

УДК 629.7.083

doi: 10.32620/aktt.2023.4sup2.04

Ю. О. УЛІТЕНКО, М. А. МІНЕНКО, І. Ф. КРАВЧЕНКО

ДП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна

АНАЛІЗ ВПЛИВУ МІСЦЯ ВПОРСКУВАННЯ ВОДИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВОКОНТУРНОГО ДВИГУНА З ФОРСАЖНОЮ КАМЕРОЮ ЗГОРЯННЯ

Важливим напрямком для розвитку високошвидкісних літальних апаратів є розширення діапазону експлуатації авіаційних двигунів у складі їх силових установок. Нині діапазон експлуатації авіаційних двигунів за висотою та швидкістю польоту обмежений здатністю матеріалів конструкції витримувати температуру робочого тіла. Тому для розширення діапазону експлуатації необхідно або змінювати матеріали конструкції, або застосовувати технології, що передбачають охолодження робочого тіла. Система впорскування води в турбореактивний двоконтурний двигун з форсажною камерою згоряння дозволяє здійснити охолодження робочого тіла без значного втручання до конструктивного профілю двигуна, що значно заощаджує час проектування та вартість розробки. Також впорскування води давно використовується для короткочасного збільшення тяги двигуна, що є додатковою перевагою для застосування даної системи. Вибір місця впорскування води у тракт двигуна має великий вплив на його характеристики та на можливість високошвидкісного літального апарату виконувати поставлені задачі. Саме тому проектування двигуна має відбуватися з розумінням цільового призначення високошвидкісного літального апарата. В статті виконано аналіз впливу місця впорскування води на характеристики турбореактивного двоконтурного двигуна з форсажною камерою згоряння. Розглянуто впорскування води на вході до вентилятора та на вході до компресора високого тиску. Показано вплив місця впорскування і умов польоту на витрату води. Знайдено умови експлуатації, в яких неможливе використання турбореактивного двоконтурного двигуна з форсажною камерою згоряння через обмеження, що не пов'язані з температурою робочого тіла. Наведені результати розрахунків щодо впливу місця впорскування води на основні термодинамічні параметри та тягові характеристики двигуна. Застосування отриманих результатів дасть змогу підвищити термодинамічну ефективність і розширити діапазон експлуатації турбореактивних двоконтурних двигунів з форсажною камерою згоряння з використанням сучасних матеріалів. Результати цієї роботи також дадуть змогу скоротити період створення конкурентоспроможних двигунів для високошвидкісних літальних апаратів за рахунок цілеспрямованого пошуку їх раціонального термодинамічного і конструктивно-геометричного обрису.

Ключові слова: високошвидкісний літальний апарат; турбореактивний двоконтурний двигун з форсажною камерою згоряння; діапазон експлуатації; робоче тіло; впорскування води; вентилятор; компресор високого тиску; характеристики двигуна; тяга; вологовміст; охолодження.

Вступ

Постановка задачі та аналіз публікацій

Створення силових установок (СУ) літальних апаратів (ЛА) для надзвукових та гіперзвукових швидкостей польоту ($M_{\Pi} \geq 2 \dots 5$) є одним з важливих напрямків розвитку технічного прогресу та рівня авіаційно-космічної техніки.

Діапазон експлуатації існуючих СУ з турбореактивними двоконтурними двигунами з форсажною камерою згоряння (ТРДДФ) обмежений здатністю матеріалів конструкції витримувати певний рівень максимальних температур робочого тіла, що зростає зі збільшенням швидкості польоту. Нині максимальна швидкість більшості існуючих ТРДДФ знаходиться в діапазоні 1,6...2,0 чисел Маха. Водночас існуючі ТРДДФ мають потенціал щодо модернізації для досягнення швидкостей польоту $M_{\Pi} \sim 3$.

Існують два розповсюджені шляхи розширення діапазону експлуатації ТРДДФ:

- модернізація конструкції із застосуванням високовартісних жароміцних матеріалів;
- модернізація конструкції шляхом впорскування охолоджувача в певному перерізі ТРДДФ.

Одним з прикладів застосування впорскування є технологія МІРСС системи RASCAL [1], що передбачає розпилення охолоджувача на вході до двигуна при досягненні швидкості польоту $M_{\Pi} = 3$. Впорскування рідини та використання її теплоти нагріву і випаровування для охолодження робочого тіла дозволяє двигуну працювати на більш високих швидкостях польоту без перевищення температурних обмежень. Додатковою перевагою є збільшення тяги, що може бути використана для додаткового прискорення та підйому на більші висоти польоту.

В якості охолоджувача для впорскування зазвичай обирають поширені та безпечні для експлуатації рідини, використання яких не потребує значної модернізації інфраструктури аеродромів. Таким чином широке застосування отримала дистильована вода.

Нині широко досліджується вплив впорскування води на характеристики як окремих вузлів, так і газотурбінних двигунів у цілому.

У роботі [2] досліджено ефективність застосування впорскування води на вході до турбіни двигуна за різних умов експлуатації. Результати демонструють, що температура, до якої охолоджують робоче тіло, залежить від вологовмісту та від швидкості польоту.

У роботах [3-5] розглянуто вплив впорскування води в проточну частину ТРДДФ на його характеристики. Результати робіт [3-5] демонструють, що впорскування води дозволяє розширити діапазон експлуатації ТРДДФ до необхідної швидкості польоту. Однак роботи [3-5] не дають рекомендацій щодо вибору місця впорскування та не демонструють порівняльного аналізу характеристик двигунів з різним місцем впорскування води.

У роботі [6] проведено аналіз впливу місця впорскування на якість випаровування води та на процес охолодження трьохвального компресора. Результати демонструють, що впорскування води в компресор високого тиску (КВТ) дозволяє краще забезпечити випаровування крапель води. Це, зі свого боку, дозволяє зменшити час для охолодження робочого тіла в компресорі. Впорскування води в компресор середнього тиску дозволяє краще забезпечити проміжне охолодження за рахунок випаровування крапель вздовж компресора.

До схожих висновків також прийшли автори роботи [7], що присвячена пошуку оптимального місця впорскування води у компресорі для організації найбільш ефективного процесу випаровування. Недоліком роботи [7] є те, що дослідження проведені лише в умовах стандартної атмосфери на рівні моря без врахування підвищення температури зі зростанням швидкості польоту. Тому використовуючи результати роботи [7] важко робити висновки щодо раціонального вибору місця впорскування води для інших умов експлуатації.

Також результати робіт [6] та [7] не демонструють як місце впорскування впливає на зміну діапазону експлуатації та характеристики двигуна.

Дослідження щодо конструктивних особливостей застосування систем впорскування води демонструють певні протиріччя. Застосування будь-яких систем охолодження робочого тіла у конструкції двигуна впливає на поле газового потоку, може викликати його коливання та негативно вплинути на стабільність роботи компресорів та двигуна у цілому [8].

Через значні конструктивні зміни корпусів компресора, що необхідні для реалізації міжступеневого впорскування охолоджувача, цей напрямок також не отримав широкого застосування [9].

Однак через економічний ефект та можливість збільшення тягових характеристик двигуна впорскування води в перехідних каналах викликає інтерес у дослідників [8].

Своєю чергою вимоги до витрати води, що впорскують в тракт двигуна при різних швидкостях польоту, досі не зрозумілі. Тому, окрім необхідності створення отворів в корпусі компресора для встановлення пристроїв для розпилу та загромодження тракту двигуна, існує проблема, що пов'язана з надлишковим розпилом води, а саме потенційна ерозія лопаток компресора. Тому даний напрямок все ще підлягає подальшим дослідженням.

Ціллю роботи є порівняння впливу впорскування води на вході до вентилятора та впорскування води на вході до КВТ на діапазон роботи та на характеристики ТРДДФ.

Дана стаття є завершальною у циклі робіт щодо аналізу впливу впорскування води у тракт ТРДДФ [3-5].

Постановка задачі

Основними задачами дослідження впливу місця впорскування води на характеристики ТРДДФ є:

- збільшення швидкісних характеристик ТРДДФ, що призначений для зльоту та прискорення літального апарату (ЛА);
- аналіз впливу місця впорскування на тягові характеристики ТРДДФ;
- аналіз впливу місця впорскування води на характеристики ЛА.

Роботу ТРДДФ розглянуто в діапазоні швидкостей 2,0 – 3,2 Маха та висот 16 – 21 км.

Експлуатація ТРДДФ повинна забезпечуватися існуючою інфраструктурою на аеродромах і не вимагати спеціальних заходів.

Для рішення поставлених задач використані наукові методи та теорії: робочих процесів повітряно-реактивних двигунів, системного аналізу, математичного моделювання, обчислювальної математики та систем автоматичного проектування.

Опис математичної моделі

Дослідження проведені за допомогою динамічної повузлової математичної моделі (ММ), що розроблена на ДП «Івченко-Прогрес». На рис. 1 представлена розрахункова схема ТРДДФ.

Робота ММ здійснюється на основі загального підходу до рішення системи рівнянь, що описують

термодинамічні, газодинамічні та фізичні зв'язки у газотурбінному двигуні [10] та представляє собою математичний метод рішення системи нелінійних рівнянь. Система основних рівнянь руху газу в теорії повітряно-реактивних двигунів представляє собою математичний апарат, за допомогою якого описуються робочі процеси в елементах двигуна.

Систему рівнянь обрано, виходячи з необхідності забезпечити:

- термодинамічну узгодженість вузлів і елементів двигуна;
- збереження фізичних та газодинамічних зв'язків між вузлами та елементами двигуна;
- виконання рівняння нерозривності витрати робочого тіла крізь вузли та елементи двигуна;
- сталість геометричних розмірів двигуна (окрім перерізів F8 та F9);
- підтримання заданих параметрів керування та урахування експлуатаційних обмежень.

Для вирішення системи рівнянь застосовано математичний метод Ньютона–Рафсона, що дозволяє, використовуючи вплив незалежних змінних на значення нев'язок, знайти значення незалежних змінних, що приводять нев'язки до близьконульових значень з заданою точністю.

Розрахунки параметрів двигуна виконані:

- із застосуванням палива ТС-1, теплотворна здатність якого становить 43400,0 кДж/кг [11];
- на усталених режимах роботи;
- з урахуванням залежності термодинамічних властивостей робочого тіла від температури і його хімічного складу;
- при номінальних налаштуваннях законів керування;

– з урахуванням експлуатаційних обмежень:

- $T_{3 \max}^*$;
- $P_{3 \max}^*$;
- $T_{41 \max}^*$;
- $T_{7 \max}^*$.

– без урахування термічної дисоціації.

Для розрахунку характеристик ТРДДФ з впорскуванням води до ТРДДФ у ММ додані:

- модуль розрахунку впорскування та випаровування води на вході до вентилятора та на вході до КВТ для охолодження робочого тіла до необхідної температури:

$$T_2^* = f(T_1^*; t_{\text{вод}}; G_{\text{вод}}), \quad (1)$$

$$T_{25}^* = f(T_{23}^*; t_{\text{вод}}; G_{\text{вод}}), \quad (2)$$

де $t_{\text{вод}}$ – температура води, що впорскується;

$G_{\text{вод}}$ – витрата води, що впорскується;

$$G_2 = G_1 + G_{\text{вод}}, \quad (3)$$

$$G_{25} = G_{23} + G_{\text{вод}}; \quad (4)$$

– модуль, що враховує зміну теплофізичних властивостей робочого тіла в залежності від вологовмісту (WAR) та відносної витрати пального (q_T):

$$(k_2; R_2; H_2; S_2) = f(\text{WAR}; T_2^*; q_T), \quad (5)$$

$$(k_{25}; R_{25}; H_{25}; S_{25}) = f(\text{WAR}; T_{25}^*; q_T); \quad (6)$$

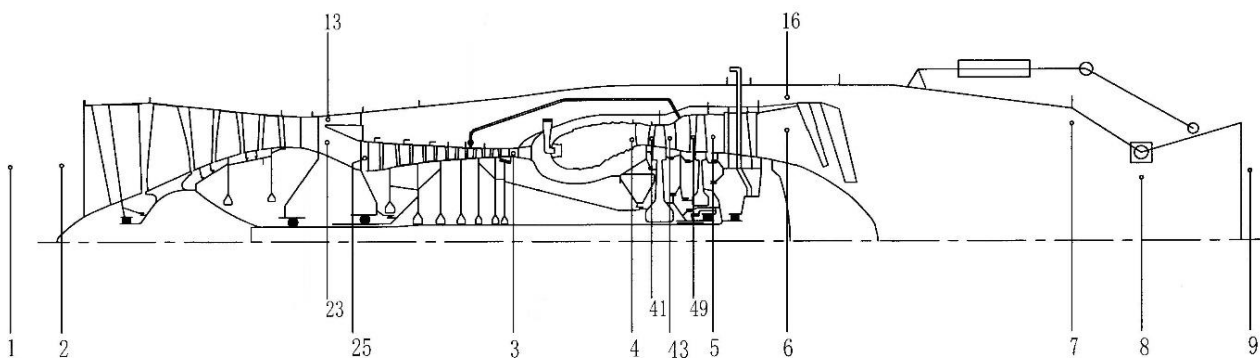


Рис. 1. Розрахункова схема ТРДДФ:

- 1 – атмосферні умови; 2 – вихід з повітрязабірника та вхід до двигуна;
- 13 – вихід з вентилятора зовнішнього контуру (ЗК); 23 – вихід з вентилятора внутрішнього контуру (ВК);
- 25 – вхід до компресора високого тиску (КВТ); 3 – вихід з КВТ і вхід до камери згоряння (КЗ);
- 4 – вихід з КЗ і вхід до соплового апарату (СА) турбіни високого тиску (ТВТ);
- 41 – вихід з СА та вхід до робочого колеса (РК) ТВТ; 43 – вихід з РК ТВТ і вхід до СА турбіни низького тиску (ТНТ); 49 – вихід з СА та вхід до РК ТНТ; 5 – вихід з РК ТНТ; 16 – вихід з сопла ЗК; 6 – вихід з сопла ВК; 61 – вхід до форсажної камери (ФК); 7 – вихід з форсажної камери і вхід до реактивного сопла (РС);
- 8 – критичний переріз РС; 9 – вихід (зріз) РС

– модуль корегування характеристик компресорів від вологовмісту:

$$(\pi_K; \eta_K) = f(n_{ГР}; G_{ГР}; WAR), \quad (7)$$

де π_K – степінь підвищення тиску компресора;

η_K – коефіцієнт корисної дії компресора;

$n_{ГР}$ – зведені оберти компресора;

$G_{ГР}$ – зведена витрата повітря через компресор;

– модуль корегування характеристик турбін від вологовмісту:

$$(A_T; \eta_T) = f\left(\frac{n}{\sqrt{T^*}}; \pi_T; WAR; q_T\right), \quad (8)$$

де A_T – зведена витрата газу через «горло» соплового апарату турбіни;

η_T – коефіцієнт корисної дії турбіни;

n – фізичні оберти турбіни;

π_T – степінь зменшення тиску турбіни.

Також для визначення витрати води, що необхідна для охолодження повітря до потрібної температури в систему рівнянь ММ ТРДДФ додані два додаткових рівняння:

– балансу витрати води;

– балансу тиску вологого повітря.

ММ дозволяє здійснювати розрахунки характеристик ТРДДФ, як при впорскуванні води, так і при наявності вологи в атмосферному повітрі.

Формули для розрахунку тиску насиченого водяного пара взято з рекомендацій Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation – всесвітньої метеорологічної організації (World Meteorological Organization) за 2008 рік [12].

Результати досліджень

Для аналізу впливу місця впорскування води проведені розрахунки ТРДДФ:

– без впорскування води;

– з впорскуванням води на вході до вентилятора;

– з впорскуванням води на вході до КВТ.

Розрахунки виконані на режимі роботи повний форсаж з номінальними налаштуваннями системи автоматичного керування ТРДДФ для різних висот (16500 і 21000 м) і швидкостей польоту з врахуванням наступних експлуатаційних обмежень:

– обмеження максимального значення повної температури на виході з КВТ ($T_{3 \max}^*$);

– обмеження максимального значення повного тиску на виході з КВТ ($P_{3 \max}^*$);

– обмеження максимального значення повної температури на вході до РК ТВТ ($T_{41 \max}^*$);

– обмеження максимального значення повної температури на виході з ФКС ($T_{7 \max}^*$).

Під час виконання досліджень прийняте припущення, що паливні насоси будуть обрані для забезпечення необхідної витрати палива при модернізації ТРДДФ з впорскуванням води.

Температура води, що впорскується до проточної частини двигуна прийнята $t_{\text{вод}} = 20^\circ\text{C}$.

На рис. 2-8 у відносному вигляді представлені залежності зміни основних параметрів ТРДДФ з урахуванням місця впорскування води. Параметри ТРДДФ при впорскуванні води на вході до вентилятора та на вході до КВТ змінюються схожим чином, проте суттєво відрізняються за впливом на робочий процес.

Результати розрахунків підтверджують, що впорскування води дозволяє розширити діапазон експлуатації за швидкістю до значення $\sim 3,2$ числа Маха та одночасно покращити тягові характеристики ТРДДФ.

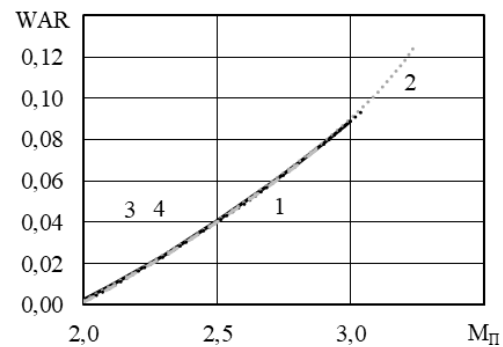


Рис. 2. Залежності зміни вологовмісту при впорскуванні води від висоти та числа Маха:
1 – $H_{п} = 16500$ м; 2 – $H_{п} = 21000$ м;
3 – ТРДДФ з впорскуванням до вентилятора;
4 – ТРДДФ з впорскуванням до КВТ

Рис. 2 демонструє, що місце впорскування води та висота польоту не впливають на значення вологовмісту. Значення вологовмісту залежить лише від швидкості польоту. Це пояснюється тим, що із зростанням швидкості польоту збільшується значення температури повітря, що потрапляє до двигуна. Тому його охолодження потребує більшої витрати води (див. рис. 3).

При впорскуванні води на вході до вентилятора необхідна більша кількість води, так як охолоджувати необхідно все повітря, що потрапляє до ТРДДФ. Це призводить до збільшення баків з водою на борту ЛА. Однак впорскування води на вході до вентилятора дозволяє охолодити весь двигун, а не лише газогенератор, та досягти більшу швидкість польоту (див. рис. 3).

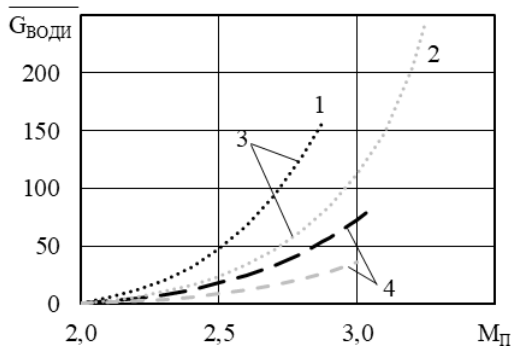


Рис. 3. Залежності зміни витрати води від висоти та числа Маха:
 1 – $H_{п} = 16500$ м; 2 – $H_{п} = 21000$ м;
 3 – ТРДДФ з впорскуванням до вентилятора;
 4 – ТРДДФ з впорскуванням до КВТ

При впорскуванні води у проточну частину двигуна повний тиск зростає, так як сума парціальних тисків суміші газів, дорівнює тиску даної суміші в цілому. Коли повний тиск за КВТ (рис. 4) досягає максимального значення, що може витримати конструкція двигуна далі збільшувати швидкість за допомогою впорскування води неможливо.

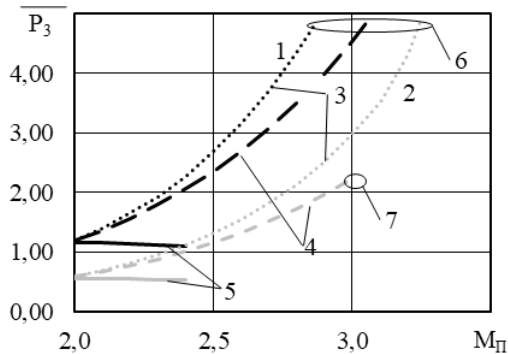


Рис. 4. Залежності зміни повного тиску за компресором від висоти та числа Маха:
 1 – $H_{п} = 16500$ м; 2 – $H_{п} = 21000$ м;
 3 – ТРДДФ з впорскуванням до вентилятора;
 4 – ТРДДФ з впорскуванням до КВТ;
 5 – ТРДДФ без впорскування;
 6 – обмеження по $P_3^*_{max}$;
 7 – обмеження по $T_{23}^*_{max}$

У разі з впорскуванням води на вході до КВТ обмеження за повним тиском настає при більших швидкостях польоту. Це відбувається за рахунок того, що впорскування води не впливає на повітря, що прямує крізь вентилятор.

Результати досліджень на рис. 5 демонструють, що впорскування води призводить до зростання витрати робочого тіла через двигун. У разі впорскування води на вході до вентилятора зростання витрати робочого тіла є більш суттєвим. Зі свого боку

збільшення витрати робочого тіла також призводить до зростання значень витрати пального (рис. 6). З аналізу представлених на рис. 3 та 6 даних видно, що при впорскуванні води на вході до КВТ витрата води в діапазоні дослідження не перевищує сумарну витрату палива в ТРДДФ.

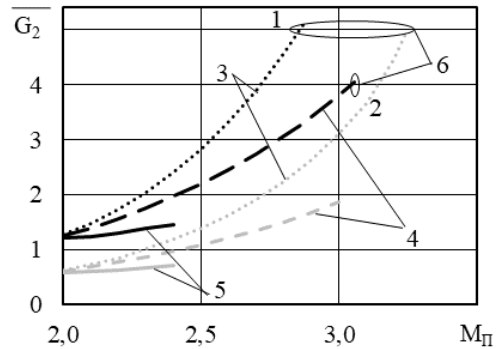


Рис. 5. Залежності зміни витрати повітря від висоти та числа Маха:
 1 – $H_{п} = 16500$ м; 2 – $H_{п} = 21000$ м;
 3 – ТРДДФ з впорскуванням до вентилятора;
 4 – ТРДДФ з впорскуванням до КВТ;
 5 – ТРДДФ без впорскування;
 6 – обмеження по $P_3^*_{max}$

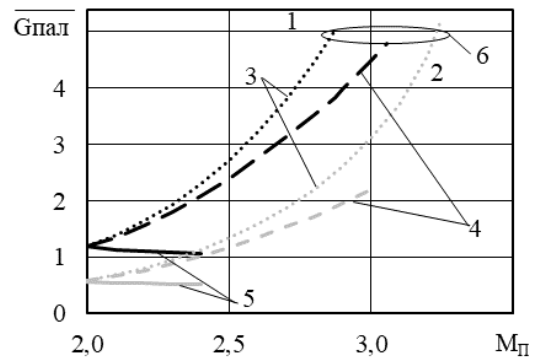


Рис. 6. Залежності зміни витрати палива від висоти та числа Маха:
 1 – $H_{п} = 16500$ м; 2 – $H_{п} = 21000$ м;
 3 – ТРДДФ з впорскуванням до вентилятора;
 4 – ТРДДФ з впорскуванням до КВТ;
 5 – ТРДДФ без впорскування;
 6 – обмеження по $P_3^*_{max}$

Перераховані вище фактори суттєво впливають на тягу двигуна (рис. 7) в сторону її збільшення.

Слід зауважити, що разом із збільшенням тиску у проточній частині двигуна внаслідок впорскування води також збільшується і тиск на вході в регульоване сопло. Наслідком цього є недорозширення тиску на виході з регульованого сопла до атмосферних умов, що впливає на тягу двигуна (див. рис. 7). Тому, для зменшення втрат тяги під час модернізації

ТРДДФ необхідно виконувати корегування розмірів та законів керування регульованим соплом.

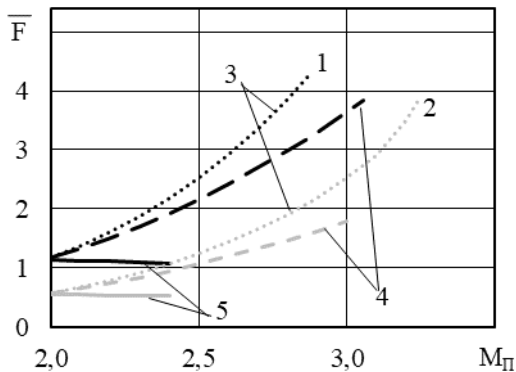


Рис. 7. Залежності зміни тяги від висоти та числа Маха:

- 1 – $H_{П} = 16500$ м; 2 – $H_{П} = 21000$ м;
- 3 – ТРДДФ з впорскуванням до вентилятора;
- 4 – ТРДДФ з впорскуванням до КВТ;
- 5 – ТРДДФ без впорскування

Результати досліджень демонструють, що зі збільшенням швидкості польоту тяга ТРДДФ при впорскуванні води на вході до вентилятора зростає, досягає більших значень, ніж при впорскуванні води на вході до КВТ (див. рис. 7). Це пояснюється більшими значеннями витрати робочого тіла, а також тим, що при впорскуванні води на вході до вентилятора, крізь зовнішній контур прямує охолоджений потік, що після змішування з потоком внутрішнього контуру дозволяє отримати меншу температуру на вході до форсажної камери згоряння. Це дозволяє використати більше палива у форсажній камері і таким чином реалізувати більший підігрів.

Водночас питома тяга (рис. 8) більша у ТРДДФ з впорскуванням на вході до КВТ.

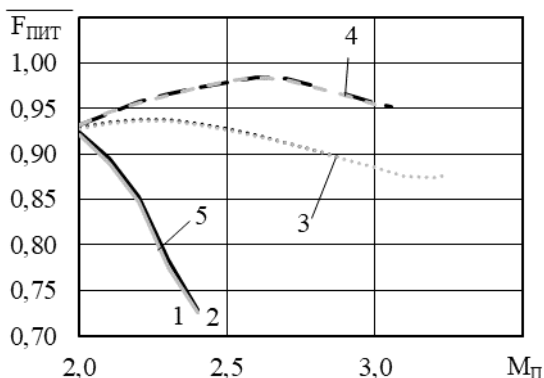


Рис. 8. Залежності зміни питомої тяги від висоти та числа Маха:

- 1 – $H_{П} = 16500$ м; 2 – $H_{П} = 21000$ м;
- 3 – ТРДДФ з впорскуванням до вентилятора;
- 4 – ТРДДФ з впорскуванням до КВТ;
- 5 – ТРДДФ без впорскування

Висновки

Науково-дослідна робота з аналізу впливу місця впорскування води на характеристики ТРДДФ дозволяє зробити такі висновки:

1. На малих висотах експлуатації отримати більші швидкості польоту ЛА дозволяє ТРДДФ з впорскуванням води на вході до КВТ, а на великих висотах експлуатації ТРДДФ з впорскуванням води на вході до вентилятора.

2. Впорскування води у тракт ТРДДФ дозволяє збільшити тягові характеристики. Для покращення тягових характеристик ЛА доцільно використовувати ТРДДФ з впорскуванням води на вході до вентилятора.

3. ТРДДФ з впорскуванням води на вході до вентилятора потребує більше води та палива порівняно з ТРДДФ з впорскуванням води на вході до КВТ. При однаковому об'ємі баків, ЛА з ТРДДФ з впорскуванням води на вході до вентилятора матиме меншу дальність польоту або меншу масу корисного навантаження при збільшенні баків.

4. Для вибору місця впорскування води необхідний аналіз характеристик ТРДДФ у складі ЛА з використанням типових польотних циклів. Система має проектуватися, як єдиний об'єкт з заданим цільовим призначенням. Це є окремим напрямком для подальших досліджень.

5. Окремим напрямком подальших досліджень є створення математичної моделі камери випаровування води для аналізу ефективності конструктивних рішень при застосуванні у складі ТРДДФ.

Внесок авторів: формулювання проблеми – **І. Ф. Кравченко, Ю. О. Улітенко**; огляд та аналіз інформаційних джерел – **М. А. Міненко**; розробка математичної моделі – **Ю. О. Улітенко, М. А. Міненко**; проведення розрахункових досліджень – **М. А. Міненко, Ю. О. Улітенко**; аналіз отриманих результатів – **І. Ф. Кравченко, Ю. О. Улітенко, М. А. Міненко**.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. *Water injection pre-compressor cooling assist space access [Text] / U. Mehta, J. Bowles, J. Melton [et al.] // The Aeronautical Journal. – 2015. – Vol. 119, no. 1212. – P. 145-171.*
2. *Effect of Water Injection on Turbine Inlet under Different Flight Conditions [Text] / J. Luo, S. Huang, S. Yang [et al.] // Energies. – 2022. – Vol. 15(19). – 16 p. DOI: 10.3390/en15197447.*
3. *Улітенко, Ю. А. Модернизация турбореактивного двухконтурного двигателя с форсажной камерой сгорания путем впрыска воды в проточную*

часть воздухозаборника [Текст] / Ю. А. Улитенко, А. В. Еланский, И. Ф. Кравченко // *Вестник двигателестроения*. – 2014. – № 2. – С. 122–129.

4. Улитенко, Ю. А. Анализ характеристик турбореактивного двухконтурного двигателя с форсажной камерой сгорания с впрыском воды за входным устройством [Текст] / Ю. А. Улитенко // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2019. – № 1 (153). – С. 29–38. DOI: 10.32620/akt.2019.1.03.

5. Улітенко, Ю. О. Аналіз характеристик турбореактивного двоконтурного двигуна з форсажною камерою згорання з впорскуванням води на вході до компресора високого тиску [Текст] / Ю. О. Улітенко, М. А. Міненко, І. Ф. Кравченко // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2022. – № 4 спеціальний випуск 1 (181). – С. 49–57. DOI: 10.32620/akt.2022.4sup1.08.

6. Alejandro, B. Aero Engine Compressor Cooling bu Water Injection – Part 1: Evaporative Compressor Model [Text] / B. Alejandro, U. Igie // *Energy*. – 2018. – Vol 160. – P. 1224-1235. DOI: 10.1016/j.energy.2018.05.170.

7. Шигапов, А. Б. Расчетное исследование влияния впрыска воды в проточную часть компрессора газотурбинной установки [Текст] / А. Б. Шигапов, А. А. Шигапов, М. Х. Зиннатулин // *Проблемы энергетики*. – 2012. – № 3-4. – С. 113-118.

8. Wang, T. Overspray and Interstage Fog Cooling in Compressor Using Stage-Stacking Scheme – Part 1: Development of Theory and Algorithm [Text] / T. Wang, J. R. Khan // *Proceedings of GT2008 ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea and Air*. – 2008. – P. 99-109. DOI: 10.1115/GT2008-50322.

9. Gas turbine compressor performance characteristics during wet compression – influence of polydisperse spray [Text] / R. K. Bhargava, M. Bianchi, M. Chaker [et al.] // *Proceedings of ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea and Air, GT2009-59907*. – 2009. – P. 655-666. DOI: 10.1115/GT2009-59907.

10. Ильичев, Я. Т. Термодинамический расчет воздушно-реактивных двигателей [Текст] / Я. Т. Ильичев – М. : Труды № 677, ЦИАМ, 1975. – 126 с.

11. Шляхтенко, С. М. Теория воздушно-реактивных двигателей. [Текст] / С. М. Шляхтенко. – М. : Машиностроение, 1975. – 567 с.

12. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation* [Text] // *World Meteorological Organization* – Geneva, 2008. – 678 p.

References

1. Mehta, U., Bowles, J., Melton, J., Huynh, L. & Hagseth, P. Water injection pre-compressor cooling assist space access. *The Aeronautical Journal*, 2015, vol. 119, no. 1212, pp. 145-171.

2. Luo, J., Huang, S., Yang, S., Zhang, W. & Mu, Z. Effect of Water Injection on Turbine Inlet under Different Flight Conditions. *Energies*, 2022, vol. 15(19). 16 p. DOI: doi.org/10.3390/en15197447.

3. Ulitenko, Yu. A., Elanskij, A. V. & Kravchenko, I. F. Modernizacija turboreaktivnogo dvuhkonturnogo dvigatelja s forsazhnoj kameroy sgoraniya putem vpryska vody v protochnuju chast' vozduhozabornika [Modernization of the turbofan engine with afterburner combustion by water injection into air intake duct]. *Vestnik dvigatelestroenija – Journal of propulsion*, 2014, no. 2, pp. 122–129.

4. Ulitenko, Yu. A. Analiz kharakteristik turboreaktivnogo dvuhkonturnogo dvigatelya s forsazhnoi kameroy sgoraniya s vpryskom vody za vkhodnym ustroystvom [Turbojet bypass engine with after-burner with water injection after input unit performance analysis]. *Aviatsiyno-kosmichna tekhnika i tekhnolohiya – Aviation and space technique and technology*, 2019, no. 1 (153), pp. 29–38. DOI: 10.32620/akt.2019.1.03.

5. Ulitenko, Yu. O., Minenok, M. A. & Kravchenko, I. F. Analiz kharakterystyk turboreaktivnoho dvokonturnoho dvyhuna z forsazhnoyu kameroyu zhorjannya z vporskuvannyam vody na vkhodi do kompresora vysokoho tysku [Performance analysis of turbofan engine with afterburner with water injection at high-pressure compressor inlet]. *Aviacijno-kosmicna tehnik i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2022, no. 4sup1 (181), pp. 49–57. DOI: 10.32620/akt.2022.4sup1.08.

6. Alejandro, B. & Igie, U. Aero Engine Compressor Cooling bu Water Injection – Part 1: Evaporative Compressor Model. *Energy*, 2018, vol 160, pp. 1224-1235. DOI: 10.1016/j.energy.2018.05.170.

7. Shigapov, A. B., Shigapov, A. A. & Zinnatulin, M. H. Raschetnoe issledovanie vlijaniya vpryska vody v protochnuju chast kompresora gazoturbinnoj ustanovki [Computational study of the effect of water injection into the flow path of a gas turbine compressor]. *Problemy jenergetiki – Energy problems*, 2012, no. 3-4, pp. 113-118.

8. Wang, T. & Khan, J. R. Overspray and Interstage Fog Cooling in Compressor Using Stage-Stacking Scheme – Part 1: Development of Theory and Algorithm. *Proceedings of GT2008 ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea and Air*, 2008, pp. 99-109. DOI: 10.1115/GT2008-50322.

9. Bhargava, R. K., Bianchi, M., Chaker, M., Melino, F., Peretto, A. & Spina, P. R. Gas turbine compressor performance characteristics during wet compression – influence of polydisperse spray. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea and Air, GT2009-59907*, 2009, pp. 655-666. DOI: 10.1115/GT2009-59907.

10. Ilichev, Ya. T. *Termodinamicheski raschet vozdušno-reaktivnykh dvigatelei* [Thermodynamic calculation of air-jet engines]. Moscow, CIAM Publ., 1975. 126 p.

11. Shljahtenko, S. M. *Teorija vozdušno-reaktivnykh dvigatelej* [Theory of jet engines]. Moscow, Mechanical Publ., 1975. 567 p.

12. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. World Meteorological Organization. Geneva, 2008. 678 p.

Надійшла до редакції 01.05.2023, розглянута на редколегії 08.08.2023

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE PLACE OF WATER INJECTION ON THE PERFORMANCE OF TURBOFAN ENGINE WITH AFTERBURNER

Yurii Ulitenko, Maryna Minenok, Igor Kravchenko

An important direction for the development of high-speed aircraft is the expansion of the range of operation of aircraft engines as part of their power plants. Currently, the range of operation of aircraft engines in terms of altitude and flight speed is limited by the ability of construction materials to withstand the temperature of the working body. Therefore, to expand the range of operation, it is necessary to either change the construction materials or use technologies that involve cooling the working body. The water injection system in a turbofan engine with an afterburner allows cooling of the working body without significant interference with the structural profile of the engine, which significantly saves design time and development cost. In addition, water injection has long been used for a short-term increase in engine thrust, which is an additional advantage of using this system. The choice of the place of water injection into the engine tract has a great influence on its characteristics and on the ability of the high-speed aircraft to perform the assigned tasks. Therefore, the design of the engine must take place with an understanding of the intended purpose of the high-speed aircraft. This article analyzes the influence of the place of water injection on the characteristics of a turbofan engine with an afterburner. I will consider water injection at the inlet to the fan and at the inlet to the high-pressure compressor. The influence of injection site and flight conditions on water consumption is shown. Operating conditions were found in which it is impossible to use a turbofan engine with an afterburner due to restrictions not related to the temperature of the working fluid. The results of calculations regarding the influence of the water injection site on the main thermodynamic parameters and traction characteristics of the engine are given. The application of the obtained results will increase the thermodynamic efficiency and extend the operating range of two-circuit turbofan engines with afterburners using modern materials. The results of this work will also make it possible to shorten the period of development of competitive engines for high-speed aircraft through a targeted search for their rational thermodynamic and structural-geometric outline.

Keywords: high-speed aircraft; turbofan engine with afterburner; operating envelope; working fluid; water injection; fan; high-pressure compressor; engine performances; thrust; moisture content; cooling.

Улітенко Юрій Олександрович – канд. техн. наук, провідний інженер ДП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна.

Міненко Марина Андріївна – інженер-конструктор ДП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна.

Кравченко Ігор Федорович – д-р техн. наук, доц., Директор підприємства – Генеральний конструктор ДП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна.

Yurii Ulitenko – Candidate of Technical Science, Lead Engineer, SE “Ivchenko-Progress”, Zaporizhzhia, Ukraine,

e-mail: y.ulitenko@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7540-2264.

Maryna Minenok – Designer, SE “Ivchenko-Progress”, Zaporizhzhia, Ukraine,

e-mail: m.a.minenok@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6329-3005.

Igor Kravchenko – Doctor of Technical Science, Director-Designer General, SE “Ivchenko-Progress”, Zaporizhzhia, Ukraine,

e-mail: kravchenko@ivchenko-progress.com, ORCID: 0000-0002-0381-8372.