

Т. П. МИХАЙЛЕНКО, О. В. ГОРІДЬКО, І. І. ПЕТУХОВ

Національний аерокосмічний університет

«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПОВІТРЯ НА ФУНКЦІОНУВАННЯ МАСЛОСИСТЕМИ
АВІАЦІЙНОГО ДВИГУНА

Особливість роботи масляної системи авіаційного газотурбінного двигуна (ГТД) полягає в тому, що майже в кожному її елементі циркулює не чиста олива, а її суміш із повітрям. Наявність повітря в оливі істотно впливає на перебіг теплогідролічних процесів у масляній системі та призводить до погіршення її характеристик. Розчинене і вільне повітря здатне суттєво змінювати фізико-хімічні властивості робочого середовища. Це, зокрема, проявляється у зниженні ефективності теплообміну, зміні в'язкості, погіршенні мастильних властивостей, а також може спричиняти кавітацію в насосах, нестабільну роботу підшипників і навіть локальне термічне руйнування оливи. Відтак, ігнорування газомістості оливи під час проектування маслосистеми може негативно вплинути на її працездатність. Тому **предметом** вивчення в статті є процеси взаємодії повітря з оливою в маслосистемі авіаційного ГТД, а також їх вплив на теплогідролічні характеристики, ефективність та надійність роботи системи. **Мета** цієї статті полягає в тому, щоб показати відмінності перебігу теплогідролічних процесів у двофазних середовищах від однофазних та зацентрувати на важливості їх врахування при проектуванні маслосистеми. **Завдання** роботи є встановлення характеру та ступеню впливу наявності повітря в оливі на функціонування маслосистеми авіаційного газотурбінного двигуна шляхом аналізу теплогідролічних процесів. Основні **результати** наступні. У роботі розглянуто особливості перебігу теплогідролічних процесів оливо-повітряної суміші в маслосистемі. Представлено результати розрахунку впливу тиску та температури на розчинність повітря в оливі. На основі гомогенної моделі механіки багатofазних середовищ проаналізовано вплив газомістості потоку на ефективність роботи маслорадіатора. **Наукова новизна** отриманих результатів полягає в установленні кількісного впливу газомістості потоку на теплові та гідравлічні процеси в масляній системі авіаційного газотурбінного двигуна. Вперше показано, що при зростанні газомістості до рівня близько 70 % теплова потужність маслорадіатора зменшується приблизно на 20 %, тоді як гідравлічні втрати зростають більш ніж у два рази, що призводить до погіршення ефективності охолодження оливи, а також зниження надійності та працездатності системи в цілому. Як **висновок**, можна стверджувати, що для підвищення ефективності маслосистеми надто важливо встановити та врахувати при проектуванні маслосистеми закономірності перебігу теплогідролічних процесів з урахуванням особливостей двофазної течії оливо-повітряної суміші.

Ключові слова: маслосистема; газотурбінний двигун; двофазний потік; теплогідролічні процеси; розчинність; газоміст.

1. Вступ

Масляна система безпосередньо впливає на ефективність, надійність і довговічність роботи авіаційного газотурбінного двигуна (ГТД) [1]. Олива забезпечує зменшення тертя у дотичних рухомих елементах підшипників та зубчастих передач, що є критично важливим для зменшення зносу та продовження ресурсу двигуна. Окрім змащення, олива виконує також функцію теплоносія, що допомагає уникнути перегріву вузлів тертя, сприяє видаленню механічних домішок, продуктів зносу та окиснення. Крім того, олива частково амортизує коливання і вібрації, забезпечуючи стабільну роботу ротора. Аналіз тиску, температури, витрати та складу оливи дає змогу оцінити

технічний стан двигуна і виявити ознаки несправностей. Для функціонування масляної системи необхідна енергія для приводу насосів, які забезпечують подачу оливи до вузлів тертя та її відкачування. Ця енергія, як правило, відбирається від двигуна, і залежить від обраної елементної бази та процесів, що відбуваються в масляній системі.

Удосконалення авіаційних ГТД супроводжується ускладненням їх конструкцій, головним чином через необхідність відповідати підвищеним вимогам до ефективності використання пального та екологічних стандартів [2]. Це зумовлює підвищення ступеня стиснення, температури газу на вході в турбіну, частоти обертання роторів та інших експлуатаційних параметрів, що супроводжується також зменшенням



габаритів і маси двигуна. У результаті зростає теплове навантаження на конструктивні елементи двигуна. Тому на етапі проектування маслосистеми надзвичайно важливо розуміти й надійно прогнозувати процеси, що відбуваються в системі.

Особливість роботи масляної системи авіаційного ГТД полягає в тому, що майже в кожному елементі системи циркулює не чиста олива, а її суміш із повітрям [3]. Так, у нагнітальному контурі повітря перебуває в розчиненому стані. При цьому кількість розчиненого повітря залежить від температури, тиску, хімічного складу оливи, ступеня дегазації в маслобаку та режиму роботи двигуна [4]. У масляну порожнину опори повітря потрапляє внаслідок її наддування, що здійснюється з метою запобігання проникненню оливи в газовий тракт двигуна. Унаслідок цього у відкачувальному контурі маслосистеми тече оливо-повітряна суміш, газоміст якої істотно залежить від режиму роботи двигуна. Масляна система може містити у своєму складі повітровідокремлювач для зменшення газомісту оливи перед її охолодженням та надходженням у маслобак. Проте навіть за ідеального процесу відокремлення, в оливі все одно залишається певна кількість розчиненого повітря.

Наявність повітря в оливі істотно впливає на перебіг теплогідролічних процесів у масляній системі та призводить до погіршення її характеристик зі збільшенням висоти польоту [5]. Відтак, ігнорування наявності повітря під час проектування маслосистеми може негативно вплинути на її працездатність.

1.1. Мотивація і сучасний стан

Ключовими елементами маслосистеми авіаційного газотурбінного двигуна є опори ротора, рис. 1. Вони забезпечують передавання зусиль від обертових роторів до корпусів [6]. За конструкцією опори можуть містити роликіві або кулькові радіально-упорні підшипники.

Під час роботи двигуна елементи опор зазнають нагрівання як внаслідок внутрішнього тепловиділення в підшипниках, так і під впливом зовнішніх теплових потоків [1]. Для забезпечення їхньої працездатності протягом заданого ресурсу застосовуються охолодження та змащення оливою, яка подається до масляної порожнини опори (камери підшипника).

З метою запобігання витокам оливи через ущільнення навколо камери підшипника формується передмасляна порожнина, де створюється підвищений тиск за рахунок наддуву повітрям, яке відбирається від компресора ГТД [7]. У результаті цього повітря потрапляє в масляну порожнину опори й змішується з оливою, утворюючи оливо-повітряну суміш, рис. 2.

Інтенсивне перемішування оливи з повітрям у зоні підшипників за певних умов може призводити до утворення пінної структури. Серед чинників, що сприяють цьому процесу, варто відзначити високу турбулентність потоку, наявність у складі оливи поверхнево-активних речовин, підвищену температуру, що знижує в'язкість і поверхневий натяг, а також недостатню ефективність видалення повітря з мастильної суміші.

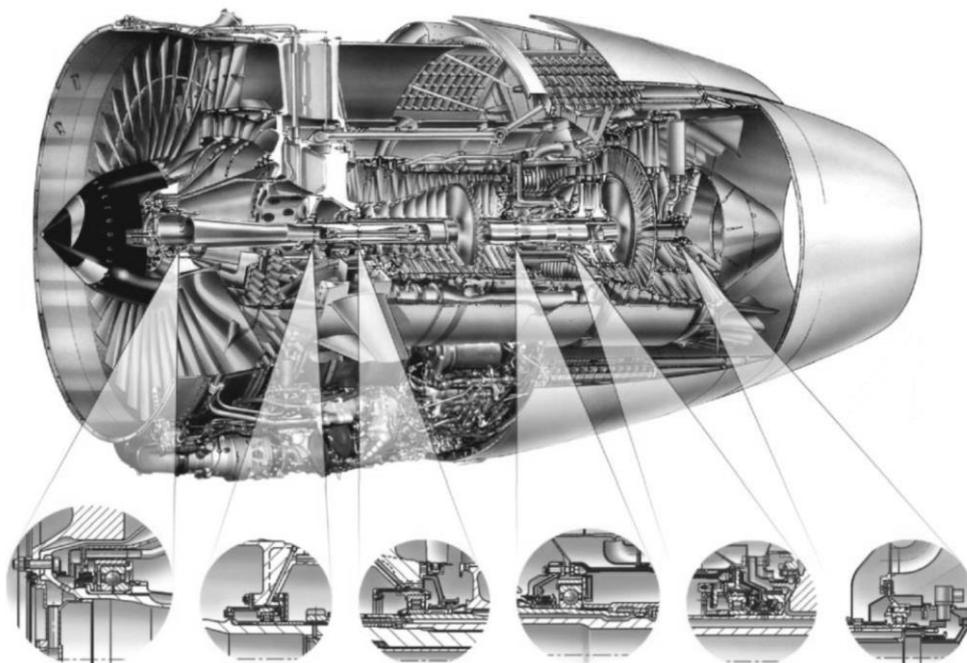


Рис. 1. Схема розташування опор в ГТД [6]

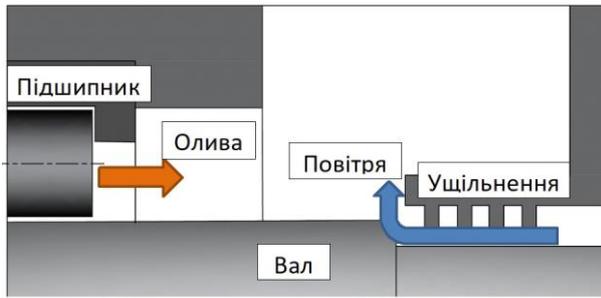


Рис. 2. Схема потоків у масляній порожнині опори

Утворення пінної структури призводить до зниження в'язкості, змін теплофізичних характеристик потоку та зростання ризику кавітації в насосних вузлах [8]. Відтак під час проектування маслосистеми ці чинники слід враховувати та передбачати відповідні заходи для запобігання піноутворенню.

У масляній системі повітря завжди присутнє в оливі також у розчиненому стані. Розчинність повітря в значній мірі визначається тиском і температурою. Наприклад, на рис. 3 наведено залежність розчинності кисню у воді від цих параметрів.

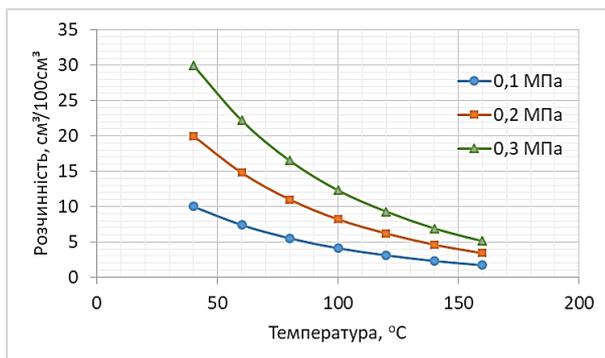


Рис. 3. Розчинність кисню у воді

Зі зростанням температури оливи розчинність повітря зменшується [9]. Це пояснюється зниженням розчинності газів у рідинах при нагріванні відповідно до закону Генрі [10, 11]

$$C = k_H p_i, \quad (1)$$

де C – рівноважна концентрація газу в рідині; k_H – константа розчинності Генрі (залежить від температури та типу рідини); p_i – парціальний тиск газу над рідиною.

Згідно із законом Генрі (1), розчинність газу в рідині прямо пропорційна його парціальному тиску над рідиною. Це означає, що чим вищий тиск, тим більша кількість повітря може бути розчинена в оливі.

У разі різкого падіння тиску в окремих ділянках системи може відбуватися виділення раніше розчиненого повітря у вигляді бульбашок. Так само при

підвищенні температури надлишкове повітря виходить із розчину, утворюючи газові бульбашки. Це явище особливо небезпечне в масляних системах авіаційних двигунів, оскільки може призводити до порушення стабільності роботи підшипників, кавітації в насосах та інтенсифікації аерації.

Підходи, викладені у [12, 13], нині є основою для проектування маслосистем авіаційних газотурбінних двигунів. Вони виходять із припущення, що в маслосистемі циркулює лише олива, та базуються на класичних співвідношеннях для теплогідрравлічного розрахунку систем з однофазним теплоносієм.

1.2. Постановка задачі дослідження

Розчинене і вільне повітря здатне суттєво змінювати фізико-хімічні властивості робочого середовища. Це, зокрема, проявляється у зниженні ефективності теплообміну [14], зміні в'язкості, погіршенні мастильних властивостей, а також може спричинити кавітацію в насосах, нестабільну роботу підшипників і навіть локальне термічне руйнування оливи внаслідок мікродизелінгу [15]. Саме тому з метою подальшого удосконалення підходів до проектування у цій роботі ставиться завдання встановити характер і ступінь впливу наявності повітря в оливі на функціонування маслосистеми авіаційного двигуна шляхом аналізу теплогідрравлічних процесів.

2. Склад та робочий процес масляної системи ГТД

Тип і схема масляної системи залежать від призначення та конструкції газотурбінного двигуна [12, 13]. На рисунку 4 показано спрощену схему циркуляційної масляної системи [3].

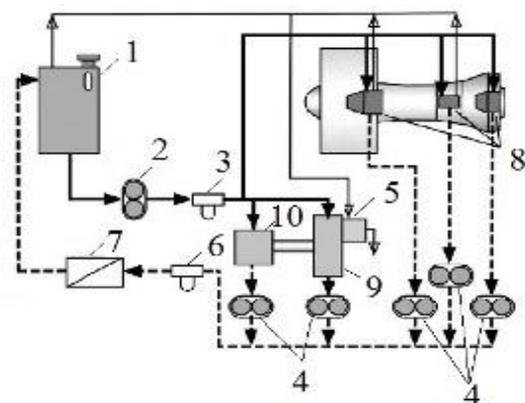


Рис. 4. Схема циркуляційної масляної системи ГТД:

- 1 – масляний бак; 2 – нагнітальний насос;
- 3, 6 – фільтри; 4 – блок відкачувальних насосів;
- 5 – суфлер; 7 – маслорадіатор; 8 – опори двигуна;
- 9 – коробка приводів; 10 – роздавальна коробка

У такій системі (рис. 4) олива після відкачування з масляних порожнин опор двигуна проходить очищення від механічних домішок, видалення повітря та охолодження, а потім знову подається до двигуна. Система складається з двох основних магістралей: нагнітальної та відкачувальної. Крім того, вона з'єднана із системою суфлювання, яка відводить повітря з масляних порожнин і забезпечує стабільну роботу системи.

Нагнітальна магістраль подає оливу з масляного бака до місць змащення під тиском 0,25...0,5 МПа та за температури 60...100 °С. До її складу входять нагнітальний насос із редуційним клапаном, фільтр тонкого очищення, запірний клапан, що запобігає перетіканню оливи з бака в непрацюючий двигун, масляні форсунки, а також датчики-показники температури та тиску оливи на вході в двигун.

Відкачувальна магістраль відводить суміш оливи й повітря, що потрапляє до масляної порожнини через наддув ущільнень, із маслосбірників двигуна. При цьому температура й тиск суміші на вході до відкачувального насоса можуть сягати 200 °С та 0,09 МПа відповідно. Відкачувальна магістраль містить фільтрувальні та піногасні сітки, датчики-показники температури й тиску оливи на виході з двигуна, сигналізатори наявності стружки в оливі, відкачувальні насоси, повітровідділювач, фільтр грубого очищення, паливно-масляний або повітряно-масляний радіатор.

Суфлювальна магістраль забезпечує зв'язок усіх масляних порожнин з атмосферою та підтримання в них тиску, необхідного для нормальної роботи контактних і витратних ущільнень. Система містить трубопроводи та відцентровий суфлер, призначений для відведення газів із масляних порожнин двигуна в атмосферу, відокремлення часток оливи та підтримання заданого надлишкового тиску в суфлювальних порожнинах.

Структура двофазного потоку оливи та повітря змінюється по всьому контуру маслосистеми. У відкачувальній магістралі з об'ємним газовмістом потоку від 0,7 до 0,1 можливі пінний, розшарований, снарядний або бульбашковий режими течії, рис. 5. У нагнітальному контурі – бульбашковий режим течії. У суфлюючій магістралі потік має, як правило, дисперсну або дисперсно-кільцеву структуру з вмістом газу, близьким до одиниці.

Відмінність течії багатофазного потоку у горизонтальних і слабко нахилених до горизонту каналах від течії у вертикальних каналах, що показано на рис. 5, полягає в несиметрії дії гравітаційних сил відносно вісі каналу. Це зумовлює зміщення парової фази до верхньої утворюючої, а рідинної – до нижньої у бульбашковому, снарядному, емульсійному та дисперсно-кільцевому режимах течії, а також

приводить до виникнення розшарованої та розшаровано-хвильової течії.

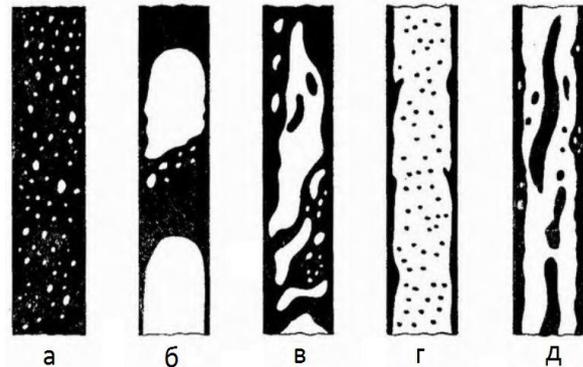


Рис. 5. Режими течії двофазних середовищ у вертикальному висхідному потоці [16]:

- а – бульбашкова течія;
б – снарядна або пробкова течія;
в – спінена течія; г – дисперсно-кільцева течія;
д – клаптувато-кільцева течія

3. Результати та їх обговорення

3.1. Вплив газовмісту потоку на ефективність охолодження оливи

Об'ємна доля повітря (газовміст) та теплофізичні властивості фаз суттєво впливають на тепловіддачу й перепад тиску в масляній системі авіаційного ГТД. З огляду на це далі розглядаються теплогідравлічні процеси, що відбуваються в повітряно-масляному радіаторі стільникового типу (рис. 6).

Як правило, маслорадіатор розташовують у відкачувальній магістралі, де двофазний потік оливо-повітряної суміші характеризується значним газовмістом. Для зменшення газовмісту в деяких маслосистемах ГТД перед маслорадіатором встановлюють повітровідділювач. Однак, незважаючи на це, на вхід до радіатора все ж надходить оливо-повітряна суміш, а не однофазна олива, як зазвичай припускається під час його проектування. При цьому газовміст залежить від ефективності відділення повітря в повітровідділювачі, що необхідно враховувати при проектуванні.

Теплообмінний елемент радіатора (рис. 6) являє собою набір круглих трубок, що розвальцьовані у вигляді шестигранника з обох торців і спаяних у стільникову решітку. Зазори між трубками слугують проходами для оливи. Охолоджувальне повітря протікає всередині трубок. Олива, пройшовши весь міжтрубний простір, надходить до колектора і далі – в патрубок 2 для виходу з теплообмінника. Щоб уникнути значного гідравлічного опору, максимально допустима швидкість протікання оливи становить 0,35...0,45 м/с.

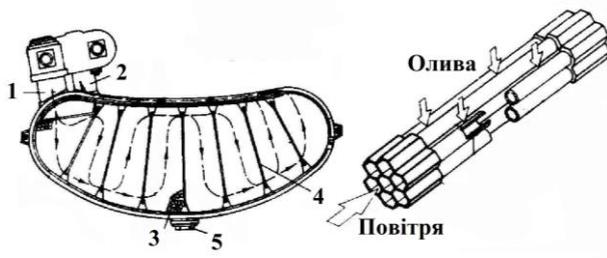


Рис. 6. Схема повітряно-масляного радіатора [13]:
 1 – патрубок входу оливи;
 2 – патрубок виходу оливи;
 3- теплообмінна секція; 4 – перегородка;
 5 – зливна пробка

Для аналізу теплогідралічних процесів, що відбуваються у радіаторі, використовується гомогенна модель багатофазного потоку [16, 17], у якій потік оливи та повітря розглядається як єдине умовно однорідне середовище з усередненими властивостями. У гомогенній моделі вважається, що всі фази рухаються з однаковою швидкістю (відсутнє ковзання між фазами), мають однаковий тиск і температуру в кожному перерізі потоку та рівномірно розподілені в об'ємі каналу. Теплофізичні властивості потоку визначаються як середньозважені за об'ємними частками фаз. Зокрема, густина оливо-повітряної суміші визначається за формулою

$$\rho_m = \varphi \rho_g + (1 - \varphi) \rho_l, \quad (2)$$

де ρ_m, ρ_g, ρ_l – густина оливо-повітряної суміші, повітря та оливи відповідно; φ – об'ємний газоміст.

Теплоємність оливо-повітряної суміші визначається як

$$c_{pm} = \frac{\varphi \rho_g c_{pg} + (1 - \varphi) \rho_l c_{pl}}{\rho_m}, \quad (3)$$

де c_{pm}, c_{pg}, c_{pl} – теплоємність оливо-повітряної суміші, повітря та оливи відповідно.

Коефіцієнти теплопровідності та динамічної в'язкості оливо-повітряної суміші визначаються за співвідношеннями

$$\lambda_m = \varphi \lambda_g + (1 - \varphi) \lambda_l, \quad (4)$$

$$\mu_m = \varphi \mu_g + (1 - \varphi) \mu_l, \quad (5)$$

де $\lambda_m, \lambda_g, \lambda_l$ – коефіцієнт теплопровідності оливо-повітряної суміші, повітря та оливи відповідно; μ_m, μ_g, μ_l – коефіцієнт динамічної в'язкості оливо-повітряної суміші, повітря та оливи відповідно.

Згідно з положеннями гомогенної моделі багатофазного потоку для визначення режиму течії та, відповідно, коефіцієнта тепловіддачі оливо-повітряної суміші використовуються критерії подібності та критеріальні рівняння, подібні до тих, що застосовуються для однофазних середовищ. Таким чином, число Рейнольдса розраховується за співвідношенням

$$Re_m = \frac{\rho_m u_m D_h}{\mu_m}, \quad (6)$$

де D_h – характерний розмір (гідралічний діаметр каналу); u_m – середня швидкість оливо-повітряної суміші, що визначається як

$$u_m = \frac{\dot{V}_g + \dot{V}_l}{A}, \quad (7)$$

де \dot{V}_g, \dot{V}_l – об'ємна витрата повітря та оливи відповідно; A – площа поперечного перерізу каналу.

Число Прандтля розраховується за співвідношенням

$$Pr_m = \frac{\mu_m c_{pm}}{\lambda_m}, \quad (8)$$

У такому разі коефіцієнт тепловіддачі оливо-повітряної суміші визначається відповідно до режиму течії за критеріальною залежністю виду

$$Nu_m = \frac{\alpha_m D_h}{\lambda_m} = C Re_m^n Pr_m^k, \quad (9)$$

де α_m – коефіцієнт тепловіддачі оливо-повітряної суміші; C, n, k – емпіричні коефіцієнти.

Перепад тиску згідно з положеннями гомогенної моделі також визначається за рівняннями (10) – (14), подібними до тих, що застосовуються для однофазних середовищ

$$\Delta p = \Sigma \Delta p_f + \Sigma \Delta p_{loc} + \Sigma \Delta p_{acc} + \Sigma \Delta p_{grav}, \quad (10)$$

де $\Delta p_f, \Delta p_{loc}, \Delta p_{acc}, \Delta p_{grav}$ – втрати тиску на тертя, місцеві опори, прискорення потоку та гравітацію відповідно.

Складові втрати тиску, що входять до рівняння (10), розраховуються як

$$\Delta p_f = \xi \frac{L}{D_h} \frac{\rho_m u_m^2}{2}, \quad (11)$$

$$\Delta p_{loc} = \zeta \frac{\rho_m u_m^2}{2}, \quad (12)$$

$$\Delta p_{\text{acc}} = \frac{\dot{G}_m^2}{A^2} \left(\frac{1}{\rho_{m \text{ out}}} - \frac{1}{\rho_{m \text{ in}}} \right), \quad (13)$$

$$\Delta p_{\text{grav}} = \rho_m g L \sin \theta, \quad (14)$$

де ξ , ζ – коефіцієнти тертя та місцевого опору відповідно; L , θ – довжина та кут нахилу каналу до горизонту; \dot{G}_m – масова витрата оливо-повітряної суміші; $\rho_{m \text{ in}}$, $\rho_{m \text{ out}}$ – густина оливо-повітряної суміші на вході та виході з каналу відповідно; g – прискорення вільного падіння.

З метою аналізу впливу газівмісту на ефективність охолодження оливи було проведено теплові й гідравлічні розрахунки повітряно-масляного радіатора заданої конструкції. Було враховано обмеження щодо максимально допустимої швидкості протікання оливи в каналах радіатора.

На рис. 7 та 8 наведено залежність теплової потужності повітряно-масляного радіатора Q та перепаду тиску в масляному тракті радіатора Δp від газівмісту оливо-повітряного потоку. Для порівняння з випадком теплообміну чистої оливи використані відношення Q/Q_0 та $\Delta p/\Delta p_0$, де Q_0 та Δp_0 – теплова потужність і перепад тиску в масляному тракті радіатора при охолодженні чистої оливи відповідно.

З рисунків 7 та 8 видно, що в повітряно-масляному радіаторі газівміст сильніше впливає на гідравлічні процеси, ніж на теплові. При збільшенні газівмісту до 0,7 перепад тиску в масляному тракті радіатора зростає майже у 2,2 рази, тоді як теплова потужність радіатора зменшується приблизно на 5%. Також спостерігається, що збільшення газівмісту до 0,1 майже не впливає на величину перепаду тиску в масляному тракті радіатора.

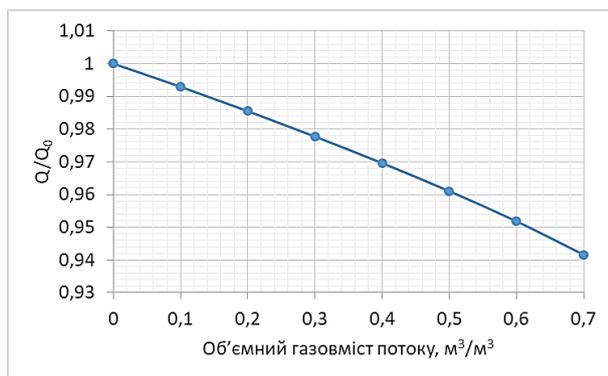


Рис. 7. Теплова потужність повітряно-масляного радіатора

Незначна зміна теплової потужності (рис. 7) пов'язана з тим, що основний вплив на теплопередачу чинить термічний опір з боку охолоджувального повітря, який залишається незмінним при зміні газівмісту оливо-повітряного потоку.

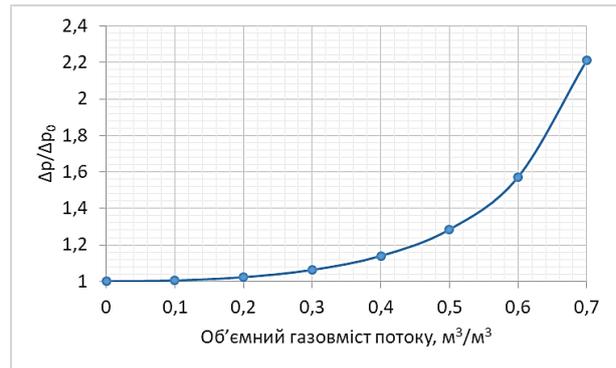


Рис. 8. Перепад тиску в масляному тракті повітряно-масляного радіатора

На рис. 9 наведено залежність коефіцієнтів тепловіддачі з боку оливо-повітряної суміші α_1 , охолоджувального повітря α_2 та коефіцієнту теплопередачі k від газівмісту. Зазначені коефіцієнти віднесені до відповідних значень α_{10} , α_{20} , k_0 , коли охолоджується чиста олива.

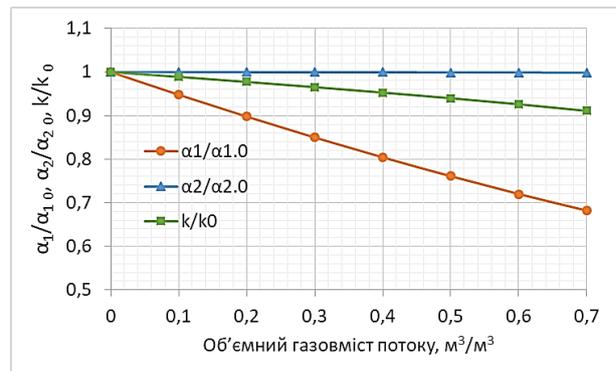


Рис. 9. Теплообмінні коефіцієнти повітряно-масляного радіатора

На рис. 10 та 11 наведено залежність відносних значень коефіцієнтів тепловіддачі оливо-повітряної суміші α_1/α_{10} , палива α_2/α_{20} , коефіцієнту теплопередачі k/k_0 та теплової потужності паливно-масляного радіатора Q/Q_0 від газівмісту потоку.

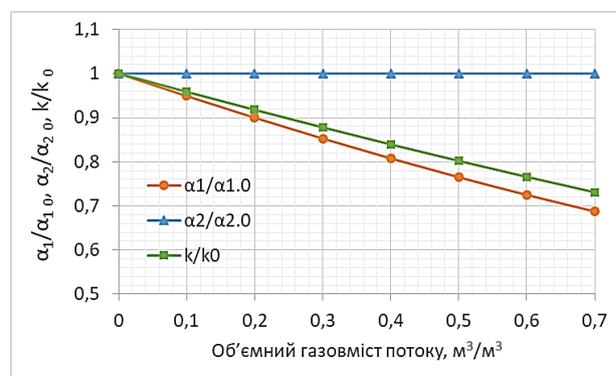


Рис. 10. Теплообмінні коефіцієнти паливно-масляного радіатора

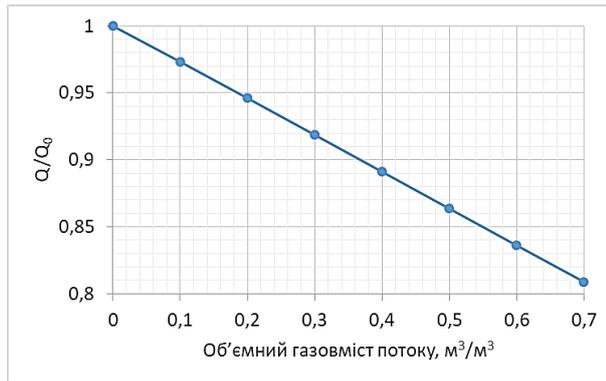


Рис. 11. Теплова потужність паливно-масляного радіатора

У випадку, коли термічний опір тепловіддачі охолоджувального середовища є меншим порівняно з термічним опором оливо-повітряної суміші, як, наприклад, у паливно-масляних радіаторах, де олива охолоджується паливом, основний вплив на теплопередачу чинить термічний опір з боку оливи (рис. 10). Тоді при збільшенні газомісту до 0,7 теплова потужність радіатора зменшується майже на 20%, що показано на рис. 11.

3.2. Виникнення критичної течії оливо-повітряного потоку

Крім зазначеного вище, у деяких випадках може виникати критичний режим течії оливо-повітряного потоку, що, у свою чергу, призводить до нерозрахованої роботи радіатора та масляної системи в цілому.

Критичний режим течії оливо-повітряної суміші настає за умов, коли подальше збільшення перепаду тиску не призводить до зростання масової витрати. Фізично це пов'язано з тим, що швидкість потоку досягає швидкості поширення пружних збурень (рівноважної швидкості звуку) в двофазному середовищі. У цьому стані інформація про зміну вихідного тиску не передається вгору за течією, і витрата визначається лише вхідними параметрами потоку та його фазовою структурою. Для оливо-повітряних сумішей рівноважна швидкість звуку є значно меншою, ніж у чистій рідині, і залежить від об'ємного газомісту оливо-повітряного потоку та тиску. Це зумовлює можливість досягнення критичного режиму при відносно невеликих швидкостях течії та супроводжується різким зростанням гідравлічних втрат, інтенсифікацією фазової взаємодії та можливою перебудовою режиму течії двофазного потоку.

Для розрахунку рівноважної швидкості звуку a_m гомогенного оливо-повітряного потоку можна використати формулу [18]

$$a_m = \sqrt{\frac{1}{\rho_m \left(\frac{\varphi}{\rho_g a_g^2} + \frac{1-\varphi}{\rho_l a_l^2} \right)}}, \quad (15)$$

де a_g, a_l – швидкості звуку в повітрі та в оливі відповідно.

На рис. 12 наведено вплив істинного об'ємного газомісту та тиску на рівноважну швидкість звуку в суміші авіаційної оливи ЕТО 2380 з повітрям.

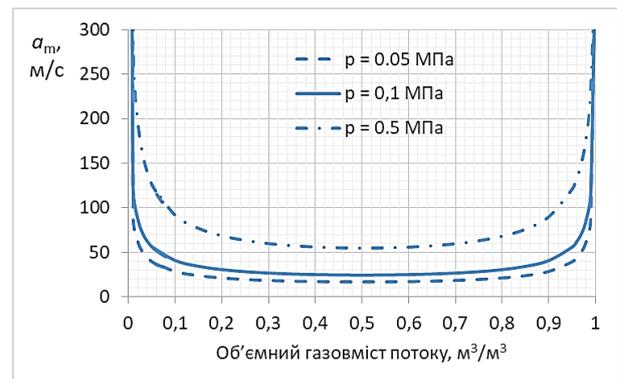


Рис. 12. Швидкість звуку в суміші оливи ЕТО 2380 з повітрям

З рисунка 12 видно, що швидкість звуку в суміші оливи ЕТО 2380 з повітрям за параметрів, характерних для робочого процесу масляної системи авіаційного газотурбінного двигуна, може становити 15–50 м/с. Це особливо важливо враховувати під час проектування масляної системи при визначенні поперечних перерізів каналів маслорадіаторів, елементів відкачувальної магістралі та виборі продуктивності відкачувальних насосів.

Висновки

У масляній системі авіаційного ГТД повітря завжди присутнє в оливі як у розчиненому, так і у вільному стані, що істотно впливає на функціонування системи. Кількість розчиненого повітря значною мірою визначається тиском, температурою та хімічним складом оливи. Водночас кількість вільного повітря залежить від особливостей конструкції системи, умов робочого процесу в масляній порожнині опори та ефективності відокремлення повітря.

У разі різкого зниження тиску в окремих ділянках масляної системи або при підвищенні температури потоку відбувається виділення розчиненого повітря у вигляді газових бульбашок. Таке явище може призводити до порушення стабільності роботи підшипників, виникнення кавітації в насосах та збільшення газомісту потоку, що негативно впливає на ефективність і надійність роботи системи.

Збільшення газомісту негативно впливає на теплові та гідравлічні процеси в системі. При досягненні газомісту на рівні 70 % теплова потужність радіатора для охолодження оливи може зменшитися на 20 %, а гідравлічні втрати – збільшитися більш ніж у два рази.

За певних умов у оливо-повітряному потоці може виникати критичний режим течії, зумовлений низьким значенням рівноважної швидкості звуку двофазного потоку. Швидкість звуку у двофазній суміші залежить від теплофізичних властивостей фаз, газомісту, тиску та температури. Для розглянутого випадку, при температурі суміші оливи ЕТО 2380 з повітрям 90 °С, швидкість звуку становила 15–50 м/с за параметрів, характерних для робочого режиму масляної системи. Це треба враховувати при визначенні поперечних перерізів каналів маслорадіаторів, елементів відкачувальної магістралі та підборі продуктивності відкачувальних насосів.

Для підвищення ефективності масляної системи надзвичайно важливо при її проектуванні враховувати закономірності перебігу теплогідравлічних процесів з урахуванням особливостей двофазної течії оливо-повітряної суміші. Слід зазначити, що розглянута гомогенна модель багатофазного потоку досить спрощено відображає особливості реального перебігу теплогідравлічних процесів у масляній системі. Тому темою подальших досліджень стане удосконалення моделі робочого процесу масляної системи на основі застосування методів механіки багатофазних середовищ та планування експерименту.

Внесок авторів: формулювання мети і постановки задачі досліджень – **Т. П. Михайленко**; огляд та аналіз інформаційних джерел – **О. В. Горідько, Т. П. Михайленко**; розроблення концептуальних положень – **І. І. Петухов, Т. П. Михайленко**; аналіз робочого процесу масляної системи – **О. В. Горідько, Т. П. Михайленко**; розроблення методології дослідження – **Т. П. Михайленко, О. В. Горідько, І. І. Петухов**; підготовка розрахункової методики та аналіз результатів – **О. В. Горідько, Т. П. Михайленко**; формулювання висновків – **Т. П. Михайленко, О. В. Горідько**.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

Використання засобів штучного інтелекту

Для перевірки граматики, орфографії та пунктуації текстові матеріали були опрацьовані за допомогою чат-бота на базі штучного інтелекту (GPT-5 mini). Ідея, концепція, методологія, результати та наукові висновки залишаються авторськими.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Дуаїссіа, Омар Хадж Аїсса. К вопросу моделирования тепловых процессов в масляных полостях опор ротора ГТД [Текст] / Омар Хадж Аїсса Дуаїссіа, Т. П. Михайленко, & И. И. Петухов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2016. – № 1 (128). – С. 53–57.
2. Jafari, S. Thermal management systems for civil aircraft engines: Review, challenges and exploring the future [Text] / S. Jafari, & T. Nikolaidis // *Applied Sciences*. – 2018. – Vol. 8, No. 11. – P. 1–16. DOI: 10.3390/app8112044.
3. Особенности моделирования теплогідравлических процессов в маслосистеме ГТД [Текст] / Т. П. Михайленко, И. И. Петухов, Омар Хадж Аїсса Дуаїссіа, & Д. А. Немченко // *Вестник двигателестроения*. – 2016. – № 2. – С. 160–165.
4. Engine Lubrication Oil Aeration [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://studylib.net/doc/10684343/engine--lubrication--oil-aeration> (дата звернення: 2.01.2026). – Назва з екрана.
5. Giffen, E. The effect of aeration of the oil on the behaviour of an engine lubricating system under high altitude conditions [Text] / E. Giffen, H. R. Mills // *The Aeronautical Journal*. – 1949. – Vol. 53, No. 490. – P. 271–281.
6. Иноземцев, А. А. Автоматика и регулирование авиационных двигателей и энергетических установок. Системы [Текст] : в 5 т. Т. 5. Газотурбинные двигатели / А. А. Иноземцев, М. А. Нихамкин, & В. Л. Сандрацкий. – М. : Машиностроение, 2008. – 200 с.
7. Denton, T. Internal air and lubrication systems [Text] / T. Denton // *Encyclopedia of Aerospace Engineering* / eds. R. Blockley, W. Shyy. – Chichester : Wiley, 2010. – Vol. 4. – P. 2407–2424.
8. Ways Aerated Oil Wrecks Machines [Електронний ресурс] // *Machinery Lubrication*. – Режим доступу: <https://www.machinerylubrication.com/Read/29663/aerated-oil-damage> (дата звернення: 2.01.2026). – Назва з екрана.

9. Research on the phase behavior of multicomponent thermal-fluid-heavy oil systems / X. Dou, M. Liu, X. Zhao [et al.] // *Processes*. – 2024. – Vol. 12, No. 9. – Art. no. 2047. DOI: 10.3390/pr12092047.

10. Henry, W. *Experiments on the Quantity of Gases Absorbed by Water, at Different Temperatures, and under Different Pressures* [Text] / W. Henry // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. – 1803. – Vol. 93. – P. 29–274. DOI: 10.1098/rstl.1803.0004.

11. Kühne, R. Prediction of the temperature dependency of Henry's law constant from chemical structure [Text] / R. Kühne, R.-U. Ebert, & G. Schüürmann // *Environmental Science & Technology*. – 2005. – Vol. 39, No. 17. – P. 6705–6711. DOI: 10.1021/es050527h.

12. Домотенко, Н. Т. *Масляные системы газотурбинных двигателей* [Текст] / Н. Т. Домотенко, & А. С. Кравец. – М. : Транспорт, 1972. – 96 с.

13. Бич, М. М. *Смазка авиационных газотурбинных двигателей* [Текст] / М. М. Бич, Е. В. Вейнберг, & Д. Н. Сурнов. – М. : Машиностроение, 1979. – 176 с.

14. Михайленко, Т. П. *Особенности теплогидравлических процессов в маслорадиаторе авиационного газотурбинного двигателя* [Текст] / Т. П. Михайленко, О. В. Горідько, & І. І. Петухов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2023. – № 5. – С. 50–56. DOI: 10.32620/akt.2023.5.03.

15. *Microdieseling and its effects on oil* [Электронный ресурс] / J. Wright // *Machinery Lubrication*. – 2014. – Режим доступа: <https://www.machinerylubricationindia.com/magazine/2014/jul-aug/microdieseling-and-its-effects-on-oil> (дата звернення: 2.01.2026). – Назва з екрана.

16. Баттерворс, Д. *Теплопередача в двухфазном потоке* [Текст] : пер. с англ. / Д. Баттерворс ; под ред. Д. А. Лабунцова. – М. : Энергия, 1980. – 328 с.

17. Лабунцов, Д. А. *Механика двухфазных систем* [Текст] / Д. А. Лабунцов, & В. В. Ягов. – М. : Изд-во МЭИ, 2000. – 374 с.

18. Нигматулин, Р. И. *Динамика многофазных сред. Ч. 1* / Р. И. Нигматулин. – М. : Наука, 1987. – 464 с.

References

1. Duaissia, Omar Hadzh Aissa, Mykhailenko, T. P. & Petukhov, I. I. *K voprosu modelirovaniya teplovykh processov v maslyanykh polostyakh opor rotora GTD* [On the issue of modeling thermal processes in the oil cavities of gas turbine engine rotor supports]. *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2016, no. 1(128), pp. 53-57. (in Russian).

2. Jafari, S., & Nikolaidis, T. Thermal management systems for civil aircraft engines: Review, challenges and exploring the future. *Applied Sciences*, 2018, vol. 8, no. 11, pp. 1-16. DOI: 10.3390/app8112044

3. Mykhailenko, T. P., Petukhov, I. I., Omar Hajj Aissa Duaissia & Nemchenko, D. A. *Osobennosti modelirovaniya teplogidravlicheskih processov v maslosisteme GTD* [Features of modeling thermal-hydraulic processes in the GTE oil system]. *Vestnik dvigatelestroeniya – Engine Building Bulletin*, 2016, no. 2, pp. 160-165. (in Russian).

4. Engine Lubrication Oil Aeration. Available at: <https://studylib.net/doc/10684343/engine-lubrication-oil-aeration> (accessed 2.01.2026).

5. Giffen, E., & Mills, H. R. The effect of aeration of the oil on the behaviour of an engine lubricating system under high altitude conditions. *The Aeronautical Journal*, 1949, vol. 53, no. 490, pp. 271–281.

6. Inozemcev, A. A., Nihamkin, M. A., & Sandrackij, V. L. *Avtomatika i regulirovanie aviacionnyh dvigatelej I energeticheskikh ustanovok. Sistemy* [Automation and regulation of aircraft engines and power plants. Systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. 200 p. (in Russian).

7. Denton, T. Internal Air and Lubrication Systems. *Encyclopedia of Aerospace Engineering*. Chichester, Wiley, 2010, vol. 4. pp. 2407–2424.

8. *Ways Aerated Oil Wrecks Machines*. Machinery Lubrication. Available at: <https://www.machinerylubrication.com/Read/29663/aerated-oil-damage> – Nazva z ekrana. (accessed 2.01.2026).

9. Dou, X., Liu, M., Zhao, X., He, Y., Guo, E., Lu, J., Ma, B., & Chen, Z. Research on the Phase Behavior of Multi-Component Thermal-Fluid-Heavy Oil Systems. *Processes*, 2024, vol. 12, no. 9, article no. 2047. DOI: 10.3390/pr12092047.

10. Henry, W. *Experiments on the Quantity of Gases Absorbed by Water, at Different Temperatures, and under Different Pressures*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1803, vol. 93. pp. 29–274. DOI: 10.1098/rstl.1803.0004.

11. Kühne, R., Ebert, R.-U., Schüürmann, G. Prediction of the temperature dependency of Henry's law constant from chemical structure. *Environmental Science & Technology*, 2005, vol. 39, no. 17, pp. 6705–6711. DOI: 10.1021/es050527h.

12. Domotenko, N. T., & Kravec, A. S. *Maslyanye sistemy gazoturbinyh dvigatelej* [Oil systems of gas turbine engines]. Moscow, Transport Publ., 1972. 96 p. (in Russian).

13. Bich, M. M., Vejnberg, E. V., & Surnov, D. N. *Смазка авиационных газотурбинных двигателей* [Lubrication of aircraft gas turbine engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 176 p. (in Russian).

14. Mykhailenko, T. P., Horidko, O. V., & Petukhov, I. I. Osoblyvosti teplohidravlichnykh protsesiv u ma-sloradiatora aviatsiinoho hazoturbinnoho dvyhuna [The specific aspects of thermal and hydraulic processes in the oil cooler of an aviation gas turbine engine]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2023, no. 5, pp. 50–56. DOI: 10.32620/aktt.2023.5.03. (in Ukrainian).

15. Wright, J. *Microdieseling and Its Effects on Oil*. Machinery Lubrication, 2014. Available at: <https://www.machinerylubricationindia.com/magazine/2014/jul-aug/microdieseling-and-its-effects-on-oil> (accessed 2.01.2026).

16. Battervors, D. *Teploperedacha v dvuhfaznom potoke* [Heat transfer in two-phase flow]. Moscow, Energiya Publ., 1980. 328 p. (in Russian).

17. Labuncov, D. A., & Yagov, V. V. *Mehanika dvuhfaznyh sistem: ucheb. posobie dlya vuzov* [Mechanics of two-phase systems: textbook. manual for universities]. Moscow, Izd-vo MEI, 2000. 374 p. (in Russian).

18. Nyhmatulyn, R. Y. *Dynamyka mnohofaznykh sred. Ch. 1.* Moscow, Nauka Publ., 1987. 464 p. (in Russian).

Отримано 5.01.2026, отримано у доопрацьованому вигляді 10.01.2026

Дата ухвалення 15.01.2026, дата публікації 22.01.2026

ANALYSIS OF AIR IMPACT ON AIRCRAFT ENGINE LUBRICATION SYSTEM PERFORMANCE

Taras Mykhailenko, Oleksandr Goridko, Illia Petukhov

A distinctive feature of an aircraft gas turbine engine (GTE) oil system is that an oil-air mixture, rather than pure oil, circulates through almost all of its components. The presence of air in the oil significantly influences the thermohydraulic processes in the oil system and leads to a deterioration of its performance. Dissolved and free air can substantially alter the physicochemical properties of the working medium. This is manifested in reduced heat transfer efficiency, changes in viscosity, deterioration of lubricating properties, and may also cause cavitation in pumps, unstable bearing operation, and even local thermal degradation of the oil. Thus, neglecting the gas content of the oil in oil system design may adversely affect its operability. The **focus** of this study is on the interactions between air and oil in an aircraft GTE oil system, as well as their influence on the system's thermohydraulic characteristics, efficiency, and reliability. The **goal** of this article is to highlight the differences in thermohydraulic behaviour between two-phase and single-phase media and to emphasize the importance of considering these effects during oil system design. The **objective** of the work is to determine the nature and degree of the influence of air in the oil on the operation of the aircraft GTE oil system through analysis of thermohydraulic processes. The main **results** are as follows. The study examines the characteristics of thermohydraulic processes in the oil-air mixture within the oil system. It presents calculations of the effects of pressure and temperature on the solubility of air in oil. Using a homogeneous multiphase mechanics model, the impact of air content on the performance of the oil cooler was analyzed. The **scientific novelty** of the obtained results lies in establishing the quantitative influence of the flow gas content on the thermal and hydraulic processes in the oil system of an aircraft gas turbine engine. For the first time, it has been shown that when the gas content increases to a level of about 70%, the thermal capacity of the oil cooler decreases by approximately 20%, while hydraulic losses increase by more than two times. This leads to deterioration in oil cooling efficiency, as well as a reduction in the reliability and overall operability of the system. In **conclusion**, it can be stated that, to enhance the efficiency of the oil system, it is crucial to identify and account for the patterns of thermohydraulic processes, taking into consideration the peculiarities of two-phase oil-air flow during system design.

Keywords: oil system; gas turbine engine; two-phase flow; thermo-hydraulic processes; solubility; gas content.

Михайленко Тарас Петрович – канд. техн. наук, доц. каф. аерокосмічної теплотехніки, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Горідько Олександр Володимирович – асп. каф. аерокосмічної теплотехніки, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Петухов Ілля Іванович – канд. техн. наук, доц. каф. аерокосмічної теплотехніки, Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", Харків, Україна.

Taras Mykhailenko – Candidate of Technical Science, Associate Professor, Associate Professor at the Aerospace Thermal Engineering Dept., National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: t.mykhailenko@khai.edu, ORCID: 0000-0003-4708-673X, Scopus Author ID: 57218103709.

Oleksandr Goridko – PhD Student at the Aerospace Thermal Engineering Dept., National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: alex19gor73@gmail.com, ORCID: 0009-0001-6692-1019.

Illia Petukhov – Candidate of Technical Science, Associate Professor, Associate Professor at the Aerospace Thermal Engineering Dept., National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: ilya2950@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0645-7912, Scopus Author ID: 7004003523.