

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

Циклова комісія технічного обслуговування авіаційної техніки

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

навчальної дисципліни «Термодинаміка та теплопередача»
обов'язкових компонент
освітньої програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

Аеронавігація

за темою – «Основні рівняння термодинаміки газового потоку»

Харків 2021

ЗАТВЕРДЖЕНО

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

ПОГОДЖЕНО

Секцією науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 22.09.2021 № 8

Розглянуто на засіданні циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки, протокол від 30.08.21 № 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.
2. 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 література:

1. Кудінов В. А. Технічна термодинаміка і теплопередача: підручник для академічного бакалаврату; 3-є вид., Випр. і доп. / В. А. Кудінов, Е. М. Карташов, Є. В. Стефанюк.: Видавництво «Юрайт», 2016. - 442 с.

Допоміжна література:

- Котовський В. Н. Технічна термодинаміка: тексти лекцій / В. Н. Котовський. - М.: МГТУ ГА, 2015. - 88 с.
- Котовський В. Н. Теплопередача: тексти лекцій / В. Н. Котовський. - М.: МГТУ ГА, 2015. - 76 с.
- Базаров І. П. Термодинаміка: підручник / І. П. Базаров. - СПб: Видавництво «Лань», 2010. - 384 с.
- Баранов В. М. Термодинаміка і теплопередача: навчальний посібник; 2-е видання, перероблене / В. М. Базаров, А. Ю. Коньков. - Хабаровськ: Видавництво ДВГУПС, 2004. - 91 с.

Інформаційні ресурси в інтернеті

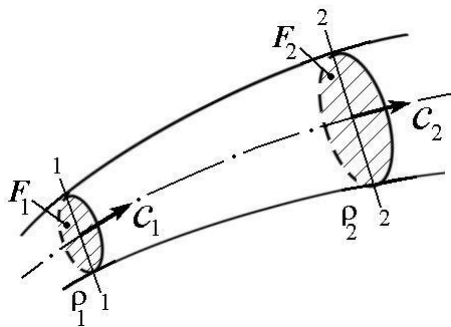
1. <http://klk.univd.edu.ua/uk/dir/177/biblioteka>
2. <https://works.doklad.ru/view/SvJcm0v0liM.html>
3. <https://uchitel.pro/>
4. <http://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/6/29/6-29-kl76.pdf>

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 переміщуються.

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 $\Delta E_{\text{пот}}$:

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

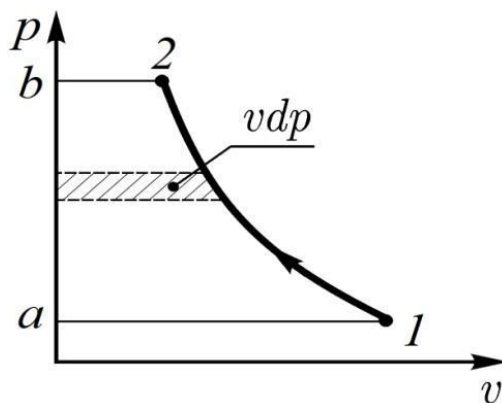
Будемо вважати, що робота, поведена до газу, вважається позитивною, а робота, здійснена газом, негативною.

Підведена ззовні теплота складається з зовнішньої теплоти і теплоти тертя:

Підведена робота складається із зовнішньої ефективної 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:
 $dl_{\text{внеш}} = vdp + dc^2 / 2 + dl_{\text{тр}}.$

Це рівняння називається узагальненим рівнянням Бернуллі в диференціальній формі.



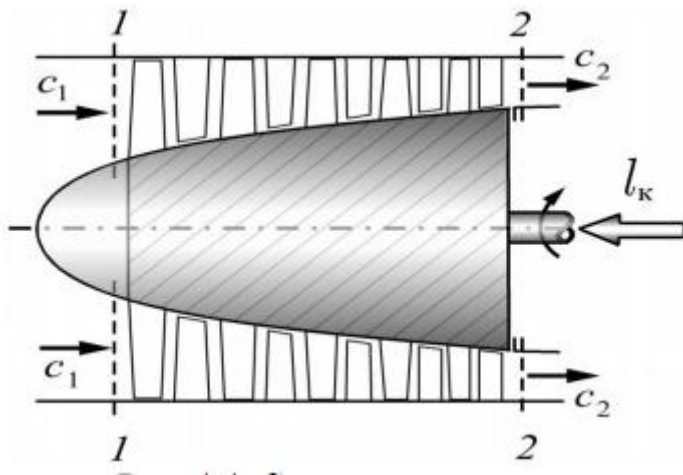
Таким чином, згідно з узагальненого рівняння Бернуллі зовнішня робота, підведена до газу в потоці, витрачається на роботу стиснення газу, на зміну (збільшення) його кінетичної енергії і на роботу з подолання тертя.

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

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

Таким чином, зовнішня робота, що підводиться до повітря в компресорі, витрачається на роботу стиснення, зміна кінетичної енергії газового потоку і на подолання сил тертя.



турбіна:

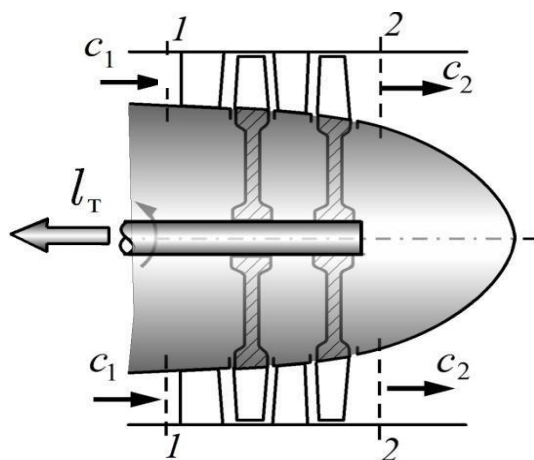
У турбіні газ здійснює роботу, тому для турбіни, Рівняння Бернуллі виглядає наступним чином:

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

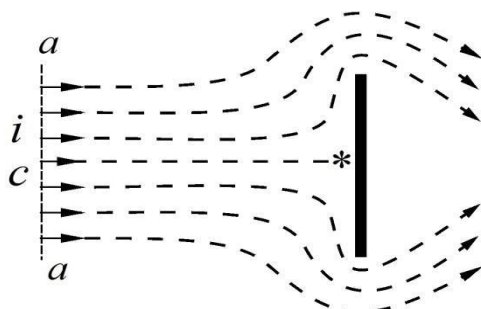
Так як в турбіні тиск газу знижується $dp < 0$, то робота розширення газу

$$-\int v dp > 0$$

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 позначають 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-*

$$q_{\text{внеш}} + l_{\text{внеш}} = i^* - i_1 + (c^{*2} - c_1^2) / 2$$

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

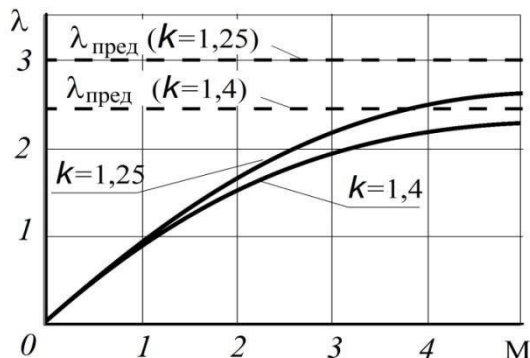
$$M = c / a$$

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 $M = 0$ и $\lambda = 0$;

при $M=1$ и $\lambda=1$;

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