

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВНУТРІШНІХ СПРАВ**

КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ

Циклова комісія експлуатації та ремонту авіаційного транспорту

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

навчальної дисципліни «Теорія теплових двигунів»

обов'язкових компонент

освітньої програми першого (бакалавр) рівня вищої освіти

272 Авіаційний транспорт (Експлуатація та ремонт авіаційного транспорту)

за розділом №1 – «Теорія газодинамічних двигунів»

за темою №3 – «Двоконтурні ТРД і турбогвинтові двигуни»

Харків 2021

СХВАЛЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 23.09.2021 № 8

СХВАЛЕНО

Методичною радою
Кременчуцького льотного коледжу
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 22.09.2021 № 2

СХВАЛЕНО

Секцією Науково-методичної
ради ХНУВС зі спеціальних
дисциплін
Протокол від 22.09.2021 № 8

Розглянуто на засіданні циклової комісії аеронавігації
Протокол від 30.08.2021 № 1

.

Розробник: викладач циклової комісії аеронавігації Ємець В.В.

Рецензенти:

1. Викладач циклової комісії аеронавігації, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, викладач-методист Тягній В.Г.

2. Завідувач кафедри технологій аеропортів Національного авіаційного університету, д.т.н., професор Тамаргазін О.А.

Розділ 1 Теорія газотурбінних двигунів

Тема 3. Принципи роботи ТГвД

Лекція 17. Характеристики ТГвД

1. Робочий процес ТВД

2. Основні робочі параметри ТВД

3. Залежність еквівалентної роботи і питомої витрати палива від основних параметрів

4. Регенерація тепла в ТГвД

5. Характеристики ТГвД

5.1 Дросельні характеристики ТГвД

5.2 Швидкісні характеристики ТГвД

5.3 Висотні характеристики ТГвД

Рекомендована література

Основна

1. Терещенко Ю.М., Бойко Л.Г. Мамлюк О.В. Газотурбінні двигуни літальних апаратів. – Київ, «Вища школа», 2000

Допоміжна

2. Теорія теплових двигунів. Термогазодинамічний розрахунок газотурбінних двигунів. за ред. проф.Ю.М. Терещенка. – Київ, Видавництво Національного авіаційного університету «НАУ-друк», 2009
3. Клячкин А.Л. Теория воздушно-реактивных двигателей. – М. Машиностроение, 1969
4. Клячкин А.Л. Эксплуатационные характеристики авиационных газотурбинных двигателей. – М., Транспорт, 1967
5. Вагин А.Н., Неспела А.Н., Семенюта В.А., Цыбалов И.Г. Теория авиационных двигателей. Ч.2. Основы теории реактивных двигателей. – М., Воениздат МО СССР, 1968

Інформаційні ресурси в Інтернеті

Одним з недоліків ТРД є низькі значення тягового к.к.д. на малих і середніх дозвукових швидкостях польоту, що веде до зменшення повного к.к.д. і економічності двигуна.

Усунення цих недоліків полягає в тому, щоб при високих значеннях параметрів робочого процесу ($\pi, T_3^*, \eta_c, \eta_p$), які забезпечують роботу двигуна з високим внутрішнім к.к.д., збільшити ефективність перетворення корисної роботи циклу L_{II} в тягову роботу.

ТГВД складається з тих же елементів, як і ТРД, але крім того має повітряний гвинт і редуктор. Робочий процес в ТГВД іде при високих параметрах, а отримана при цьому робота циклу передається на повітряний гвинт, який відкидаючи велику масу повітря з малими швидкостями, створює силу тяги.

Степінь перетворення роботи циклу в тягову роботу гвинта характеризується к.к.д. гвинта, величина якого на малих і середніх дозвукових швидкостях буде значно більшим, ніж тяговий к.к.д. ТРД, а економічність у ТГВД також буде вище, ніж у ТРД.

Ще однією особливістю ТГВД є те, що для того, щоб передати частину роботи циклу на повітряний гвинт, потужність турбіни повинна бути більше потужності, яка споживається компресором. Тому розширення газу відбувається в основному в турбіні, для чого вона має більше ступенів (від 3 до 6), ніж в ТРД.

Необхідність наявності у ТГВД редуктора пов'язана з тим, що при існуючих розмірах двигунів обороти ротора, які забезпечують високі окружні швидкості робочих коліс компресора і турбіни для забезпечення високого к.к.д. є достатньо високими, ніж швидкості, які необхідні для ефективної роботи гвинта. Передаточне число редуктора може досягати до 15.

1. Робочий процес ТВД

Робочий процес ТГВД (рис.1) в основному такий же, як у ТРД, але с деякими особливостями.

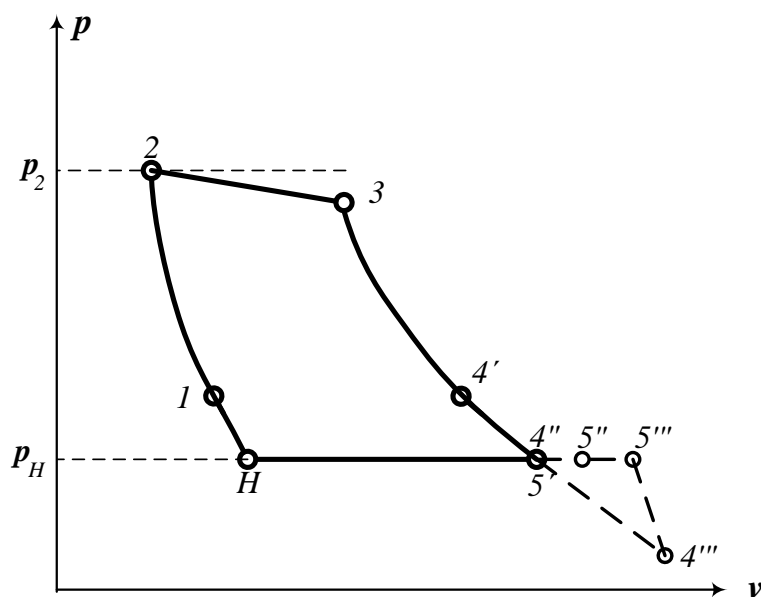


Рисунок 1. Зображення робочого процесу ТГвД в координатах $p-v$

Робочий цикл складається з таких процесів:

Н-1 – стискання повітря у вхідному пристрої;

1-2 – стискання повітря у компресорі;

2-3 – підведення тепла у камері згорання;

3-4' – процес розширення газів до $p_{4'} > p_H$ (вихідний пристрої – сопло що звужується);

3-4'' – процес розширення газів до $p_{4''} = p_H$ (сопло приблизно постійного перетину);

3-4''' – процес розширення газів до $p_{4'''} < p_H$ (сопло трохи розширюється);

4'-5' – розширення газу в соплі при $p_{4'} > p_H$;

4''-5'' – розширення газу в соплі при $p_{4''} = p_H$;

4'''-5''' – розширення газу в соплі при $p_{4'''} < p_H$.

Робота циклу дорівнює:

$$L_{\text{ц}} = L_{e.m.} - L_{e.k.} + \frac{c_5^2 - V^2}{2g} \quad (1)$$

Різниця робіт турбіни і компресора є ефективна робота, що передається на повітряний гвинт, тому:

$$L_{\text{ц}} = L_e + \frac{c_5^2 - V^2}{2g} \quad (2)$$

2. Основні робочі параметри ТВД

Тягова робота складається з суми корисної тягової роботи повітряного гвинта і корисної тягової роботи реактивної тяги:

$$L_{\text{тяг.гв}} = L_{\text{гв}} \eta_{\text{гв}} \quad (3)$$

де $\eta_{\text{гв}}$ - к.к.д. гвинта;

$L_{\text{тяг.гв}} = L_e \eta_m$ - робота, що підведена до гвинта;

η_m - механічний к.к.д. редуктора.

$$L_{\text{тяг.р}} = P_{\text{уд}} V = \frac{c_5 - V}{g} V \quad (4)$$

$$L_{\text{тяг}} = L_{\text{тяг.гв}} + L_{\text{тяг.р}} = L_{\text{гв}} \eta_{\text{гв}} + \frac{c_5 - V}{g} V \quad (5)$$

$$\text{Еквівалентна робота: } L_e = \frac{L_{\text{тяг}}}{\eta_{\text{гв}}} = L_{\text{гв}} + \frac{c_5 - V}{\eta_{\text{гв}} g} V \quad (6)$$

Еквівалентна потужність двигуна:

$$N_e = \frac{L_e G_{\text{гв}}}{75} = \frac{G_{\text{гв}}}{75} \left(L_{\text{гв}} + \frac{c_5 - V}{\eta_{\text{гв}} g} V \right) [\text{л.с.}] \quad (7)$$

Питома еквівалентна потужність:

$$\bar{N}_e = \frac{N_e}{G_e} \quad (8)$$

Економічність ТГВД оцінюється питомою витратою палива C_e під якої розуміється відношення часової витрати палива до еквівалентної потужності:

$$C_e = \frac{3600 \cdot Q_0}{H_U \bar{N}_e} \quad (9)$$

3. Залежність еквівалентної роботи від основних параметрів

Основним питомим параметром, що визначає потужність і економічність ТГВД, є еквівалентна робота. Для цього необхідно з'ясувати залежність еквівалентної роботи від основних параметрів робочого процесу.

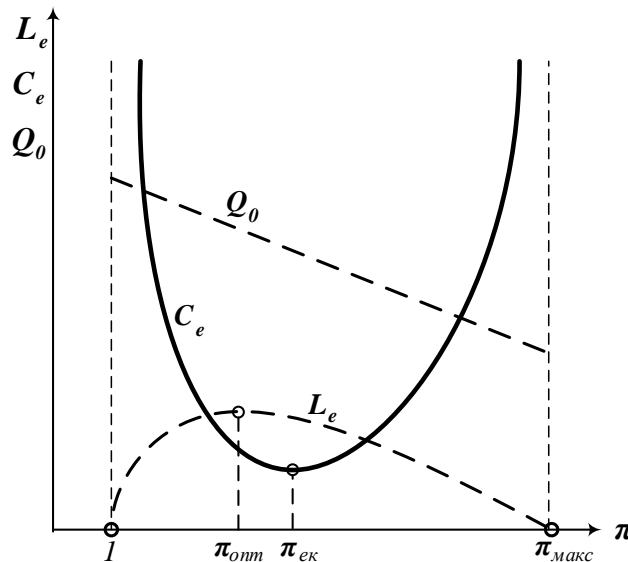


Рисунок 2. Залежності Q_0 , L_e і C_e ТГВД від степені підвищення тиску

Залежність еквівалентної роботи від степені підвищення тиску показана на рис.2. При $\pi = 1$ і $\pi = \pi_{max} = \pi_{opt}^2$ $L_e = 0$. При $\pi = \pi_{opt} \rightarrow L_e = L_{max}$.

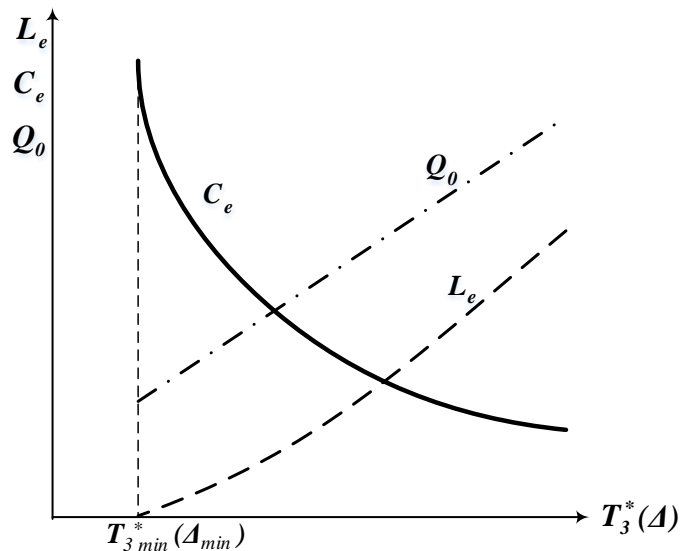


Рисунок 3. Залежності Q_0 , L_e і C_e ТГвД від температури газів перед турбіною (ступені підігріву газу)

Залежність еквівалентної роботи від температури показано на рис.3. Зі збільшенням температури еквівалентна робота безперервно зростає, при $T = T_{3\min}^*$ еквівалентна робота дорівнює нулю.

Величина і характер зміни питомої витрати визначаються величиною еквівалентної роботи і кількістю підведеного тепла. При збільшенні ступені тиску від $\pi = 1$ до $\pi = \pi_{ек}$ питома витрата палива зменшується, від $\pi = \pi_{ек}$ до $\pi = \pi_{макс}$ питома витрата збільшується.

При збільшенні температури газів перед турбіною питома витрата зменшується.

4. Регенерація тепла в ТГвД

Регенерація тепла є одним з методів підвищення економічності ТГвД. Цей метод полягає в відборі частини повітря після компресора і подання його в регенератор. В регенератор також подається нагріте повітря після турбіни, який нагріває повітря, що подано від компресора і нагріває його. Далі, нагріте повітря подається в камеру згорання (рис.4).

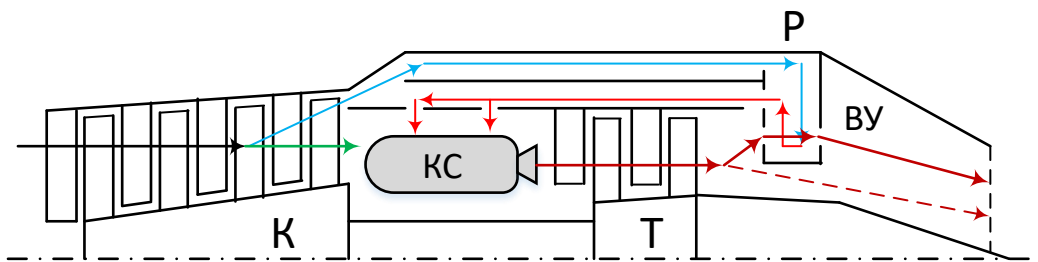


Рисунок 4. Принципова схема ТГвД з регенерацією тепла

Позитивним ефектом застосування регенерації тепла є значне зниження (приблизно на 30-40%) питомої витрати палива.

Суттєвими труднощами впровадження регенерації тепла в ТГвД є:

- значні гідравлічні втрати в регенераторі, які знижують ефективну потужність двигуна;
- високий термічний опір, який знижує економічність ТГвД;
- значна відносна вага регенератора;
- низка експлуатаційна надійність регенератора.

Використання регенератора дає додаткове падіння повного тиску приблизно на від 5 до 10%.

Досконалість регенератора характеризується мірою регенерації теплообмінника:

$$r = \frac{T_{2p} - T_2^*}{T_4^* - T_2^*} = \frac{\Delta T_x}{\Delta T_r} \quad (10)$$

де T_{2p} - температура повітря після регенератора;

T_2^* - температура повітря після компресора;

T_4^* - температура газів після турбіни.

5. Характеристики ТГвД

Характеристиками турбогвинтового двигуна називаються залежності еквівалентної потужності (або потужності гвинта і реактивної тяги), реактивної тяги і питомої витрати палива від числа оборотів, швидкості і висоти.

Розглядаються три типи характеристик: дросельні (по числу оборотів), швидкісні і висотні. Швидкісні і висотні прийнято називати льотними.

За допомогою характеристик визначаються льотно-технічні характеристики повітряних суден, найвигідніші режими польоту по дальності і тривалості, порівнюються характеристики двигунів, а також виробляються технічні вимоги, які пред'являються до систем регулювання.

5.1 Дросельні характеристики ТГвД

Дросельними характеристиками називають залежності еквівалентної потужності, питомої витрати палива і реактивної тяги від степені дроселювання (або числа оборотів) при заданій програмі його регулювання.

Вихідні пристрої ТГвД звичайно виконуються нерегульованими. Але у ТГвД є ще один важливий елемент – повітряний гвинт. Він може бути з фіксованим кроком (ВФШ) і зі змінюваним кроком (ВИШ) лопатей.

5.1.1 Дросельні характеристики ТГвД з гвинтом фіксованого кроку (ВФШ)

При зміні подання палива основні параметри робочого процесу по оборотах змінюються так, як і у ТРД з нерегульованою геометрією (рис. 5).

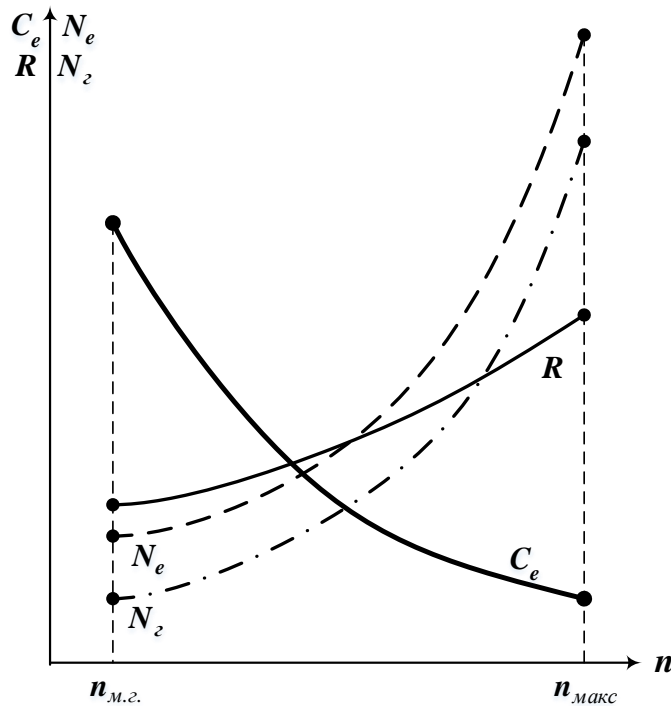


Рисунок 5. Дросельні характеристики ТГвД з $\varphi_{26} = \text{const}$

У ТГвД з $\varphi_{26} = \text{const}$ степінь зростання тиску і витрата повітря зростають при збільшенні оборотів, а температури газів перед турбіною і за нею спочатку знижуються, а потім зростають. При цьому:

- еквівалентна потужність двигуна (і потужність гвинта) безперервно зростають;
- питома витрата палива зменшується;
- реактивна тяга зростає.

5.1.2 Дросельні характеристики ТГвД з гвинтом змінюваного кроку (ВИШ)

При використанні на ТГвД гвинта змінюваного кроку є можливість вибору різних програм регулювання двигуна, так як має місце поява двох незалежних параметрів: витрата палива і кут установки лопатей гвинта, який визначає потужність, потрібну на обертання гвинта на даних оборотах і умовах польоту.

Подання палива завдає закон зміни оборотів по режимам, а зміна кутів установки визначає закон зміни температури перед турбіною по режимам.

Можливо здійснити такі програми регулювання:

- $T_3^* = \text{const}$;
- $n = \text{const}$;
- $\varphi_{26} = \text{const}$.

Дросельна характеристика з $\varphi_{26} = \text{const}$ буде такою ж, як для двигуна з гвинтом фіксованого кроку.

При програмі $T_3^* = \text{const}$ робоча характеристика співпадає з лінією $\frac{T_3^*}{T_1^*} = \text{const}$

(рис.6). При такій програмі регулювання виходять більш високі значення

еквівалентної потужності і більш низькі значення питомої витрати палива на оборотах $n < n_{\max}$, так як значення T_3^* і π_k^* на цих режимах будуть вище.

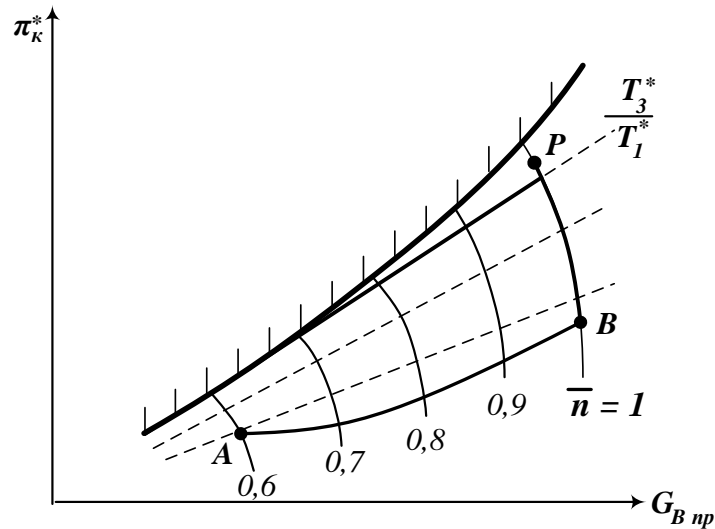


Рисунок 6. Робоча характеристика ТГВД при програмах регулювання: АВ - програма $\varphi_{зв.min} = \text{const}$, ВР - програма $n = \text{const}$.

Програма $n = \text{const}$ здійснюється так, що регулятор оборотів підтримує обороти постійними за рахунок зміни подання палива, а зі зміною кута установки змінюється потужність, яку споживає гвинт, і температура T_3^* , яка необхідна для отримання цієї потужності.

Програма $\varphi_{зв.min} = \text{const}$ забезпечує робочу характеристику (АВ), яка проходить на значній відстані від границі помпажу, що полегшує запуск і розгін до n_{\max} . Далі від точки В до точки Р регулювання здійснюється за програмою $n_{\max} = \text{const}$.

При використанні гвинта змінюваного кроку можливо використання комбінованих програм регулювання (рис.7).

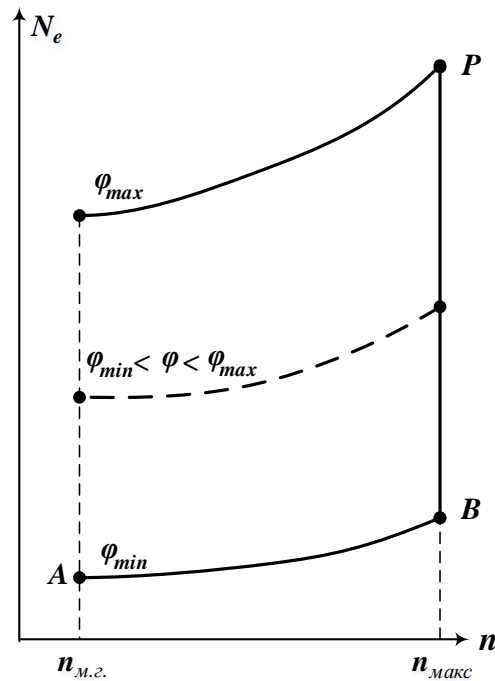


Рисунок 7. Дросельна характеристика ТГвД при комбінованій програмі регулювання: АВ - $\varphi_{\text{дв. min}} = \text{const}$; ВР - $n_{\text{max}} = \text{const}$.

При виборі програми необхідно враховувати обмеження, які накладаються на режими роботи двигуна:

- по помпажу;
- по $T_{3\text{max}}^*$, яка визначає міцність турбіни;
- по стійкості горіння при малих значеннях T_3^* (на дуже бідних сумішах);
- по максимальним оборотам n_{max} , які обираються за умовами міцності елементів турбокомпресора, що обертаються;
- по режиму авторотації.

Поле можливих змін потужності ТГвД при заданих умовах на вході в двигун, зображено на рис.8:

- лінія 1-2 – являє собою границю по помпажу компресора;
- лінія 2-3 – показує зміну потужності двигуна при максимально допустимій температурі газів перед турбіною ($T_{3\text{max}}^*$). Робота двигуна вище лінії 2-3 недопустима по умовам міцності турбіни.

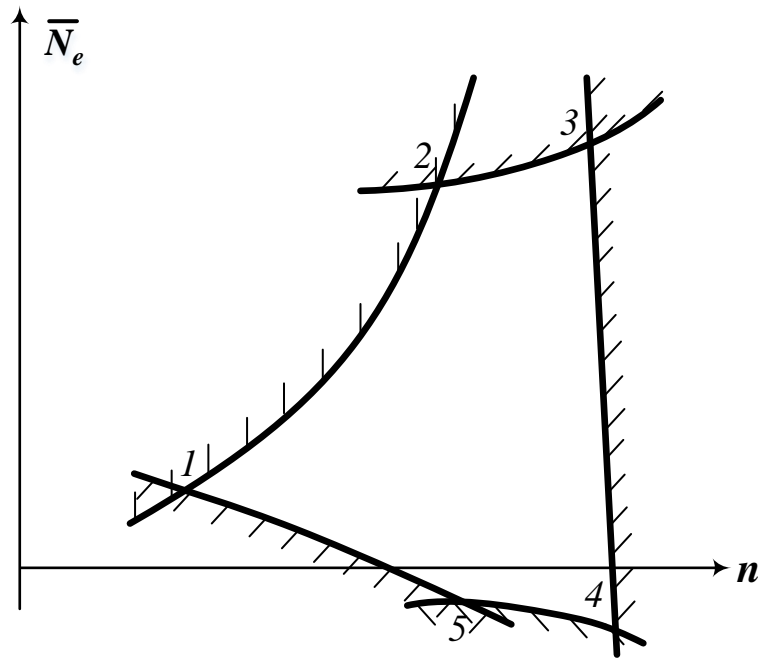


Рисунок 8. Обмеження роботи ТГВД.

- лінія 3-4 – обмеження по максимально допустимім оборотам двигуна (також по умовам міцності);
- лінія 4-5 – границя можливих режимів роботи по авторотації гвинта, при яких тяга гвинта спрямована проти напрямку руху ПС. При цьому гвинт не отримує потужність від двигуна, а також не віддає потужність двигуну;
- лінія 5-1 – границя можливих режимів роботи двигуна по умовам стійкості роботи камери згорання.

5.1.3 Залежність дросельних характеристик від тиску і температури атмосферного повітря

Основні параметри ТГВД залежать від тиску і температури атмосферного повітря.

При зміні атмосферного тиску змінюється тільки витрата повітря і ефективна потужність (N_e), величина питомої витрати палива (C_e) остається незмінною.

Зміна атмосферної температури веде до зміни як еквівалентної потужності, так і питомої витрати палива. При збільшенні температури повітря зменшуються такі параметри роботи двигуна, як $\frac{n}{\sqrt{T_H^*}}$, ступінь стискання повітря в компресорі (π_K^*),

витрата повітря (G_B), корисна робота гвинта (L_r), і питома реактивна тяга, що веде до зменшення еквівалентної потужності. В зв'язку зі зменшенням π_K^* зменшується міра перетворення тепла в корисну роботу циклу і питома витрата палива збільшується.

Дросельні характеристики ТГВД з нерегульованою геометрією і $\varphi_{26} = \text{const}$ в залежності від атмосферних умов приведено на рис.9.

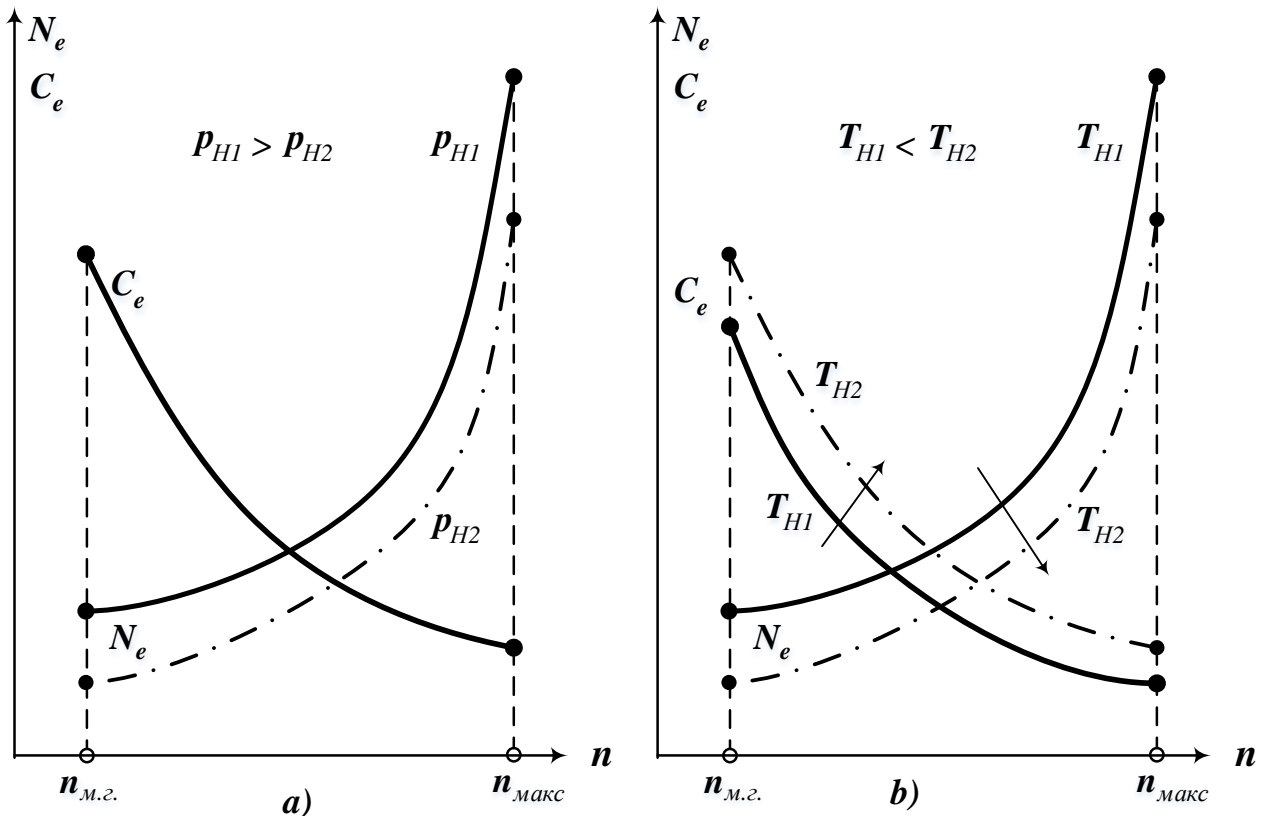


Рисунок 9. Дросельні характеристики ТГвД від атмосферного тиску (а) і температури повітря (b)

5.2 Швидкісні характеристики ТГвД

Швидкісними характеристиками ТГвД називаються залежності еквівалентної потужності (або потужності на валу гвинта і реактивної тяги) і питомої витрати палива від швидкості польоту при незмінній висоті і прийнятій програмі регулювання.

Програма регулювання $n = \text{const}$, $T_3^* = \text{const}$ забезпечує отримання максимальної потужності і мінімальної питомої витрати палива.

На рис. 10 показано характер зміни еквівалентної потужності N_e , потужності на валу гвинта N_z , реактивної тяги R і питомої витрати палива C_e від швидкості польоту.

З ростом швидкості еквівалентна потужність і потужність на валу гвинта зростають, а реактивна тяга і питома витрата палива зменшуються.

Зі збільшенням швидкості польоту зростає степінь збільшення тиску повітря в двигуні, що веде до зростання потужності.

Зі збільшенням швидкості польоту зменшується різниця $c_5 - V$, що веде до зменшення питомої тяги, а значить, до зменшення реактивної тяги двигуна.

Збільшення швидкості веде до збільшення стиснення повітря, при цьому збільшується степінь перетворення тепла в корисну роботу, а отже, питома витрата повітря зменшується.

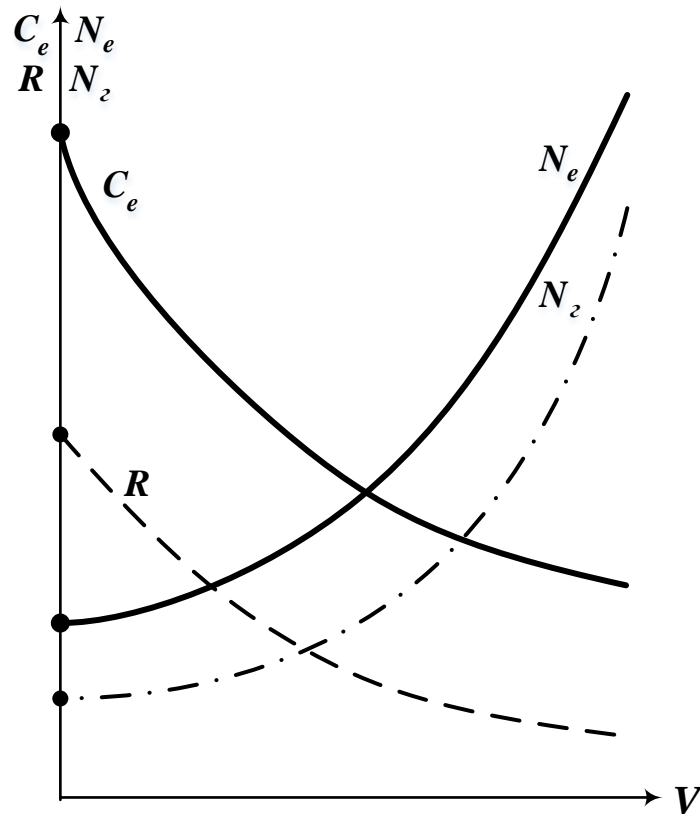


Рисунок 10. Швидкісні характеристики ТГвД

При польотах на низьких висотах з великими швидкостями зростають навантаження на редуктор і вал двигуна. Щоб навантаження не перевищували гранично допустимих, використовується програма регулювання $n = \text{const}$, $N_z = \text{const}$. Перехід на цю програму регулювання погіршує параметри роботи двигуна. Ця програма є вимушеною.

5.3 Висотні характеристики ТГвД

Висотними характеристиками ТГвД називаються залежності еквівалентної потужності (або потужності на валу гвинта і реактивної тяги) і питомої витрати палива від висоти польоту при незмінній швидкості і прийнятій програмі регулювання.

Найкращою програмою, що забезпечує отримання максимальної потужності і мінімальної витрати палива на всіх висотах є програма $n = \text{const}$, $T_3^* = \text{const}$. Залежність еквівалентної потужності і питомої витрати палива по висоті показана на рис. 11.

До висоти $H=11$ км еквівалентна потужність і реактивна тяга зменшуються, але повільніше, ніж зменшення щільності повітря. Вище 11 км ці характеристики зменшуються пропорційно щільності повітря.

Питома витрата палива до $H=11$ км зменшується у зв'язку з ростом π_K^* , а на $H>11$ км стає постійною.

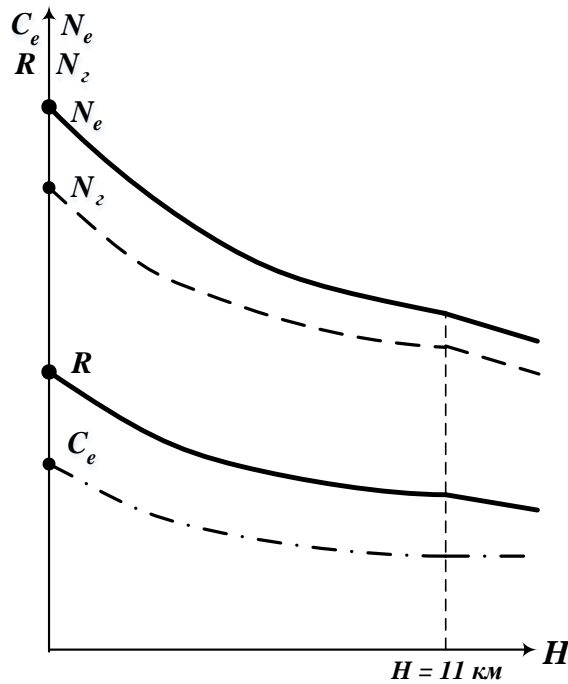


Рисунок 11. Висотні характеристики невисотного ТГВД

З ціллю зменшення навантаження на редуктор і двигун в цілому, їх розраховують на навантаження, які відповідають розрахунковим швидкості і висоті. Тому, на висоті $H < H_{розр}$ при програмі регулювання $n = const$, $T_3^* = const$ потужність, що їде на гвинт буде більше, ніж розрахункова для редуктору. Тому, для цих висот двигун регулюється за програмою $n = const$, $N_z = const$.

Двигун, що регулюється на $H < H_{розр}$ за програмою $n = const$, $N_z = const$, а на $H \geq H_{розр}$ за програмою $n = const$, $T_3^* = const$, називається **висотним**.

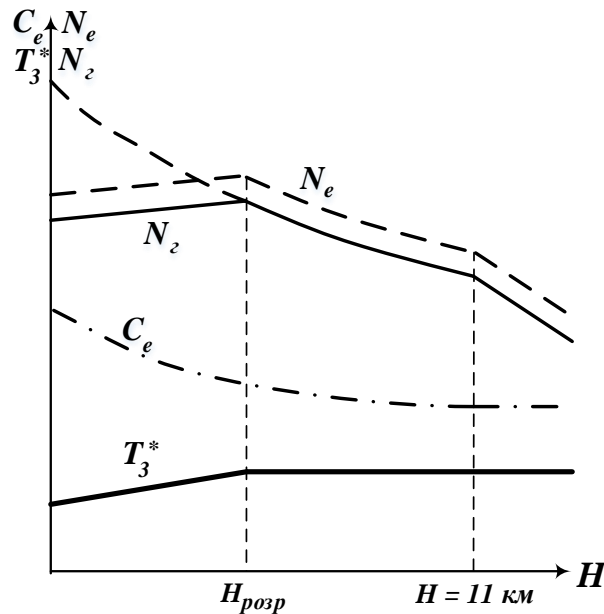


Рисунок 12. Висотні характеристики висотного двигуна з комбінованою програмою регулювання