

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВНУТРІШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

Циклова комісія технічного обслуговування авіаційної техніки

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

з навчальної дисципліни
«Термодинаміка та теплопередача»
обов'язкових компонент
освітньо-професійної програми
першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

272 Авіаційний транспорт
(Аеронавігація)

Тема 5. Основні рівняння термодинаміки газового потоку.

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 30.08.2023 р. № 7

СХВАЛЕНО

Методично радою Кременчуцького
льотного коледжу
Протокол від 28.08.2023 р. № 1

ПОГОДЖЕНО

Секцією науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 29.08.2023 р. № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки, протокол від 28.08.2023 р. № 1

Розробники: викладач циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки *Яніцький А.А.*

Рецензенти:

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

Викладач циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ, к.т.н., с.н.с. *Тягній В.Г.*

План лекції

1. Основні допущення. Рівняння нерозривності;
2. Рівняння збереження енергії. Узагальнене рівняння Бернуллі;
3. Параметри адіабатно загальмованого потоку. Рівняння збереження енергії в параметрах загальмованого потоку. Критичні параметри потоку;
4. Наведена швидкість. Газодинамічні функції .

Рекомендована література (основна, допоміжна), інформаційні ресурси в Інтернеті

Основна:

1. Котовський В. Н. Технічна термодинаміка : тексти лекцій, 2015. 88 с.
2. Котовський В. Н. Теплопередача : тексти лекцій, 2015. 76 с.

Допоміжна:

3. Базаров І. П. Термодинаміка : підручник. 2010. 384 с.
4. Баранов В. М., Коньков А. Ю. Термодинаміка і теплопередача: навчальний посібник; 2-е видання, перероблене. 2004. 91 с.
5. Технічна термодинаміка і теплопередача : підручник для академічного бакалаврату В. А. Кудінов, Е. М. Карташов, Є. В. Стефанюк , 2016. 442 с.

Інформаційні ресурси в інтернеті:

6. URL : <http://klk.univd.edu.ua/uk/dir/177/biblioteka>
7. URL : <http://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/6/29/6-29-kl76.pdf>

Викладач Яніцький Анатолій Анатолійович,
зворотній зв'язок на smit1003@ukr.net

Вимоги до оформлення конспекту лекцій:

- Конспект на державній мові;
- Фото сторінки конспекту відсилаєте на мою пошту із зазначенням групи та прізвища курсанта.

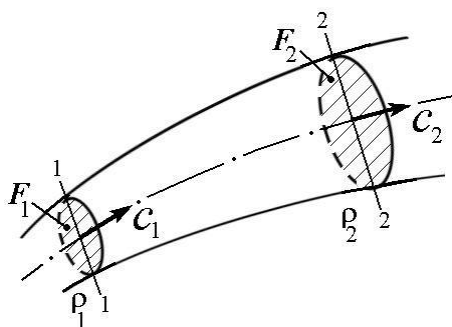
Лекція 10

5.1 Основні допущення. Рівняння нерозривності

Рух газу в силових установках має складний характер, а рівняння, що точно описують реальний потік, вельми громіздкі, що утрудняє їх використання для аналізу і інженерних розрахунків. Тому нижче за рівняння термодинаміки газового потоку розглядаються при наступних допущеннях.

- 1) Рух газу є стаціонарним (сталим), тобто параметри потоку (швидкість, тиск, температура, щільність) в будь-якій точці даної течії незмінні в часі.
- 2) Перебіг газу є одновимірним, тобто параметри потоку в усіх точках кожного поперечного перетину потоку однакові. Їх зміна відбувається лише у напрямі руху від перетину до перетину. Аналіз проводитимемо з позиції спостерігача, відносно якого стінки каналу або кордону цівки не перемішуються.

Рівняння нерозривності



Виділимо в потоці газу в каналі з непроникними стінками обсяг, обмежений перетинами 1 і 2, перпендикулярними швидкості потоку (малюнок). Витрата газу G , кг / с - кількість газу, що проходить через поперечний переріз каналу (струменя) в одиницю часу, дорівнює $G = c \rho F = \text{const}$, де c - швидкість потоку і F - площа поперечного перерізу каналу, а ρ - щільність газу.

Так як потік усталений, то витрата газу, що надходить в розглянутий обсяг,

дорівнює витраті газу, що виходить і цього обсягу,

$$G_1 = c_1 \rho_1 F_1 = G_2 = c_2 \rho_2 F_2$$

Це рівняння являє собою рівняння нерозривності стаціонарного потоку.

5.2 Рівняння Збереження енергії. Узагальнене Рівняння Бернуллі

На підставі закону збереження і перетворення енергії: зовнішня енергія, підведена до системи і складається з теплоти і роботи, призведе до зміни її внутрішньої енергії ΔU , кінетичної енергії $\Delta E_{\text{кін}}$ і потенційної енергії $\Delta E_{\text{пот}}$:

$$q + l_{\Sigma} = \Delta u + \Delta e_{\text{кін}} + \Delta e_{\text{пот}}.$$

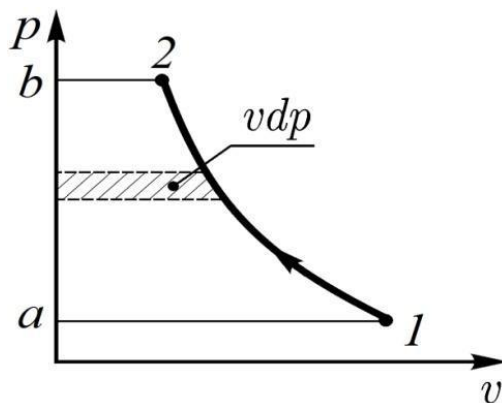
Будемо вважати, що робота, поведена до газу, вважається позитивною, а робота, здійснена газом, негативною.

Підведена ззовні теплота складається з зовнішньої теплоти і теплоти тертя:

Підведена робота складається із зовнішньої ефективною роботи і роботи з подолання тертя.

Диференціальне рівняння першого закону термодинаміки у вигляді стосовно до рухомого в потоці обсягом газу, з огляду на, що теплота dq може підводитися до нього як ззовні, так і за рахунок тертя, може бути записано так:
 $dl_{\text{внеш}} = v dp + dc^2 / 2 + dl_{\text{тр}}.$

Це рівняння називається узагальненим рівнянням Бернуллі в диференціальній формі.



Таким чином, згідно з узагальненого рівняння Бернуллі зовнішня робота, підведена до газу в потоці, витрачається на роботу стиснення газу, на зміну (збільшення) його кінетичної енергії і на роботу з подолання тертя.

Лекція 11

Узагальнене рівняння Бернуллі можна інтерпретувати як баланс механічних форм енергії в газовому потоці.

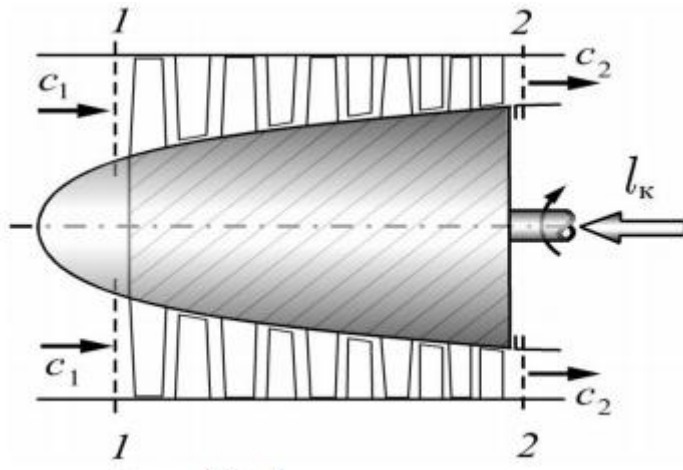
компресор:

Зовнішня робота, що підводиться до повітря в компресорі, $l_{\text{внеш}} = l_k$. Тоді для компресора рівняння Бернуллі має вигляд

$$l_k = \int v dp + (c^2_2 - c^2_1) / 2 + l_{\text{тр}}$$

Таким чином, зовнішня робота, що підводиться до повітря в компресорі, витрачається на роботу стиснення, зміна кінетичної енергії газового

потоків і на подолання сил тертя.



турбіна:

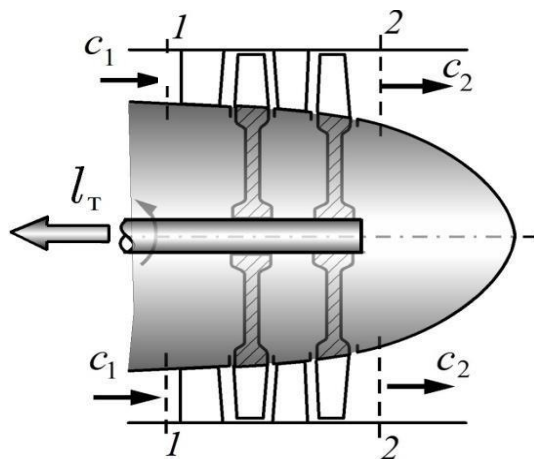
У турбіні газ здійснює роботу, тому для турбіни, Рівняння Бернуллі виглядає наступним чином:

$$-\int v dp = l_T + (c_2^2 - c_1^2) / 2 + l_{тр}$$

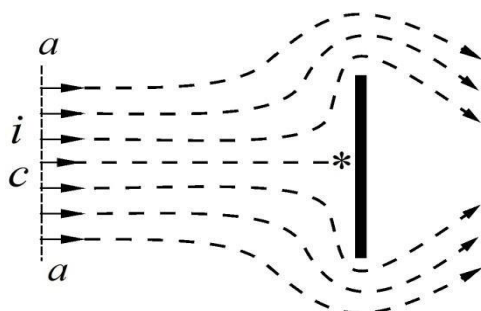
Так як в турбіні тиск газу знижується $dp < 0$, то робота розширення газу

$$-\int v dp > 0$$

Таким чином, в турбіні робота розширення газу витрачається на створення роботи на валу турбіни, збільшення його кінетичної енергії і на подолання сили тертя.



5.3 Параметри адіабатно загальмованості потоку. Рівняння Збереження ЕНЕРГІЇ в параметрах загальмованості потоку. Критичні параметри потоку



Розглянемо газовий потік, що набігає на поставлене нормально до вектору його швидкості невелику плоску пластину. Нехай далеко від пластини (в перерізі а-а) його швидкість, ентальпія, температура і тиск рівні z , i , T і p . Поблизу пластини частина ліній струму буде відхилятися в одну сторону, прагнучи обійти пластину, частина в іншу. Але центральна (по відношенню до пластини) лінія струму нікуди не відхилиться, і в точці * швидкість потоку стане рівною нулю. Припустимо, що гальмування потоку до нульової швидкості в струмку струму, розташованій навколо цієї центральної лінії струму, відбувається адіабатно, тобто без обміну теплотою з сусідніми цівками (що близько до дійсності). Тоді параметри газу при нульовій швидкості (в точці *) і будуть являти собою параметри адіабатно загальмованого потоку. Ці параметри прийнято позначать як: i^* , T^* , p^* , ρ^* . Їх називають також повною ентальпією, повною температурою і повним тиском. А параметри стану газу в перерізі а-а (тобто i , T , p , ρ) називають статичними. Оскільки в даному випадку центральна цівка струму не обмінюється з сусідніми цівками не тільки теплотою, але і механічною енергією, застосуємо до неї рівняння збереження енергії на ділянці а-*

$$q_{\text{внеш}} + l_{\text{внеш}} = i^* - i + (c^{*2} - c^2) / 2$$

Вважаючи в цьому рівнянні $q_{\text{внеш}} = 0$, $l_{\text{внеш}} = 0$, $c^* = 0$ то

$$i^* = i + c^2 / 2$$

Введемо в розгляд число Маха, яке дорівнює відношенню швидкості потоку до швидкості звуку в ньому

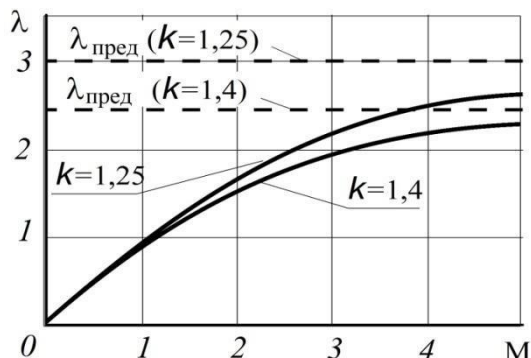
$$M = c / a$$

Критичні параметри потоку

Критичними називаються параметри газового потоку (швидкість, температура, тиск, щільність) у точці або перетині, в якому швидкість досягає швидкості звуку, тобто число Маха стає рівним $M = 1$.

Наведеної швидкості («числом лямбда») називається відношення швидкості потоку до критичної швидкості, тобто

$$\lambda = c / c^*$$



З цих формул видно, що

при $M=0$ і $\lambda=0$;

при $M=1$ і $\lambda=1$;

при $M \rightarrow \infty$ число λ прагне до максимального (граничного) значення.