

А.А. Шульгін<sup>1</sup> В.В. Самулеєв<sup>1</sup> Є.І. Чемерис<sup>1</sup> О.М. Трегуб<sup>2</sup><sup>1</sup> Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ<sup>2</sup> ТОВ “Луцький ремонтний завод “Мотор”, Луцьк

## АДАПТАЦІЯ МОДЕЛІ ВІДЦЕНТРОВОЇ ФОРСУНКИ ДЛЯ РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ В ОСНОВНІЙ КАМЕРІ ЗГОРЯННЯ ТРДДФ

У статті сформульовано припущення щодо можливості використання адаптованої моделі двосоплової відцентрової форсунки при комплексному розрахунково-експериментальному дослідженні робочого процесу в жаровій трубі основної камери згоряння турбореактивних двоохонтурних двигунів з форсажною камерою згоряння (ТРДДФ). Проведено чисельне моделювання впорскування рідини в повітряне середовище на основі усереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса, що описують течію двофазової нестисливої рідини. На основі порівняння результатів візуалізації чисельного моделювання з результатами фізичного експерименту з проливання форсунки ТРДДФ обґрунтовано можливість використання сформованого припущення.

**Ключові слова:** ТРДДФ, відцентрова форсунка, моделювання течії, робочий процес, ресурс.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Рациональні шляхи підтримання справності парку авіаційних двигунів (АД) ґрунтуються на дослідженнях щодо визначення можливості збільшення допустимої величини їх ресурсу. У зв'язку з цим розроблення науково-методичного апарату моделювання фізичних процесів, які відбуваються в ресурсолімітуючих деталях та складальних одиницях (ДСО) АД, щодо їх впливу на пошкодженість в процесі дії експлуатаційних чинників, є актуальним науковим завданням.

В процесі планового другого капітального ремонту ТРДДФ ускладнюється їх комплектування жаровими трубами основної камери згоряння (ЖТ ОКЗ) (рис. 1) із залишком встановленого ресурсу для забезпечення АД чергового міжремонтного ресурсу.

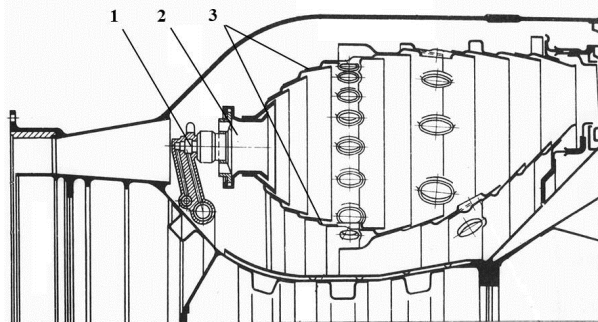


Рис. 1. Схема кільцевої основної камери згоряння ТРДДФ: 1) форсунка, 2) вихоровий пальник, 3) жарова труба.

Джерело: [3, с. 406].

Розв'язання задачі збільшення ресурсних показників АД та їх ДСО вимагає суттєвих матеріальних витрат у зв'язку із значними обсягами розрахунково-експериментальних досліджень, потребою залучення до них низки підприємств та

організацій. У сучасних наукових та інжинірингових дослідженнях, які спрямовані на розв'язання задач збільшення ресурсу та експлуатаційної надійності АД та їх ДСО, у тому числі на стадії експлуатації їх життєвого циклу, САЕ-системи (computer-aided engineering) [1, с. 43] стають невід'ємним інструментом.

Розрахункові можливості більшості сучасних програмних пакетів засновано на чисельних методах рішення диференціальних рівнянь, які описують складні теплові, гідравлічні процеси в ДСО АД та механізми термомеханічного навантаження цих ДСО, їх деформування і міцності.

Використання комп'ютерних моделей, які реалізуються САЕ-системами забезпечує проведення кількісно-якісного аналізу впливу експлуатаційних факторів на пошкодженість ДСО АД. Це, в свою чергу, є основою удосконалення математичного апарату та методів індивідуальної оцінки фактичного залишку їх ресурсу на основі поглибленого дослідження умов навантаження і подальшого обґрунтування конструктивно-технологічних заходів, спрямованих на продовження ресурсних показників за оцінкою їх технічного стану.

Прогнозування настання граничного стану ЖТ ОКЗ повинно базуватись на результатах взаємопов'язаного розрахунку теплового та напружено-деформованого станів їх оболонок. Це обумовлено тим, що основними пошкоджуючими факторами, які обмежують їх надійність, є термічні напруги, які викликані нерівномірністю розподілу полів температури по поверхні і товщині елементів конструкції [2, с. 19].

Чисельне моделювання робочого процесу в ЖТ ОКЗ ускладнене необхідністю інтерпретації взаємопов'язаних фізичних та хімічних процесів у

рухомому неоднорідному за параметрами потоці газів. Ці фактори обумовлюють необхідність розроблення та поєднання декількох математичних моделей із таких галузей знань:

обчислюваної гідродинаміки щодо аналізу впливу конфігурації внутрішнього об'єму, в якому відбувається течія газів на основні характеристики робочого процесу в ОКЗ, визначення розподілу температур на стінках ЖТ;

теплопередачі щодо дослідження процесу нестационарного теплообміну і теплопровідності для розрахунку теплового та напружено-деформованого станів стінок ЖТ ОКЗ з метою прогнозування їх термічної втоми та багатьох інших.

Проведення комплексного дослідження характеру протікання робочого процесу в ОКЗ та його впливу на елементи конструкції ЖТ потребує високих системних вимог до обчислювальної спроможності персональних комп'ютерів. Тому, при побудові математичних моделей, для аналізу робочого процесу, застосовують системні підходи декомпозиції, умовно розділяючи робочий процес в ОКЗ на ряд елементарних процесів [3, с. 388]. Основними складовими робочого процесу в ОКЗ є:

- утворення паливо-повітряної суміші;
- організація займання паливо-повітряної суміші;
- якісне згоряння паливо-повітряної суміші;
- стабілізація полум'я;
- змішування продуктів згоряння із вторинним потоком повітря;
- забезпечення необхідного охолодження стінок ЖТ;
- формування заданої колової та радіальної епюри температури газів на виході тощо.

Це дозволяє проводити поглиблені, вузькоспрямовані дослідження робочого процесу з детальним аналізом його складників, що сприяє виявленню суттєвих функціональних взаємозв'язків між характером протікання робочого процесу в ОКЗ та її конструктивними особливостями. При цьому збільшення відповідності розробленої математичної моделі натурним об'єктам при проведенні розрахунково-експериментального дослідження за певної складової досягається за рахунок припущень за іншими складовими робочого процесу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогоднішній день дослідження та публікації в цьому напрямку відсутні. В основному дослідження спрямовані на верифікацію розроблених методик чисельного моделювання для отримання результатів, які більш точно співпадають з експериментальними вимірюваннями при гідравлічних випробуваннях.

**Мета статті** – обґрунтувати можливість використання адаптованої (спрощеної) моделі відцентрової форсунки для подальших досліджень робочого процесу в ЖТ ОКЗ ТРДДФ.

## Виклад основного матеріалу

Реалізація чисельного моделювання потребує загального розуміння характеру протікання робочого процесу в ОКЗ, оскільки форма розподілу поля температур біля стінок ЖТ ОКЗ є результатом складної взаємодії просторових течій та деяких фізико-хімічних процесів. Але, враховуючи особливості середовища, саме фізичні процеси є визначальними, оскільки в більшій мірі лімітують характеристики протікання робочого процесу [4, с. 37]. В загальному випадку процес горіння можна представити у вигляді структурної схеми послідовно взаємопов'язаних фізичних процесів (рис. 2) [5, с. 66].

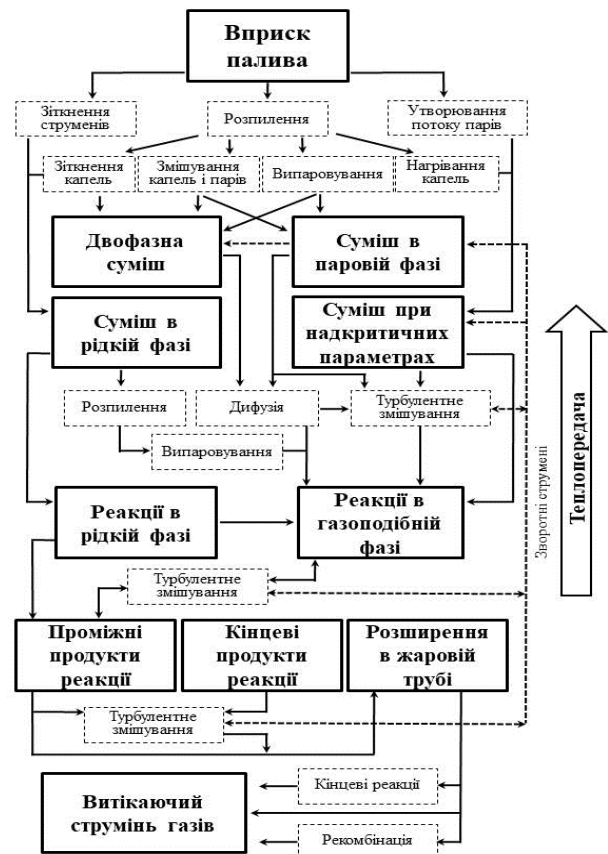


Рис. 2. Структурна схема процесів супроводжуваних горіння.  
Джерело: [5, с. 66].

У кожному окремому випадку представлена схема матиме свої особливості, оскільки в залежності від умов організації горіння переважаючий вплив певних процесів буде змінюватись. Однак, процес змішування палива та окислювача завжди містить визначальний вплив при досягненні найбільшої ефективності горіння (максимального виділення тепла), на що безпосередньо впливає впорскування палива. Таким чином, при чисельному моделюванні робочого процесу в ОКЗ ТРДДФ, з метою отримання більш точних результатів розподілу температур на стінках ЖТ, виникає необхідність у адаптації спрощеної геометрії моделі форсунки для отримання

характеристик розпилю палива, наближених до натурних.

Утворення якісної паливо-повітряної суміші в кільцевих ОКЗ ТРДДФ забезпечується вихоровими пальниками з малим кроком по колу фронтального пристрою, які використовуються як пневматичні розпилювачі палива, що подається за допомогою відцентрових двосоплових форсунок (рис. 3) [6, с. 85].

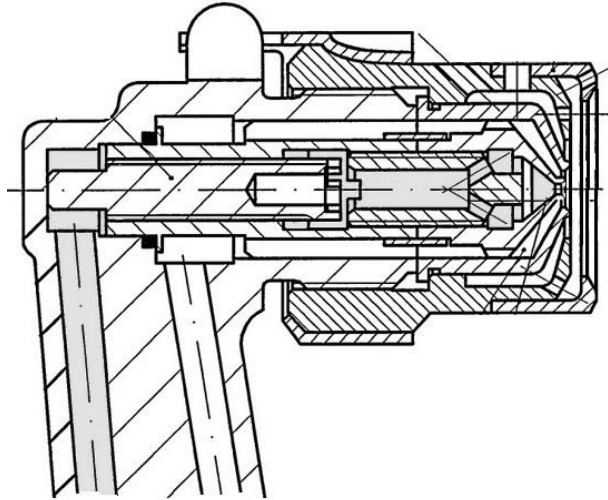


Рис. 3. Схема відцентрової паливної форсунки ОКЗ ТРДДФ.  
Джерело: [7, с. 11].

Основною відмінністю відцентрових форсунок є те, що їх принцип дії базується на закручуванні потоку. Рідина рухається вздовж стінки соплового каналу у вигляді тонкої плівки, яка при виході із сопла форсунки розпадається по прямолінійним траєкторіям, утворюючи факел у вигляді порожнього конуса [8, с. 30]. Таким чином, можна стверджувати, що при чисельному моделюванні робочого процесу на горіння та випаровування суттєво впливає кут розкриття паливного факелу.

З теорії горіння сукупності крапель також встановлено [9, с. 145...154; 10, с. 971...980], що іншою визначальною характеристикою, відповідно до формули (1), є розмір крапель розпиленого палива, оскільки паливо знаходиться і в рідкій, і в паровій фазах.

$$G = \frac{4kn_k r_k Nu Pr^2}{Dc_p^2}, \quad (1)$$

де:  $G$  – запропонований “параметр горіння сукупності крапель”,  $k$  – кінетична енергія турбулентності,  $n_k$  – число крапель в одиниці об’єму,  $r_k$  – радіус крапель,  $Nu$  – число Нуссельта,  $Pr$  – число Прандтля,  $D$  – доля кінетичної енергії турбулентності, що приходить на краплі,  $c_p$  – питома теплоємність газу при сталому тиску.

При розрахунково-експериментальних дослідженнях використовують існуючі методики проектного розрахунку відцентрових форсунок, які наведено в роботі [11, с. 4...12]. За ними, для отримання високої ефективності робочого процесу, визначають ряд основних параметрів:

витрата палива через форсунку;  
величина кута факелу розпилювання;  
товщина плівки палива у вихідному перерізі сопла форсунки;  
швидкість палива в форсунці та в плівці факелу розпилювання [11, с. 4].

Відповідно до теорії ідеальної відцентрової форсунки (рис. 4) автора Г.Н. Абрамовича, яка описана в [12, с. 25...36], встановлено, що витрата

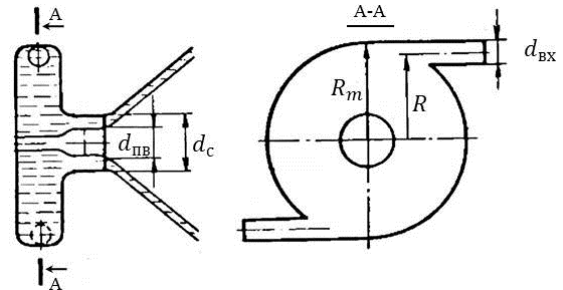


Рис. 4. Розрахункова схема ідеальної відцентрової форсунки.  
Джерело: [11, с. 26].

палива  $Q$  відповідно до формули (2) залежить від геометричних параметрів форсунки  $A$  та коефіцієнта заповнення сопла форсунки  $j$

$$Q = \frac{Pr_c^2}{\sqrt{1-j_c + \frac{1}{j_c^2}}} \sqrt{\frac{2P_m}{r}}, \quad (2)$$

де:  $A$  – геометрична характеристика форсунки (безрозмірна величина), яка визначається за формулою (3):

$$A = \frac{Rr_c}{nr_{ex}^2}. \quad (3)$$

А дотримуючись принципу максимальної витрати, визначено залежність для коефіцієнту витрати  $m$  (4) та геометричної характеристики форсунки від коефіцієнту заповнення сопла (5).

$$m = \sqrt{\frac{j^3}{2-j}}, \quad (4)$$

$$A = \frac{(1-j)\sqrt{2}}{j\sqrt{j}}, \quad (5)$$

де:  $j$  – за визначенням

$$j = 1 - \frac{r_{ne}^2}{r_c^2}.$$

Так, товщину плівки розпиленого палива  $d$  визначають за формулою (6),

$$d = r_c(1 - s_b), \quad (6)$$

де  $s_b = r_{ne}/r_c$  визначається із формули (7).

$$m = \sqrt{1 - m^2 A^2 - s_b \sqrt{s_b - m^2 A^2 - m^2 A^2}} \cdot \ln \frac{1 + \sqrt{1 - m^2 A^2}}{s_b + \sqrt{s_b - m^2 A^2}} \frac{\ddot{\sigma}}{\sigma}. \quad (7)$$

Для об’єкта дослідження, яким обрано двосоплову відцентрову форсунку ТРДДФ, отримано розрахунково-теоретичні значення товщини плівки розпиленого палива. Для І-го

контур у визначено значення, яке становить 0,23 мм, для II-го контура – 0,39 мм.

Крім того, в роботі отримано експериментальні дані, за результатами гідравлічних проливов, характеристик роботи визначеної форсунки. А саме, визначено витратну характеристику при відповідних перепадах тиску та величину кута факела розпилювання (рис 5).

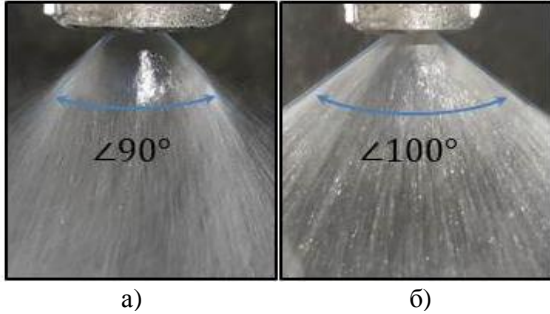


Рис. 5. Характер розпилювання при перепаді тиску 3 бар. а) I контур; б) II контур.  
Джерело: розроблено авторами.

Таким чином, сукупність отриманих результатів дозволяє зробити припущення щодо адаптації моделі форсунки для проведення подальшого чисельного моделювання розпилю палива відцентровою форсункою. Для цього створено модель форсунки у вигляді зрізаного конуса, довжина твірної якого відповідає товщині плівки розпиленого палива у вихідному перетині сопла форсунки, а нормалі до твірної утворюють відповідну величину кута розпилю палива (рис. 6).

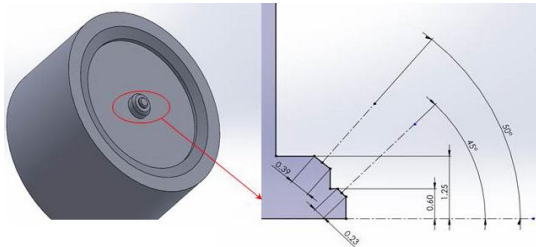


Рис. 6. Модель адаптованої форсунки.  
Джерело: розроблено авторами.

Розрахунково-експериментальне дослідження проводилось з використанням сучасних програмних комплексів CFD-моделювання. Методика проведення розрахунку полягає в інтегруванні диференціальних турбулентних рівнянь Нав'є-Стокса, які описують течію двофазної нестисливої рідини з границею розподілу між фазами. Для вирішення задачі використовується рівняння нерозривності (8) для багатофазового потоку і об'ємне рівняння імпульсу шляхом додавання по фазам (9) [13, с. 160].

$$\frac{\partial (r_m)}{\partial t} + \frac{\partial (r_m u_m^i)}{\partial x^i} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial (r_m u_m^i)}{\partial t} + \frac{\partial (r_m u_m^j u_m^i)}{\partial x^j} = - \frac{\partial p}{\partial x^i} + \frac{\partial (t_m^ji + t_D^ji)}{\partial x^j} + r_m g^i \quad (9)$$

$$r_m = \dot{a}_a r_a r_a ,$$

де:

$$r_m u_m^i = \dot{a}_a r_a r_a u_a^i ,$$

$$t_m = \dot{a}_a r_a t_a ,$$

$$t_D^ji = - \dot{a}_a r_a r_a (u_a^i - u_m^i) u_a^j ;$$

$a$  – складові частини двофазового потоку у вирішуваній задачі.

У роботі навколо моделі форсунки було створено розрахункову область у вигляді циліндру, вісь якого співпадає з віссю форсунки. Створено сітку кінцевих елементів, зорієнтованих вздовж лінії руху води зі згущенням елементів в області форсунки, що дозволяє отримати більш достовірні результати розрахунків при визначенні кута розпилювання води (рис. 7).

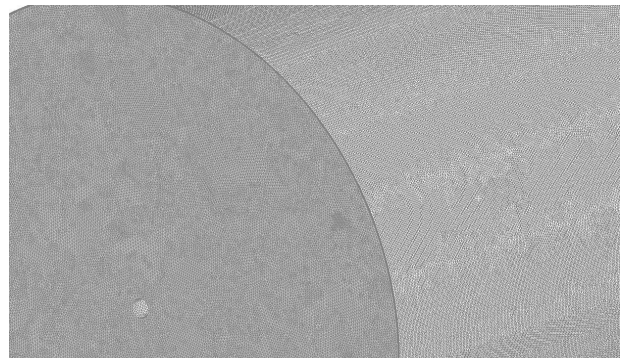


Рис. 7. Структура сітки кінцевих елементів.  
Джерело: розроблено авторами.

При проведенні чисельного моделювання для певних елементів розрахункової області були задані наступні граничні умови:

поверхнею вхідної границі обрано твірну обрізаного конуса, яка, за припущенням, відтворює товщину плівки розпиленого палива. Задана витрата води на поверхні відповідає отриманим експериментальним значенням витратної характеристики досліджуваної форсунки, значення якої змінювались при моделюванні від 0 до 0,004 кг/с. Об'ємна доля рідини при вході в розрахункову область складає 1.0, об'ємна доля повітря – 0.0. Середнє значення діаметру крапель, які утворюються при розпилюванні обрано 0,43 мкм;

поверхнею вихідної границі обрано основу циліндру протилежну до моделі форсунки та задано значення надлишкового тиску 0 бар.

В розрахунковій області на початок розрахунку значення тиску задано 1 бар, значення температури – 20 °С з об'ємними долями води – 0.0 та, відповідно, повітря – 1.0.

На рисунку 8 візуалізовано отримані результати чисельного моделювання для I-го контуру форсунки та проведено порівняння з отриманими результатами гідравлічного проливання форсунки ТРДДФ при різних значеннях витратної характеристики отриманих експериментально.

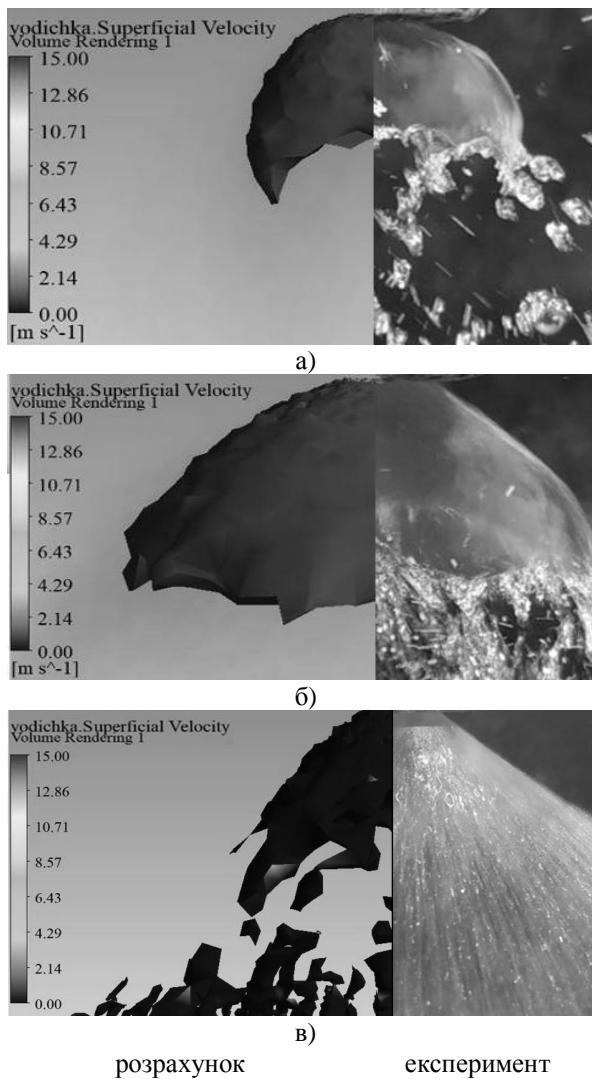


Рис. 8. Візуалізація результатів чисельного та фізичного моделювання течії з 2-го контуру форсунки при значеннях масової витрати рідини: а) 0,002 кг/с; б) 0,003 кг/с; в) 0,004 кг/с.  
Джерело: розроблено авторами.

## Висновки

При порівнянні результатів візуалізації чисельного моделювання витікання рідини з каскадів паливної форсунки з характером течії рідини при фізичному моделюванні форсунки встановлено співпадіння кутів розпилювання, які відрізняються на значення від 3 до 8 градусів. Також спостерігається відповідність у подрібненні кінчної плівки рідини на окремі краплі, що підтверджується початком процесу атомізації на однаковій відстані від вихідного перерізу сопла форсунки. Таким чином, можна зробити висновок, що доцільно використовувати розроблену адаптовану модель форсунки з метою зменшення навантажень на обчислювальні спроможності персонального комп'ютера, на якому проводиться чисельне моделювання.

**Напрями подальших досліджень.** У подальшому планується використовувати адаптовану модель відцентрової форсунки в дослідженнях робочого процесу в ЖТ ОКЗ ТРДДФ, а саме:

визначення впливу зони зворотних течій на характер розпилення пального та його змішуванні з повітрям на нерозрахункових режимах роботи двигуна;

визначення характеру протікання робочого процесу в ЖТ ОКЗ при дослідженні процесу коксування першого контуру паливних форсунок;

визначення розподілу полів температури біля стінок ЖТ ОКЗ з метою визначення критичних ділянок (прогнозування імовірних місць виникнення прогарів у конструкції ЖТ ОКЗ;

встановлення зв'язку між характером протікання робочого процесу в ЖТ ОКЗ та основними пошкодженнями конструкції, які виявляються при капітальному ремонті двигуна.

## Список літератури

1. Прогрессивные технологии моделирования, оптимизации и интеллектуальной автоматизации этапов жизненного цикла авиационных двигателей: Монография / А.В. Богуслаев, Ал.А. Олейник, Ан.А. Олейник, Д.В. Павленко, С.А. Субботин; Под ред. Д.В. Павленко, С.А. Субботина.– Запорожье: ОАО “Мотор Сич”, 2009. – 468 с.
2. Лукаш В.П., Попов В.Л., Рекин А.Д. Расчетно-экспериментальное исследование теплового и напряженного состояния стенок жаровых труб с точеными секциями. Труды № 1295 Выпуск второй, ЦИАМ, 1992. – С. 19–27.
3. Вьюнов С.А. и др. Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей – М.: Машиностроение, 1989. – 368 с.
4. Arthur H. Lefebvre, Dilip R. Ballal. Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions, Third Edition – Taylor & Francis, 2010. – 557 p.
5. Hartje D.T. Liquid Propellant Rocket Combustion Instability – SP-194. Washington, DC United States: NASA Headquarters, 1972. – 637 p.
6. Назаров А.А. Турбореактивный двухконтурный двигатель с форсажной камерой сгорания АЛ-31Ф. Учебное пособие. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1987. – 362 с.
7. Леонтьев М.К. Атлас деталей и узлов двухконтурного турбореактивного двигателя АЛ-31Ф – М.: МАИ, ОАО “НПО “Сатурн” НТЦ им. А. Льюльки, 2008. – 20 с.
8. Пажи Д.Г., Галустов В.С. Распылители жидкостей – М.: Химия, 1979. –216 с.
9. Suzuki T., Chiu H.H. Multi-droplet combustion of liquid propellant – Proceedings of 9<sup>th</sup> Int. on Space Technology and Science, Tokio, Japan, 1971. – P. 145–154.



10. Chiu H.H. and oth. Internal group combustion of liquid droplets – 19<sup>th</sup> Symp. (Int.) on Combustion, 1982. – P. 971–980.
11. Салич В.Л., Семкин Е.В. Расчетно-теоретическое и экспериментальные исследования центробежной форсунки ракетного двигателя тягой 13Н – Вестник ЮУрГУ. Серия: Машиностроение, Том 13, № 1, 2013. – С. 4–12.
12. Дитяткин Ю.Ф. и др. Распыливание гиджостей – М.: Машиностроение, 1977. – 208 с.
13. ANSYS CFX-Solver Theory Guide – ANSYS CFX Release 11.0, 2006 – 312 p.

*Надійшла до редколегії 18.10.2022*

*Схвалена до друку 12.12.2022*

**Відомості про авторів:**

**Шульгін Артем Анатолійович**

кандидат технічних наук  
старший дослідник  
начальник науково-дослідного відділу  
Державного науково-дослідного інституту авіації,  
Київ, Україна.  
<https://orcid.org/0000-0002-2403-7348>

**Самулеєв Володимир Вікторович**

кандидат технічних наук  
доцент  
провідний науковий співробітник  
Державного науково-дослідного інституту авіації,  
Київ, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-3793-5083>

**Чемерис Євгеній Ігорович**

старший науковий співробітник  
Державного науково-дослідного інституту авіації,  
Київ, Україна.  
<https://orcid.org/0000-0003-4918-3445>

**Трегуб Олександр Миколайович**

Заступник директора ТОВ “ЛРЗ “Мотор” з якості,  
Луцьк, Україна.  
<https://orcid.org/0000-0003-2423-7531>

**Information about the authors:**

**Artem Shulhin**

Candidate of Technical Sciences  
Senior Researcher  
Head of Research Department  
of State Research Institute of Aviation,  
Kyiv, Ukraine.  
<https://orcid.org/0000-0002-2403-7348>

**Volodymyr Samulieiev**

Candidate of Technical Sciences  
Associate Professor  
Leading Researcher  
of State Research Institute of Aviation,  
Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-3793-5083>

**Yevheniy Chemerys**

Senior Researcher  
of State Research Institute of Aviation,  
Kyiv, Ukraine.  
<https://orcid.org/0000-0003-4918-3445>

**Oleksandr Trehub**

Deputy Director for Quality,  
Lutsk, Ukraine.  
<https://orcid.org/0000-0003-2423-7531>

**THE MODEL ADAPTATION OF THE TWO-NOZZLE SWIRL ATOMIZER FOR THE DESIGN-EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE WORKING PROCESS IN THE MAIN COMBUSTION CHAMBERS OF TURBOJET ENGINES**

*A. Shulhin, V. Samuleev, Y. Chemerys, O. Trehub*

*In the article formulated the assumption concerning the possibility of using adapted model of the two-nozzle swirl atomizer at the complex design-experimental research of the working process in the flame tube for main combustion chamber of turbojet engines. A numerical simulation of the liquid flow into the air environment is basis on the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations, that describe the flow of the two-phase, non-compressed liquid. On the basis of comparison results of the numerical simulation with the results of the physical experiment on the hydraulic spill of the two-nozzle swirl atomizer turbojet engines the correlation of the particle angle differs from 3 to 8 degrees. There is also a correspondence in the crushing of the liquid conical film on separate drops, which is confirmed by the beginning of the process of atomization at the same distance from the initial cut of the nozzle. Therefore, it can be concluded that the possibility of using formulated assumption is justified. This allows the required accuracy for next purposes at the complex design-experimental research of the working process in the flame tube for main combustion chamber of turbojet engines. Specifically determination of influence of inverse zone currents on the character of fuel spray and its mixing with air on engine operation at steady-state modes. Establish a connection between the flow pattern of the working process in the in the main combustion chambers and the main structural damage that is found during the overhaul of the turbojet engines.*

*Keywords: turbojet engines, swirl atomizer, liquid flow numerical simulation, working process, resource.*