

МЕТОДИКА УРАХУВАННЯ АКУСТИЧНИХ ВТРАТ ГВИНТОВЕНТИЛЯТОРА В ЕНЕРГЕТИЧНОМУ БАЛАНСІ АВІАЦІЙНОЇ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ

Усенко В.Ю.

ДП «АНТОНОВ»

вул. Академіка Туполева 1, 02000, м. Київ
usenko@antonov.com; uvy1758@gmail.com

Досконалість газотурбінного двигуна і процесів, що в ньому протікають, залежить від рівня втрат в усіх складових елементах двигуна. Енергетичний баланс газотурбінного двигуна показує внесок кожного складника в загальний рівень втрат, що дає можливість визначити джерела втрат з метою їх зменшення. Аналіз публікацій показав, що для різних типів газотурбінних двигунів досліджені питання щодо визначення енергетичного балансу. Також на прикладі двоконтурного турбореактивного двигуна показано, що акустичні втрати енергії необхідно враховувати в енергетичному балансі. У роботі запропонована методика оцінки й урахування акустичних втрат гвинтовентилятора в енергетичному балансі авіаційної силової установки. Методика дає можливість визначити внесок акустичних втрат в загальному енергетичному балансі та оцінити зміну паливної економічності в разі впровадження заходів щодо зниження рівня шуму гвинтовентилятора. Для врахування втрат на акустичне випромінювання пропонується використати коефіцієнт втрат енергії акустичного випромінювання. Він показує, яка відносна частка потужності, що підводиться до гвинтовентилятора, переходить в акустичне випромінювання. Уточнено формулу для розрахунку питомої витрати палива з урахуванням втрат на акустичне випромінювання гвинтовентилятора. Апробація методики показала, що для двигуна типу Д-27 збільшення відстані між рядами гвинтовентилятора на 300 мм дає можливість покращити паливну економічність на крейсерському режимі його роботи на 0,95 кг за годину. Для силової установки, що складається з чотирьох двигунів (наприклад, Ан-70), економія палива протягом 200 годин польоту (середньомісячна експлуатація) становить біля 760 кг. Отримані результати планується використовувати під час проведення досліджень щодо удосконалення турбогвинтовентиляторного двигуна шляхом зменшення акустичного випромінювання гвинтовентилятора. *Ключові слова:* економічність, енергетичний баланс, втрати, акустичне випромінювання, гвинтовентилятор.

Методика учета акустических потерь винтовентилятора в энергетическом балансе авиационной силовой установки. Усенко В.Ю. Совершенство газотурбинного двигателя и процессов, которые в нем протекают, зависят от уровня потерь во всех составляющих элементах двигателя. Энергетический баланс газотурбинного двигателя показывает вклад каждой составляющей в общий уровень потерь, дает возможность определить источники потерь с целью их уменьшения. Анализ публикаций показал, что для разных типов газотурбинных двигателей исследованы вопросы определения энергетического баланса. Также на примере двухконтурного турбореактивного двигателя показано, что акустические потери энергии необходимо учитывать в энергетическом балансе. В работе предложена методика оценки и учета акустических потерь винтовентилятора в энергетическом балансе авиационной силовой установки. Методика позволяет определить вклад акустических потерь в общем энергетическом балансе и оценить изменение топливной экономичности при внедрении мероприятий с целью снижения уровня шума винтовентилятора. Для учета потерь на акустическое излучение предлагается коэффициент потерь энергии акустического излучения. Он показывает относительную долю мощности, подводимой к винтовентилятору, которая переходит в акустическое излучение. Уточнена формула для расчета удельного расхода топлива с учетом потерь на акустическое излучение винтовентилятора. Апробация методики показала, что для двигателя типа Д-27 увеличение расстояния между рядами винтовентилятора на 300 мм дает возможность улучшить топливную экономичность на крейсерском режиме его работы на 0,95 кг/ч. Для силовой установки, состоящей из четырех двигателей (например, Ан-70), экономия топлива в течение 200 часов полета (среднемесячная эксплуатация) составляет около 760 кг. Полученные результаты планируется использовать при проведении исследований по совершенствованию турбовинтовентиляторного двигателя путем уменьшению акустического излучения винтовентилятора. *Ключевые слова:* экономичность, энергетический баланс, потери, акустическое излучение, винтовентилятор.

Methodology for calculation of acoustic loss of the propeller fan in the energy balance of aircraft power plant. Usenko V. The perfection of turbine engine and processes ongoing in it depends on the level of loss in all engine components. Energy balance of the turbine engine demonstrates contribution of each component into general level of loss, allows revealing the sources of loss in order to reduce them. The analysis of publications has shown that the issues of energy balance estimation were studied as regards different types of turbine engines. Using the example of by-pass turbojet engine it is also demonstrated that acoustic energy loss should be taking into account in energy balance. The methodology for estimation and calculation of acoustic loss of the propeller fan in the energy balance of aircraft power plant is offered. This methodology allows estimating contribution of the acoustic loss in general energy balance and evaluating the change of fuel efficiency when introduce the measures for propeller fan noise reduction. For calculation of loss due to acoustic emission the rate of loss of acoustic emission energy is offered. This rate shows relative fraction of power, transmitted to propeller fan, which transforms to acoustic emission. The formula is improved for calculation of specific

fuel consumption subject to propeller fan acoustic emission loss. The methodology approbation shown that distance between rows of propeller fan increased by 300 mm permits to improve the cruise fuel efficiency of D-27 engine by 0.95 kg per hr. For the power plant including four engines (e.g. AN-70) the fuel saving is 760 kg during 200 flight hours (average monthly operation). The findings are planned to be used for research on reduction of acoustic emission of propeller fans of turbofan engines. *Key words:* efficiency, energy balance, loss, acoustic emission, propeller fan.

Постановка проблеми. Ключовим чинником існування й ефективності будь-якого літального апарату є двигун з його тяговими, економічними, екологічними, масогабаритними та іншими експлуатаційними характеристиками. Унікальне поєднання властивостей і здатність ефективно функціонувати в істотно різних умовах є однією з основних причин, з яких авіаційний двигун вважається самостійним, з комерційної точки зору, продуктом.

Необхідна ефективність та економічність двигуна забезпечується оптимізацією параметрів робочого процесу, а також удосконаленням термогазодинамічних процесів у всіх елементах силової установки літального апарату.

Основними показниками досконалості газотурбінних двигунів є питомі параметри, до яких відносять питому масу двигуна, питому тягу, питому витрату палива, коефіцієнт використання маси двигуна [1].

Однією з важливих проблем газотурбінних двигунів є підвищення паливної економічності.

Актуальність дослідження. На малих дозвукових швидкостях польоту $M < 0,7$ найбільш економічним на теперішній час є турбогвинтовий двигун. За швидкості польоту $M > 0,7$ коефіцієнт корисної дії (далі – ККД) гвинта починає інтенсивно зменшуватися, а питома витрата палива – збільшуватися. Деяке розширення зони економічної експлуатації турбогвинтового двигуна можливо в разі застосування спеціально спроектованих багатолопатеких стрілоподібних гвинтів змінного шагу (одно- або дворядних). Такі гвинти змінного шагу (зі зменшеним діаметром гвинта) мають підвищену навантаженість на площу і зберігають високий ККД до $M = 0,8 \dots 0,85$. Цей гвинт є гвинтовентилятором. Таким чином, турбогвинтовентиляторні двигуни (далі – ТГВД) мають суттєву перевагу в порівнянні турбогвинтовими двигунами.

Тягова ефективність і паливна економічність ТГВД багато в чому залежить від параметрів і характеристик повітряного гвинтовентилятора.

Збільшення тягового ККД силової установки можливо за більш ефективного перетворення зміни енергії повітряного потоку, що проходить через повітряний гвинтовентилятор, у корисну тягову роботу. Це забезпечується вибором оптимальної компоновки гвинтовентилятора з двигуном і оптимальною геометрією самого гвинтовентилятора. Однак турбогвинтовентиляторні двигуни мають суттєвий недолік – підвищений рівень шуму в салоні і на місцевості.

Таким чином, для турбогвинтовентиляторних двигунів актуальним є комплексне вирішення проблем підвищення паливної економічності та зниження рівня шуму в салоні і на місцевості.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Досконалість газотурбінного двигуна і процесів, що в ньому протікають, залежить від рівня втрат в усіх складових елементах двигуна. Енергетичний баланс газотурбінного двигуна показує внесок кожного складника в загальний рівень втрат, що дає можливість визначити джерела втрат з метою їх зменшення. Всі втрати можна розділити на втрати в процесі перетворення теплової енергії в корисну роботу циклу і втрати перетворення корисної роботи циклу в тягову роботу. Перша група втрат характеризує газотурбінний двигун як теплову машину, а друга група втрат – як рушій.

Проблема підвищення паливної економічності нерозривно пов'язана з рівнем шуму двигуна. Основним джерелом шуму ТГВД є гвинтовентилятор.

Відсутність науково-методичного апарату, що дозволяє комплексно оцінити вплив зміни акустичних характеристик на паливну економічність, вимагає розроблення методики врахування акустичних втрат гвинтовентилятора в енергетичному балансі авіаційної силової установки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оцінці рівня втрат в енергетичному балансі газотурбінного двигуна присвячено багато робіт. В роботах [2–3] розглянуто енергетичний баланс одноконтурних двигунів. В роботі [2] розглянуто також питання енергетичного балансу турбогвинтових і турбогвинтовентиляторних двигунів. У роботі [4] досліджено енергетичний баланс триконтурного двигуна. Авторами проводиться порівняльний аналіз економічності одноконтурного, двоконтурного і триконтурного турбореактивного двигунів на основі порівняння повного і тягового коефіцієнтів корисної дії цих двигунів.

У роботі [5] авторами розглянуто перспективи розвитку шляхів збільшення тягового ККД і внутрішнього ККД газотурбінних двигунів. Зазначається, що для цього необхідно вдосконалювати турбогвинтовентиляторні двигуни і двоконтурні двигуни з надвисоким ступенем двоконтурності, а також відроджувати схеми двигунів, що розроблялись у 80-роках, але через технічні проблеми були зупинені.

Як показали результати, що представлені в роботі [6], в енергетичному балансі газотурбінного двигуна доцільно враховувати акустичні втрати. У роботі [6] розглянуто енергетичний баланс двоконтурного турбореактивного двигуна з урахуванням втрат енергії на акустичне випромінювання. Отримано залежності, що дозволяють визначити коефіцієнт корисної дії з урахуванням втрат енергії на акустичне випро-

мінювання. Однак цю методику для ТВГД застосувати неможливо.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Аналіз публікацій показав, що для різних типів газотурбінних двигунів досліджені питання щодо визначення енергетичного балансу. Також на прикладі двоконтурного турбореактивного двигуна показано, що акустичні втрати енергії необхідно враховувати в енергетичному балансі. Таким чином, з метою підвищення економічності і зменшення акустичної емісії турбогвинтовентиляторних двигунів необхідно створити методику врахування акустичних втрат гвинтовентилятора в енергетичному балансі авіаційної силової установки.

Новизна. У роботі розроблена методика врахування акустичних втрат гвинтовентилятора в енергетичному балансі авіаційної силової установки.

Уточнено формулу для розрахунку питомої витрати палива турбогвинтовентиляторного двигуна з урахуванням втрат на акустичне випромінювання гвинтовентилятора.

Методологічне або загальнонаукове значення. Розроблена методика врахування акустичних втрат гвинтовентилятора в енергетичному балансі авіаційної силової установки дає можливість оцінити внесок акустичних втрат у загальному енергетичному балансі, а також дає можливість оцінити зміну паливної економічності під час проведення заходів щодо зниження рівня шуму гвинтовентилятора.

Виклад основного матеріалу. Для газотурбінного двигуна непрямой реакції під час оптимізації термодинамічних параметрів силової установки необхідно використовувати реальні характеристики елементів. Важливим етапом у вирішенні цієї задачі є визначення оптимальних геометричних параметрів гвинтовентилятора з урахуванням особливостей компоновки двигуна на літальному апараті. При цьому одним із визначальних параметрів гвинтовентилятора є тяговий коефіцієнт корисної дії.

Робочий процес турбогвинтовентиляторного двигуна характеризується тим, що основна частина вільної енергії (роботи циклу) використовується для створення потужності на валу турбіни.

Оптимальне розподілення роботи циклу між гвинтовентилятором і прямою реакцією двигуна з метою створення максимальної тягової роботи здійснюється на основі відомих співвідношень [2]:

$$\left(\frac{c_c}{V}\right)_{\text{opt}} = \frac{1}{\eta_m \cdot \eta_{\text{гв}}} \quad \text{або} \quad c_{c \text{ opt}} = V \frac{1}{\eta_m \cdot \eta_{\text{гв}}},$$

де c_c – швидкість газу на виході із сопла, V – швидкість польоту, η_m – коефіцієнт, що характеризує рівень механічних втрат, $\eta_{\text{гв}}$ – ККД гвинтовентилятора.

Чим більше швидкість польоту V і чим менший ККД гвинтовентилятора $\eta_{\text{гв}}$, тим більшу частину роботи циклу слід передавати для прискорення газо-

вого потоку. Це є наслідком збільшення ступеня розширення газу в реактивному соплі.

Основною перевагою турбогвинтовентиляторних двигунів є значне зниження витрати палива (зниження питомої витрати палива) на швидкостях польоту, що відповідають числу $M < 0,65 \dots 0,85$.

Оптимальне розподілення роботи циклу ТГВД забезпечує не тільки максимальне значення його тягової роботи, але й мінімальну витрату палива. Це пояснюється тим, що за постійної швидкості польоту і заданих параметрах робочого процесу (температури газу перед турбіною T_r^* і ступенем підвищення тиску в компресорі π_k^*) кількість теплоти $Q_0 = g_{\text{п}}$ (де $g_{\text{п}}$ – відносна витрата палива, H_u – кількість тепла, що виділяється під час згоряння 1 кг палива), що вноситься в двигун, не залежить від розподілення роботи циклу між гвинтовентилятором і прямою реакцією.

Покращення економічності ТГВД можливо в разі збільшення його повного ККД $\eta_{\text{п}}$, який характеризує досконалість процесу перетворення теплової енергії в корисну тягову роботу $L_{\text{тяг}}$. За постійної швидкості польоту і незмінних основних параметрів робочого процесу, кількість тепла Q_0 , що вноситься в двигун, постійна, тому повний ККД двигуна залежить від розподілення циклу між гвинтовентилятором і прямою реакцією [2]:

$$\eta_{\text{п}} = \frac{L_{\text{тяг}}}{Q_0} = \frac{N_{\text{тяг}}}{Q_0 \cdot G},$$

де $N_{\text{тяг}}$ – тягова потужність двигуна, G – витрата повітря в двигуні.

Взаємозв'язок повного ККД з питомою витратою палива показує, що чим більше повний ККД $\eta_{\text{п}}$, тим менша питома витрата палива:

$$C_e = \frac{3600 \cdot \eta_{\text{гв}}}{\eta_r \cdot H_u \cdot \eta_{\text{п}}},$$

де η_r – коефіцієнт повноти згоряння палива в камері згоряння.

Повний ККД ураховує втрати двигуна як теплової машини і двигуна як рушія. Досконалість двигуна як теплової машини оцінюється внутрішнім ККД, який враховує втрати тепла газового потоку, що виходить із двигуна; втрати, що пов'язані з неповнотою згоряння палива в камері згоряння; втрати кінетичної енергії з вихідними газами. Досконалість двигуна як рушія оцінюється тяговим ККД, що враховує втрати кінетичної енергії гвинтовентилятора.

Однак представлений вище метод не враховує, що частина корисної енергії витрачається на акустичне випромінювання гвинтовентилятора.

Основним джерелом шуму турбогвинтовентиляторного двигуна є гвинтовентилятор. У спектрі шуму гвинтовентилятора виділяють широкосмуговий і дискретний складники. Джерелом широкосмугового складника є вихровий шум, що генерується зривом вихорів за всією довжиною лопаті.

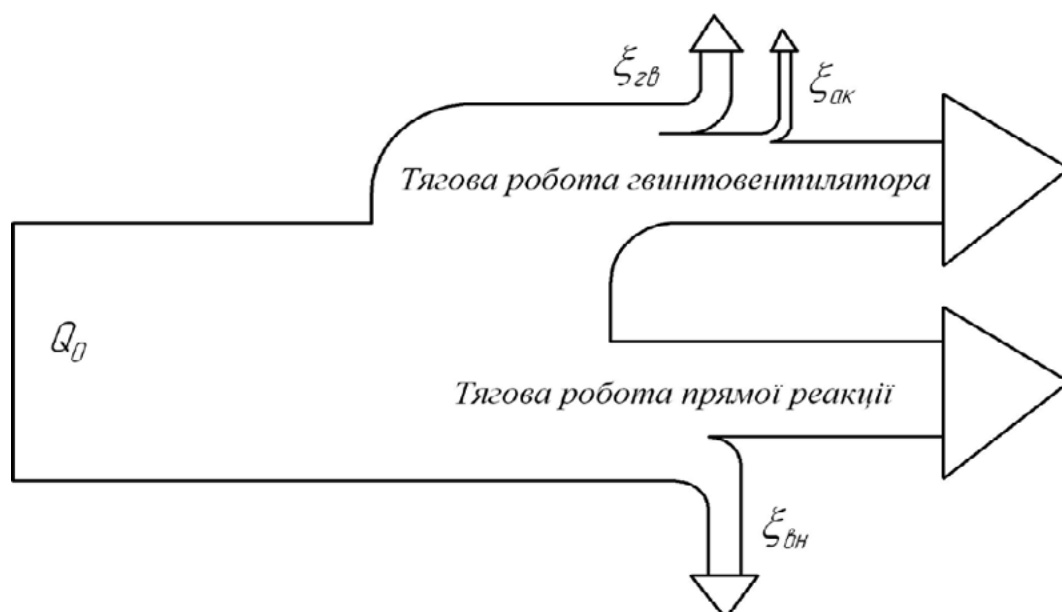


Рис. 1. Діаграма енергетичного балансу ТГВД з урахуванням втрат енергії на акустичне випромінювання

Дискретний складник у спектрі шуму гвинтовентилятора генерується об'ємним шумом і шумом обертання, що пов'язаний із силовою дією лопаті на середовище.

Для урахування втрат на акустичне випромінювання пропонується ввести коефіцієнт втрат енергії акустичного випромінювання $\xi_{ак}$, який показує долю потужності двигуна, що переходить в акустичне випромінювання:

$$\xi_{ак} = \frac{W_{ак}}{N_e},$$

де $W_{ак}$ – акустична потужність гвинтовентилятора, N_e – потужність на валу двигуна.

Акустичний ККД, що враховує втрати енергії на акустичне випромінювання, можна записати таким чином:

$$\eta_{ак} = 1 - \xi_{ак}.$$

На рис. 1 представлена діаграма енергетичного балансу ТГВД з урахуванням втрат енергії, що пов'язана з акустичним випромінюванням основного джерела шуму двигуна з гвинтовентилятором.

З урахуванням акустичних втрат питома витрата палива визначається так:

$$C_e = \frac{3600 \cdot \eta_{гв}}{\eta_{г} \cdot H_u \cdot \eta_{п} \cdot \eta_{ак}} \text{ або } C_e = \frac{G_{п.г.}}{N_{екв} \cdot \eta_{ак}},$$

де $G_{п.г.}$ – витрата палива за годину, $N_{екв}$ – еквівалентна потужність двигуна.

Отримане рівняння для розрахунку питомої витрати палива дає можливість оцінити вплив акустичних втрат на економічність двигуна.

Алгоритм запропонованої методики врахування акустичних втрат гвинтовентилятора в енергетичному балансі авіаційної силової установки представлено на рис. 2.

Наступним етапом роботи є апробації методики, що запропонована.

Об'єктом дослідження виступає турбогвинтовентиляторний двигун типу Д-27.

З метою зниження рівня шуму гвинтовентилятора проведені експериментальні дослідження щодо

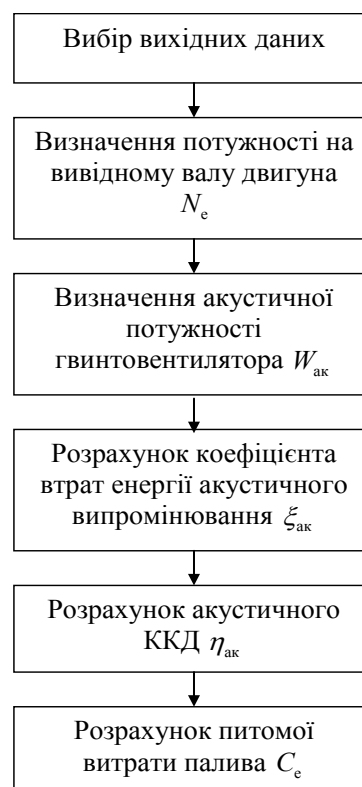


Рис. 2. Алгоритм методики врахування акустичних втрат гвинтовентилятора в енергетичному балансі авіаційної силової установки

Таблиця 1

Параметри двигуна з базовим і модифікованим гвинтовентилятором

	N_e , Вт	$W_{ак}$, Вт	$\xi_{ак}$	$\eta_{ак}$	C_e , кг/(кВт год)
Базовий гвинтовентилятор	7134253	7297,6	0,001023	0,998977	0,24498
Модифікований гвинтовентилятор	7134253	2730,1	0,0004	0,9996	0,24483

збільшення відстані між першим і другим рядом гвинтовентилятора [7].

У даній роботі проведені розрахунки (табл. 1) за представленою вище методикою, з використанням експериментальних даних [8].

Результати розрахунків показують, що запропонована методика дає змогу оцінити зміну паливної економічності під час проведення заходів щодо зниження рівня шуму. Для розглянутого випадку збільшення відстані між рядами гвинта дає можливість покращити паливну економічність на 0,95 кг за год. Двигун експлуатується в середньому 200 годин на місяць і 2200 годин на рік. Отже, це дасть можливість заощадити 190 кг за місяць і більше ніж 2 тони за рік для одного двигуна.

Головні висновки. У роботі запропонована методика оцінки та врахування акустичних втрат гвинтовентилятора в енергетичному балансі авіаційної силової установки з турбогвинтовентиляторним двигуном. Методика дає можливість визначити внесок акустичних втрат у загальний енергетичний баланс та оцінити зміну паливної економічності під час впровадження заходів щодо зниження рівня шуму гвинтовентилятора.

Для урахування втрат на акустичне випромінювання пропонується використовувати коефіцієнт втрат енергії акустичного випромінювання. Він показує, яка відносна частка потужності, що підводиться до гвинтовентилятора, переходить в акустичне випромінювання.

Уточнено формулу для розрахунку питомої витрати палива з урахуванням втрат на акустичне випромінювання гвинтовентилятора.

Апробація методики показала, що для двигуна типу Д-27 збільшення відстані між рядами гвинтовентилятора на 300 мм дає можливість покращити паливну економічність на крейсерському режимі його роботи на 0,95 кг за годину. Для силової установки, що складається з чотирьох двигунів (наприклад, Ан-70), економія палива протягом 200 годин польоту (середньомісячна експлуатація) становить 760 кг.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати планується використовувати під час проведення досліджень щодо розроблення заходів для зменшення акустичного випромінювання гвинтовентилятора турбогвинтовентиляторного двигуна.

Література

1. Chen N. Aerothermodynamics of turbomachinery: analysis and design. Singapore, 2010. 461 p.
2. Терещенко Ю.М. та ін. Теорія теплових двигунів : підручник ; за ред. Ю.М. Терещенко. Київ, 2001. 382 с.
3. Hueenecke K. Jet engine. 6th impression. Shrewsbury, 2003. 242 p.
4. Терещенко Ю.М., Дорошенко Е.В., Ластивка І.А. Оценка экономичности трехконтурного турбореактивного двигателя. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2013. № 5/7 (65). С. 38–41.
5. Авиационные двигатели и силовые установки / под ред. А.И. Ланшина. Москва, 2010. 520 с.
6. Терещенко Ю.М. и др. Энергетический баланс двухконтурного турбореактивного двигателя. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2011. № 3/8 (51). С. 13–15.
7. Приложение к техническому отчету № 70.00.252.837. Д15-2002. Самолет Ан-70. Наземные испытания по исследованию акустических характеристик винтовентилятора СВ-27 в самолётной компоновке Ан-70 при изменении зазора между плоскостями переднего и заднего винтов. Киев : АНТК им. О.К. Антонова, 2002. 96 с.