]:

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

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 [29]. 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^{-4} секунди, та згодом він збільшується до 10^{-3} 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:

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

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 температури.

На рис. 6, 7 наведено поля температур та тиску за перетином у змішувачі та у жиклерах. Результати моделювання показали, що за рахунок надлишкового тиску перед жиклером спостерігається невелике збільшення температури з 20°C до $22,3^\circ\text{C}$. Проте вже після жиклера спостерігається значне прискорення потоку газу за рахунок надкритичного режиму течії (рис. 8) та суттєве локальне падіння тиску. Це спричиняє суттєве локальне зниження температури.

Безумовно, такі неоднорідні умови течії впливають на точність дозування компонентів паливної суміші і мають бути враховані при виконанні розрахунків. Моделювання виконувалося в умовах пов’язаного теплообміну с металевими конструкціями змішувача для більш точного прогнозування витрат компонентів суміші у критичних зонах.

Розраховане розподілення коефіцієнту теплопередачі на суміжних з жиклерами зонах показано на рис. 9.

На рисунку 10 наведено поле розподілення молярної концентрації метану на виході зі змішувача.

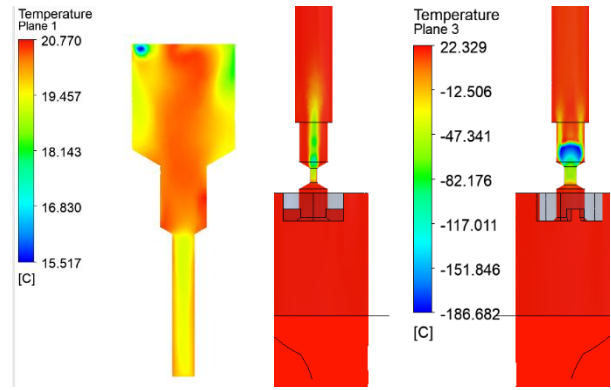


Рис. 6. Поля температур у центральному перерізі змішувача та на жиклерах

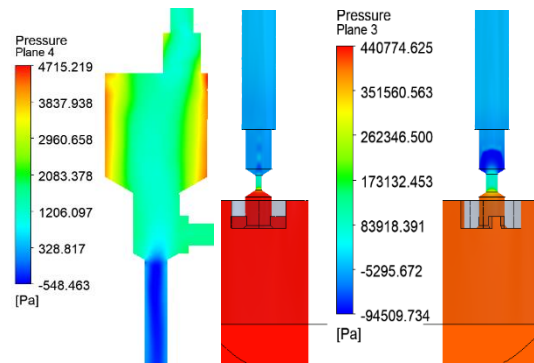


Рис. 7. Поля тиску у центральному перерізі змішувача та на жиклерах

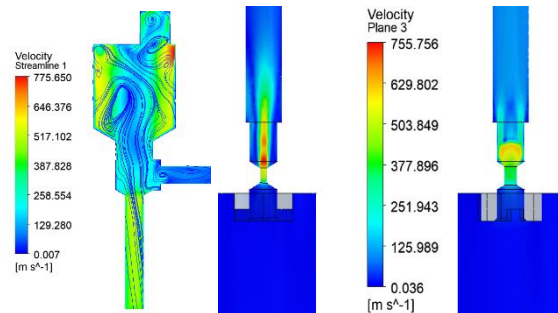


Рис. 8. Поле швидкості у центральному перерізі змішувача та на жиклерах

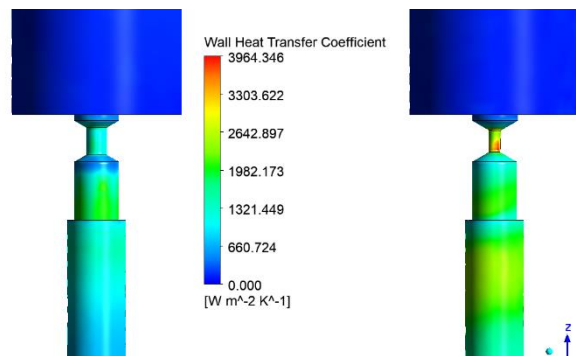


Рис. 9. Коефіцієнт теплопередачі на жиклерах

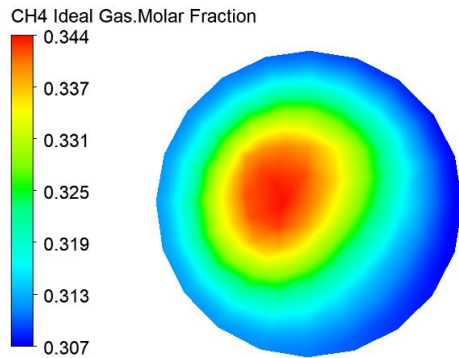


Рис. 10. Молярна концентрація палива на виході із змішувача.

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

Висновки

Створено математичну модель процесу генерації суміші із заданим компонентним складом й проведено серію числових експериментів з дослідження її перетікання через змішувач. В соплах закритичного перетікання змішувача ураховано теплообмін газового потоку зі стінками за рахунок визначення відповідних коефіцієнтів теплопередачі.

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 1 %.

Проведено оцінку змішувача системи сумішоутворення виходячи з можливості створення гомогенної паливної суміші за введеним показником. Для прецизійної обробки газовими сумішами є обґрунтованою похибка якості суміші 0,1 %. Отримані значення показника гомогенності суміші лише частково задовольняють вимогам системи сумішоутворення. Змішувач потребує подальшого доопрацювання конструкції, але може бути використаний за умови витримки суміші в камері й додаткової дифузії компонентів в об'ємі.

Література

1. Design for precision: current status and trends [Text] / P. Schellekens, N. Rosielle, H. Vermeulen, M. Vermeulen, S. Wetzels, W. Pril // *CIRP Annals*. – 1998. – Vol. 47, iss. 2. – P. 557–586. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)63243-0 2.
2. Pavlenko, D. Advanced materials and technologies for compressor blades of small turbofan engines [Text] / D. Pavlenko, Y. Dvirnyk, R. Przynsowa // *Aerospace*. – 2021. – Vol. 8, iss. 1. – Article 1. DOI: 10.3390/aerospace8010001.
3. Petare, A. C. A critical review of past research and advances in abrasive flow finishing process [Text] / A. C. Petare, N. K. Jain // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2018. – Vol. 97, iss. 1. – P. 741–782. DOI: 10.1007/s00170-018-1928-7.
4. Fuchs, F. J. Ultrasonic cleaning and washing of surfaces [Text] / F. J. Fuchs // *Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultrasound*; ed. by J. A. Gallego-Juárez, K. F. Graff. – Cambridge: Woodhead Publishing, 2015. – P. 577–609. DOI: 10.1016/B978-1-78242-028-6.00019-3.
5. Zhong, Z.-W. Advanced polishing, grinding and finishing processes for various manufacturing applications: a review [Text] / Z.-W. Zhong // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2020. – Vol. 35, iss. 12. – P. 1279–1303. DOI: 10.1080/10426914.2020.1772481.
6. Ruszaj, A. Electrochemical machining – special equipment and applications in aircraft industry [Text] / A. Ruszaj, J. Gawlik, S. Skoczypiec // *Management and Production Engineering Review*. – 2016. – Vol. 7, iss. 2. – P. 34–41. DOI: 10.1515/mper-2016-0015.
7. Khafizov, I. I. Improving the quality of surfaces of products obtained by electroerosion treatment [Text] / I. I. Khafizov, I. G. Nurullin // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 915, iss. 1. – Article 012027. DOI: 10.1088/1757-899X/915/1/012027.
8. In-depth characterization of the scanner-based selective laser deburring process [Text] / G. Cerwenka, P. Surrey, M. Möller, C. Conrad, V. Prakash, M. Heilemann, C. Emmelmann // *Journal of Laser Applications*. – 2018. – Vol. 30, iss. 3. – Article 032510. DOI: 10.2351/1.5040642.
9. Determining the characteristics for the rational adjusting of an fuel-air mixture composition in a two-stroke engine with internal mixture formation [Text] / V. Korohodskiy, S. Kryshchtopa, V. Migal, A. Rogovyi, A. Polivanchuk, G. Slyn'ko, V. Manoylo, O. Vasylenko, O. Osetrov // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2020. – Vol. 2, no. 5-104. – P. 39–52. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.200766.
10. Simulation of surface heating for arbitrary shape's moving bodies/sources by using R-functions [Text] / S. Plankovskyy, O. Shypul, Y. Tsegelnyk, O. Tryfonov, I. Golovin // *Acta Polytechnica*. – 2016. – Vol. 56, no. 6. – P. 472–477. DOI: 10.14311/AP.2016.56.0472.

11. Gillespie, L. K. *Deburring and edge finishing handbook [Text]* / L. K. Gillespie. – Dearborn : Society of Manufacturing Engineers, 1999. – 404 p.

12. Struckmann, J. *Thermal Deburring [Text]* / J. Struckmann, A. Kieser. – Luhden : ATL Anlagentechnik Luhden GmbH, 2020. – 94 p.

13. *Experimental analysis of thermal energy deburring process by design of experiment [Text]* / A. Fritz, L. Sekol, J. Koroskenyi, B. Walch, J. Minear, V. Fernandez, L. Liu // *Proceedings of ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Houston, November 9–15, 2012*. – ASME, 2012. – Vol. 3. – P. 2035–2041. DOI: 10.1115/IMECE2012-88411.

14. *Burr formation and its treatments – a review [Text]* / S. Y. Jin, A. Pramanik, A. K. Basak, C. Prakash, S. Shankar, S. Debnath // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2020. – Vol. 107, iss. 5-6. – P. 2189–2210. DOI: 10.1007/s00170-020-05203-2.

15. Розроблення автоматизованого комплексу для прецизійного термоімпульсного оброблення детонувальними газовими сумішами: наукові матеріали [Текст] : монографія / С. І. Планковський, О. В. Шипуль, Є. В. Цегельник, О. В. Трифонов, К. В. Коритченко, О. О. Баранов, Ю. О. Сисоєв, В. О. Гарін, С. О. Аксьонов, В. В. Комбаров, С. О. Заклінський ; за ред. С. І. Планковського. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. С. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2020. – 318 с.

16. Розробка технологій та технічних рішень для автоматизованих промислових установок прецизійної обробки деталей агрегатів ГТД детонуючими газовими сумішами : звіт про НДР (заключн.) / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. С. Жуковського «Харків. авіац. ін-т»; кер. : О. Шипуль ; викон. : С. Планковський [та ін.]. – № ДР 0119У100943. – Харків, 2020. – 170 с.

17. *Effects of injector spray layout and injection strategy on gas mixture quality of gasoline direct injection engine [Text]* / A. Du, Z. Zhu, C. Chu, M. Li // *SAE Technical Paper*. – 2015. – Paper 2015-01-0747. – 10 p. DOI: 10.4271/2015-01-0747.

18. *Effects of nozzle structure on the gas mixture uniformity of marine gas engine [Text]* / E. Song, Z. Liu, L. Yang, C. Yao, J. Sun, Q. Dong // *Ocean Engineering*. – 2017. – Vol. 142. – P. 507-520. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.07.011.

19. Dost, T. *Design and simulation of a multi fuel gas mixture system of a wankel rotary engine [Text]* / T. Dost, J. Getzlaff // *SAE Technical Paper*. – 2020. – Paper 2020-01-0548. – 16 p. DOI: 10.4271/2020-01-0548.

20. Сисоєв, Ю. О. Технологія машинобудування. Забезпечення ефективності процесів отримання вакуумно-дугових покриттів [Текст] : монографія / Ю. О. Сисоєв. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. С. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2021. – 320 с.

21. Sysoiev, Y. A. *The creation of multicomponent gas mixtures for ion-plasma technologies [Text]* / Y. A.

Sysoiev // *Problems of Atomic Science and Technology*. – 2014. – No. 2. – P. 137–142.

22. *Uragan-2m gas mixing system [Text]* / A. V. Lozin, Y. V. Kovtun, V. E. Moiseenko, S. M. Maznichenko, D. I. Baron, M. M. Kozulya, A. Y. Krasyuk, V. M. Listopad, V. Y. Gribanov, Y. P. Martseniuk // *Problems of Atomic Science and Technology*. – 2021. – No. 4. – P. 195–199. DOI: 10.46813/2021-134-195.

23. *Dynamic method of gas mixtures creation for plasma technologies [Text]* / S. I. Plankovskyy, O. V. Shypul, S. A. Zaklinsky, O. V. Tryfonov // *Problems of Atomic Science and Technology. Series*. – 2018. – No. 6. – P. 189–193.

24. *Numerical simulations of mixture formation to ensuring the quality of thermal deburring [Text]* / S. Plankovskyy, O. Shypul, S. Zaklinsky, Y. Tsegelnyk, O. Bezkorovaina // *International Conference on Advanced Mechanical and Power Engineering (CAMPE 2021). October 29-30, 2021. Kharkiv, Ukraine / Lecture Notes in Mechanical Engineering*. – Cham : Springer, 2022.

25. Розробка технологій та технічних рішень для автоматизованих промислових установок прецизійної обробки деталей агрегатів ГТД детонуючими газовими сумішами : звіт з НДР (пром. інж.) / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. С. Жуковського «Харків. авіац. ін-т»; керівн. С. І. Планковський ; викон. : О. В. Шипуль [та ін.]. – № ДР 0220U102076. – Харків, 2019. – 101 с.

26. *ANSYS CFX Reference Guide [Електронний ресурс]*. – Режим доступу: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/prod_page.html?pn=CFX&pid=CFX&lang=en. – 12.10.2021.

27. Menter, F. R. *Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [Text]* / F. R. Menter // *AIAA-Journal*. – 1994. – Vol. 32, no. 8. – P. 269–289. DOI: 10.2514/3.12149.

28. Arias-Zugasti, M. *Efficient calculation of multi-component diffusion fluxes based on kinetic theory [Text]* / M. Arias-Zugasti, P. L. Garcia-Ybarra, J. L. Castillo // *Combustion and Flame*. – 2016. – Vol. 163. – P. 540–556. DOI: 10.1016/j.combustflame.2015.10.033.

29. Menter, F. R. *A scale-adaptive simulation model for turbulent flow predictions [Text]* / F. R. Menter, M. Kuntz, R. Bender // *AIAA*. – 2003. – Paper 2003-0767. – 40 p. DOI: 10.2514/6.2003-767.

References

1. Schellekens, P., Rosielle, N., Vermeulen, H., Vermeulen, M., Wetzels, S., Pril, W. Design for precision: current status and trends. *CIRP Annals*, vol. 47, iss. 2, pp. 557–586. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)63243-02.

2. Pavlenko, D., Dvirnyk, Y., Przynsowa, R. Advanced materials and technologies for compressor blades of small turbofan engines. *Aerospace*, 2021, vol. 8, iss. 1, Article 1. DOI: 10.3390/aerospace8010001.

3. Petare, A. C., Jain, N. K. A critical review of past research and advances in abrasive flow finishing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 97, iss. 1-4, pp. 741–782. DOI: 10.1007/s00170-018-1928-7.
4. Fuchs, F. J. Ultrasonic cleaning and washing of surfaces. *Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultrasound*, Gallego-Juárez, J. A., Graff, K. F. (eds.), Cambridge, Woodhead Publishing, 2015, pp. 577–609. DOI: 10.1016/B978-1-78242-028-6.00019-3.
5. Zhong, Z.-W. Advanced polishing, grinding and finishing processes for various manufacturing applications: A review. *Materials and Manufacturing Processes*, 2020, vol. 35, iss. 12, pp. 1279–1303. DOI: 10.1080/10426914.2020.1772481.
6. Ruszaj, A., Gawlik, J., Skoczypiec, S. Electrochemical machining – special equipment and applications in aircraft industry. *Management and Production Engineering Review*, 2016, vol. 7, iss. 2, pp. 34–41. DOI: 10.1515/mper-2016-0015.
7. Khafizov, I. I., Nurullin, I. G. Improving the quality of surfaces of products obtained by electroerosion treatment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 915, iss. 1, Article 012027. DOI: 10.1088/1757-899X/915/1/012027.
8. Cerwenka, G., Surrey, P., Möller, M., Conrad, C., Prakash, V., Heilemann, M., & Emmelmann, C. In-depth characterization of the scanner-based selective laser deburring process. *Journal of Laser Applications*, 2018, vol. 30, iss. 3, Article 032510. DOI: 10.2351/1.5040642.
9. Korohodskyi, V., Kryshchuk, S., Migal, V., Rogovyi, A., Polivyanchuk, A., Slyn'ko, G., Manoylo, V., Vasylenko, O., Osetrov, O. Determining the characteristics for the rational adjusting of an fuel-air mixture composition in a two-stroke engine with internal mixture formation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, vol. 2, no. 5-104, pp. 39–52. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.200766.
10. Plankovskyy, S., Shypul, O., Tsegelnyk, Y., Tryfonov, O., Golovin, I. Simulation of surface heating for arbitrary shape's moving bodies/sources by using R-functions. *Acta Polytechnica*, 2016, vol. 56, no. 6, pp. 472–477. DOI: 10.14311/AP.2016.56.0472.
11. Gillespie, L. K. *Deburring and edge finishing handbook*. Dearborn, Society of Manufacturing Engineers Publ., 1999. 404 p.
12. Struckmann, J., Kieser, A. *Thermal Deburring*. Luhden, ATL Anlagentechnik Luhden GmbH Publ., 2020. 94 p.
13. Fritz, A., Sekol, L., Koroskenyi, J., Walch, B., Minear, J., Fernandez, V., Liu, L. Experimental Analysis of Thermal Energy Deburring Process by Design of Experiment. *ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. ASME, 2012, vol. 3, pp. 2035–2041. DOI: 10.1115/IMECE2012-88411.
14. Jin, S. Y., Pramanik, A., Basak, A. K., Prakash, C., Shankar, S., Debnath, S. Burr formation and its treatments – a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 107, iss. 5-6, pp. 2189–2210. DOI: 10.1007/s00170-020-05203-2.
15. Plankovskyy, S. I., Shypul, O. V., Tsegelnyk, Y. V., Tryfonov, O. V., Korytchenko, K. V., Baranov, O. O., Sysoyev, Yu. O., Garyn, V. O., Aks'onov, Ye. O., Kombarov, V. V., Zaklinsky, S. O. *Rozroblennya avtomatizovanogo kompleksu dlya precizijnogo termoimpul'snogo obroblennya detonuval'nimi gazovimi sumishami: naukovi materialy : monografiya* [Development of an automated complex for precision thermopulse treatment with detonating gas mixtures: scientific materials: monograph]. Kharkiv, Nac. aerokosm. un-t im. M. Ye. Zhukovskogo «Harkiv. aviac. in-t» Publ., 2020. 318 p.
16. *Rozrobka tekhnolohiy ta tekhnichnykh rishen' dlya avtomatyzovanykh promyslovykh ustanovok pretsyziynoyi obrobky detaley ahrehativ HTD detonuyuchymy hazovymy sumishamy : zvit pro NDR (zaklyuchn.)* [Development of technologies and technical solutions for automated industrial installations for precision machining of parts of gas turbine units with detonating gas mixtures], ker.: O. Shypul'; vykon.: S. Plankovskyy et al., Reg.No. 0119U100943, Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t im. M. Ye. Zhukovskoho «Kharkiv. aviats. in-t», 2020. 170 p.
17. Du, A., Zhu, Z., Chu, C., Li, M. Effects of injector spray layout and injection strategy on gas mixture quality of gasoline direct injection engine. *SAE Technical Paper*, 2015, Paper 2015-01-0747. 10 p. DOI: 10.4271/2015-01-0747.
18. Song, E., Liu, Z., Yang, L., Yao, C., Sun, J., Dong, Q. Effects of nozzle structure on the gas mixture uniformity of marine gas engine. *Ocean Engineering*, 2017, vol. 142, pp. 507-520. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.07.011.
19. Dost, T., Getzlaff, J. Design and simulation of a multi fuel gas mixture System of a wankel rotary engine. *SAE Technical Paper*, 2020, Paper 2020-01-0548. 16 p. DOI: 10.4271/2020-01-0548.
20. Sysoyev, Y. O. *Tekhnolohiya mashyno-buduvannya. Zabezpechennya efektyvnosti protsesiv otrymannya vakuumno-duhovyykh pokryttiv : monografiya* [Mechanical engineering technology. Ensuring the effectiveness of the processes of obtaining vacuum-arc coatings : monograph]. Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t im. M. Ye. Zhukovskoho «Kharkiv. aviats. in-t», 2021. 320 p.
21. Sysoiev, Y. O. The creation of multicomponent gas mixtures for ion-plasma technologies. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2014, no. 2, pp. 137–142.
22. Lozin, A. V., Kovtun, Y. V., Moiseenko, V. E., Maznichenko, S. M., Baron, D. I., Kozulya, M. M., Krasnyuk, A. Y., Listopad, V. M., Gribanov, V. Y., Martseniuk, Y. P. Uragan-2m gas mixing system. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2021, no. 4, pp. 195-199. DOI: 10.46813/2021-134-195.
23. Plankovskyy, S. I., Shypul, O. V., Zaklinsky, S. A., Tryfonov O. V. Dynamic method of gas mixtures creation for plasma technologies. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2018, no. 6, pp. 189-193.

24. Plankovskyy, S., Shypul, O., Zaklinsky, S., Tsegelnyk, Y., Bezkorovaina, O. Numerical simulations of mixture formation to ensuring the quality of thermal deburring. *International Conference on Advanced Mechanical and Power Engineering (CAMPE 2021)*, Kharkiv, Ukraine. October 29-30, 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering, Cham, Springer, 2022.

25. *Rozrobka tekhnolohiy ta tekhnichnykh rishen' dlya avtomatyzovanykh promyslovykh ustanovok pretsyziynoyi obrobky detaley ahrehativ HTD detonuyuchymy hazovymu sumishamy : zvit pro NDR (promizhn.)* [Development of technologies and technical solutions for automated industrial installations for precision machining of parts of gas turbine units with detonating gas mixtures], ker.: S. Plankovs'kyu ; vykon.: O. Shypul' et al., Reg.No. 0119U100943, Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t im. M. Ye. Zhukovs'koho «Kharkiv. aviats. in-t», 2019. 101 p.

26. ANSYS CFX Reference Guide. Available at:

https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/prod_page.html?pn=CFX&pid=CFX&lang=en. (accessed 12.10.2021).

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

28. Arias-Zugasti, M., Garcia-Ybarra, P. L., Castillo, J. L. Efficient calculation of multicomponent diffusion fluxes based on kinetic theory. *Combustion and Flame*, 2016, vol. 163, pp. 540–556. DOI: 10.1016/j.combustflame.2015.10.033

29. Menter, F. R., Kuntz, M., Bender, R. A scale-adaptive simulation model for turbulent flow predictions. *AIAA*, 2003, Paper 2003-0767. 40 p. DOI: 10.2514/6.2003-767.

Надійшла до редакції 13.10.2021, розглянута на редколегії 26.11.2021

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СМЕСИТЕЛЯ В СИСТЕМЕ ГЕНЕРАЦИИ ГАЗОВОЙ СМЕСИ

*В. Е. Гайдачук, О. В. Шипуль, С. А. Заклинский, В. О. Гарин,
О. В. Трифонов, С. И. Планковский*

Предметом исследования является газодинамический процесс смесеобразования с заданным компонентным составом при перетекании через смеситель в системе генерации смеси. **Целью работы** является научно-экспериментальная оценка технических решений смесителя по обеспечению точности и гомогенности газовой смеси. **Задачи исследования** заключаются в проведении числовых экспериментов перетекания газового потока через сопла смесителя системы генерации смеси с обеспечением ее стехиометрического компонентного состава и гомогенности. Поставленная задача решается путем создания адекватных математических моделей газодинамического течения и анализа результатов числового моделирования. Получены следующие **результаты**. Разработан смеситель системы смесеобразования и дана оценка техническим решениям его конструкции. Экспериментально установлены площади проходных сечений сопел смесителя. Создана математическая модель процесса генерации смеси с заданным компонентным составом и проведена серия числовых экспериментов по исследованию ее перетекания через смеситель. Моделирование выполнено с использованием программного обеспечения ANSYS CFX. Применена стационарная постановка задачи. В соплах закрытого перетекания смесителя учтен теплообмен газового потока со стенками за счет решения отдельной задачи и определения соответствующих коэффициентов теплопередачи. На входах в смеситель определено соотношение исходного давления компонентов смеси, обеспечивающее ее стехиометрический состав. Получены поля скоростей газового потока, массовый расход компонентов газовой смеси через смеситель, поля давления и температуры. По результатам моделирования установлено, что конструкция разработанного смесителя обеспечивает создание газовой смеси с гомогенностью не ниже 3%. При постоянстве начальных значений давлений компонентов смеси на входе в смеситель может быть достигнут стехиометрический состав газовой смеси с точностью не ниже 1%.

Ключевые слова: математическая модель газодинамического процесса; закрытый переток; числовое моделирование; гомогенность газовой смеси; коэффициент теплопередачи.

NUMERICAL STUDY OF MIXING IN GAS MIXTURE GENERATING SYSTEM

*V. Gaydachuk, O. Shypul, S. Zaklinsky, V. Garin,
O. Tryfonov, S. Plankovskyy*

The subject of research is a gas-dynamic process of mixture formation with a given component mass fraction during overflow through the mixer nozzles in the mixture generation system. **The aim** of the study is the scientific and experimental evaluation of the mixer technical solutions to ensure the accuracy and homogeneity of the gas mixture. **The current work conducts** numerical study on the flow of a gas flow through the mixer nozzles of the mixture generation system, ensuring its stoichiometric component composition and homogeneity. The problem is solved by developing adequate mathematical models of gas-dynamic flow and analyzing the results of numerical simulations. **The following results** were obtained. A mixer with the nozzles in the mixture generation system has been created and a technical solution for its design has been scientifically substantiated. The areas of flow sections of mixer nozzles are experimentally established. A mathematical model of generating a mixture with a given component mass fraction was

developed and a series of numerical experiments was conducted to study its overflow through the mixer. A 3D simulation was conducted using ANSYS CFX software. The stationary formulation of the problem is applied. In the nozzles of closed overflow of the mixer, the heat exchange of the gas flow with the walls is taken into account by solving a separate problem and determining the corresponding heat transfer coefficients. At the inputs to the mixer, the ratio of the initial pressure of the components of the mixture is determined, which ensures its stoichiometric composition. The fields of the gas flow velocities, the mass flow rate of the components of the gas mixture through the mixer, and pressure and temperature fields are obtained. Based on the simulation results, it was found that the design of the developed mixer ensures the creation of a gas mixture with a homogeneity of at least 3%. With a constant pressure ratio of the mixture components to the mixer inlet, the gas mixture dosing accuracy can be achieved at least 1%.

Keywords: mathematical model of the gas-dynamic process; supercritical outflow; numerical modeling; homogeneity of the gas mixture; heat transfer coefficient.

Гайдачук Віталій Євгенович – д-р техн. наук, професор, професор кафедри конструкцій і проектування ракетної техніки, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Шипуль Ольга Володимирівна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Заклінський Сергій Олександрович – асистент кафедри технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Гарін Вадим Олегович – канд. техн. наук, старший науковий співробітник кафедри технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Трифонов Олег Валерійович – канд. техн. наук, доцент кафедри технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Планковський Сергій Ігорович – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків, Україна.

Vitaliy Gaydachuk – Doctor of Techn. Sci., Professor, Professor of Department of Design and Construction of Missile Technology, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: o.shipul@khai.edu, ORCID: 0000-0001-7202-5109, Scopus Author ID: 16645685800.

Olga Shypul – PhD, Associate Professor, Associate Professor of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: o.shipul@khai.edu, ORCID: 0000-0002-1356-5831, Scopus Author ID: 57192959380, Researcher ID: AAD-1985-2020.

Sergey Zaklinsky – Assistant of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: s.zaklinskiy@khai.edu, ORCID: 0000-0003-3287-5795, Scopus Author ID: 57204572302.

Vadim Garin – PhD, Senior Researcher of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: garin.vadim@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7788-0593, Scopus Author ID: 57219015898.

Oleg Tryfonov – PhD, Associate Professor of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: o.v.trifonov@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8058-8649, Scopus Author ID: 57192959255.

Sergiy Plankovskyy – Doctor of Techn. Sci., Professor, Head of Department of Automation and Computer-Integrated Technologies, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine, e-mail: sergiy.plankovskyy@kname.edu.ua, ORCID: 0000-0003-2908-903X, Scopus Author ID: 24473286300, Researcher ID: I-5171-2018.