

**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 – «Конвективний теплообмін»**

**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. Фізична картина процесу конвективного теплообміну: прикордонний шар; фактори, що впливають на інтенсивність тепловіддачі;
2. Формула Ньютона. Диференціальні рівняння конвективного теплообміну;
3. Основи теорії подібності конвективного теплообміну: основні поняття і визначення теорії подібності фізичних процесів; перша теорема подібності, критерії подібності; друга теорема подібності, рівняння подібності; виділення головних визначальних критеріїв подібності, явище автомодельності; моделювання фізичних явищ;
4. Тепловіддача при обтіканні плоскої пластини. Конвективний теплообмін при вимушеній течії в каналах. Особливості теплообміну при русі газу з великою швидкістю.

## **Рекомендована література (основна, допоміжна), інформаційні ресурси в інтернеті**

### **Основна література:**

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

### **Додаткова література:**

1. Базаров І. П. Термодинаміка: підручник / І. П. Базаров. - СПб: Видавництво «Лань», 2010. - 384 с.
2. Баранов В. М. Термодинаміка і теплопередача: навчальний посібник; 2-е видання, перероблене / В. М. Базаров, А. Ю. Коньков. - Хабаровськ: Видавництво ДВГУПС, 2004. - 91 с.
3. Кудінов В. А. Технічна термодинаміка і теплопередача: підручник для академічного бакалаврату; 3-е изд., Испр. і доп. / В. А. Кудінов, Е. М. Карташов, Є. В. Стефанюк. - М.: Видавництво «Юрайт», 2016. - 442 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>

## Текст лекції

### 8.1 Фізична картина процесу конвективного теплообміну: прикордонний шар; фактори, що впливають на інтенсивність тепловіддачі

**Конвективний теплообмін – процес спільного перенесення теплоти теплопровідністю і конвекцією.** Таке переплетення процесів, обумовлених молекулярними механізмами перенесення енергії і переміщенням макрооб'єктів, завжди має місце в потоці рідини або газу.

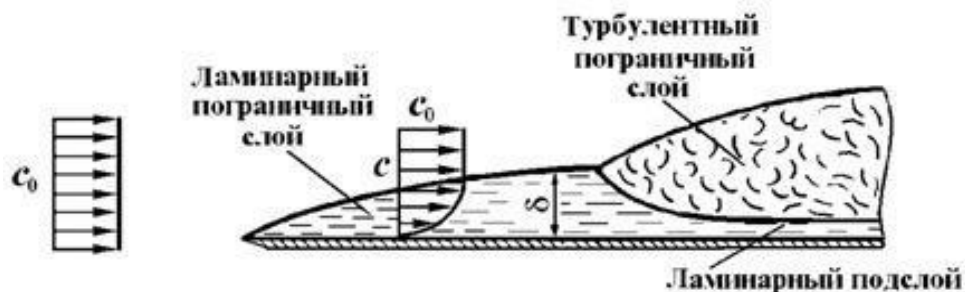
Надалі газ або рідина, які беруть участь в теплообміні, будуть називатися загальним поняттям – теплоносієм.

У техніці найбільше значення має конвективний теплообмін між твердим тілом і омиває його теплоносієм. Цей процес називається також тепловіддачею.

Конвективний теплообмін нерозривно пов'язаний з рухом теплоносія. В результаті цього руху обсяги рідини або газу, переходячи з області з більшою температурою в область з меншою температурою, переносять з собою теплоту. Тому тепловіддача в значній мірі визначається факторами, що впливають на характер перебігу теплоносія поблизу обтічного тіла.

#### **прикордонний шар**

Між поверхнею обтічного тіла і теплоносієм завжди існують сили молекулярної взаємодії, в результаті чого частки теплоносія, що безпосередньо прилягають до стінки, повністю гальмуються, як би «прилипають» до неї, і їх швидкість стає рівною нулю. Ці частинки під дією сил в'язкості гальмують прилеглі шари, в результаті чого у стінки утворюється шар приторможеного теплоносія – пограничний шар (малюнок). Товщина цього шару  $\delta$  по міру віддалення від передньої кромки тіла збільшується, оскільки «гальмує» дію стінок позначається на все більш віддалених від них областях течії.



**Динамічним прикордонним шаром** називається пристінний шар теплоносія, в якому швидкість його змінюється від нуля (на стінці) до величини, що практично дорівнює швидкості зовнішнього потоку  $C_0$ .

**Тепловим прикордонним шаром** називається пристінний шар теплоносія, в якому його температура змінюється від значення, рівного температурі стінки

до температури, що практично дорівнює температурі зовнішнього потоку теплоносія  $T_m$ .

Швидкість і температура в прикордонному шарі в міру віддалення від стінки прагнуть до швидкості і температури зовнішнього потоку. Зазвичай під товщиною прикордонного шару розуміють таку відстань від стінки, на якому швидкість (або температура) відрізняється від швидкості (температури) зовнішнього потоку на малу величину порядку 1%.

Інтенсивність конвективного теплообміну в значній мірі визначається режимом течії теплоносія в прикордонному шарі. Існує два основні режими течії: ламінарний і турбулентний. У першому випадку прикордонний шар називається ламінарним, а в другому – турбулентним.

**Ламінарна течія** – слоиста течія без змішування частиць теплоносія и без пульсації швидкості. Направлення руху потоку співпадає з напрямленням руху окремих частиць.

**Турбулентна течія** – течія, де є (крім загального напрямку руху) безпорядковане, нерегулярне переміщення малих обсягів теплоносія і їх інтенсивне змішування. Значення швидкості, тиску, щільності и температури окремих частиць мають пульсацийний характер. Відносний рівень пульсаций швидкості відомий як **ступень турбулентности потоку**.

При турбулентній течії частки теплоносія, крім поздовжнього руху, здійснюють і поперечні переміщення, переносячи поперек потоку кінетичну енергію і теплоту. Тому при турбулентному прикордонному шарі через наявність турбулентного перемішування інтенсивність теплообміну виявляється значно вище, ніж при ламінарному.

На інтенсивність тепловіддачі (при даному температурному напорі) впливають:

- природа виникнення руху;
- швидкість і ступінь турбулентності набігаючого потоку;
- режим течії в пограничному шарі;
- температура і фізичні властивості теплоносія;
- форма, розміри і шорсткість поверхні обтічного тіла і т.д.

## 8.2 Формула Ньютона.

### Диференціальні рівняння конвективного теплообміну

Ньютон встановив, що щільність теплового потоку між теплоносієм і омивається їм стінкою підпорядковується співвідношенню

$$q = \alpha(T_T - T_{CT}) = \alpha \Delta T$$

де  $\Delta T$  – температурний напір (різниця температур теплоносія і стінки),  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі в Вт / (м<sup>2</sup>/К). Коефіцієнт тепловіддачі чисельно дорівнює щільності теплового потоку при температурному напорі в 1 К.

Формула Ньютона не враховує в явному вигляді всіх факторів, що впливають на інтенсивність процесу. Це вплив враховує коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$ , котрий залежить від факторів, що і інтенсивність конвективного

теплообміну, тобто від характеру руху теплоносія, його фізичних кондицій, розміру  $l$  і форми поверхні обтічного тіла і тому подібне.

Диференціальне рівняння тепловіддачі виводиться на підставі аналізу умов теплообміну в місці зіткнення теплоносія з поверхнею обтічного тіла. Як зазначалося вище, при конвективному теплообміні у поверхні тіла завжди є тонкий ламінарний підшар теплоносія, швидкість руху в якому близька до нуля, і тому перенесення теплоти в ньому здійснюється тільки за рахунок теплопровідності. Прийmemo, що вісь «у» спрямована по нормалі до поверхні тіла.

$$\alpha = -\lambda/\Delta T (dT_T/dy)_{y=0}$$

Де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності,  $\Delta T$  – температурний напір (різниця температур теплоносія і стінки), умова  $y = 0$  означає, що похідна визначається у поверхні тіла.

Це рівняння і є диференціальним рівнянням тепловіддачі.

**8.3 Основи Теорії подібності конвективного теплообміну: основні Поняття і визначення Теорії подібності фізичних процесів; перша теорема подібності, Критерії подібності; друга теорема подібності, Рівняння подібності; віділення головного визначальності критеріїв подібності, явище автомодельності; моделювання фізичних явищ.**

Методи розрахунку конвективного теплообміну базуються на результатах експериментальних досліджень, що дозволяють визначити значення коефіцієнта теплоотдачі  $\alpha$  і використовувати при розрахунку теплових потоків і температурних полів формулу Ньютона

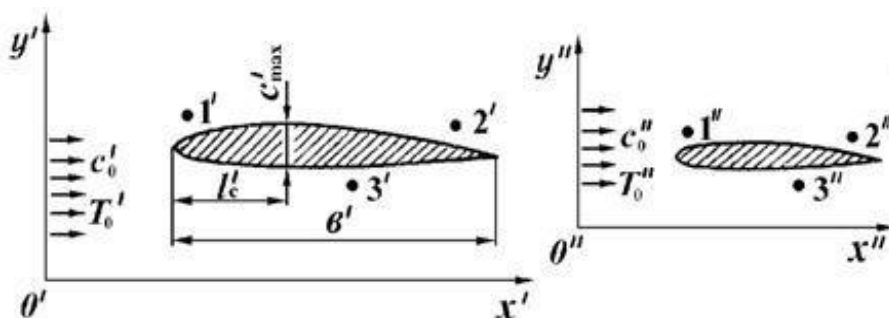
$$q = \alpha(T_T - T_{ст})$$

При цьому завданням експериментальних досліджень є пошук залежності коефіцієнта теплоотдачі  $\alpha$  від факторів, що на нього впливають.

Теорія подібності - вчення про подібні явища.

**Подібними називаються фізичні явища, які:**

- **мають однакову природу (наприклад, протягом газу);**
- **протікають в геометрично подібних системах;**
- **мають однакові відносини однойменних фізичних величин у всіх подібних точках і в подібні моменти часу.**



**Перша теорема подібності:** у подібних фізичних явищ однойменні критерії подібності чисельно однакові.

*Рівність критеріїв подібності в двох явищах однаковою природи при наявності геометричної подоби забезпечує подоби цих фізичних явищ.*

**Друга теорема подібності:** Рішення системи рівнянь, що описують будь-яке явище, може бути представлено у вигляді залежності між критеріями подібності, які отримуються з цієї системи рівнянь.

Явище автономності.

Для забезпечення подібності процесів в натурному зразку і його моделі необхідно виконати наступні умови:

- забезпечити геометричну подібність моделі і натурального зразка;
- забезпечити рівність визначальних критеріїв для протікають фізичних процесів в моделі і зразку;
- забезпечити подібність граничних і початкових умов.
- 

### Моделювання фізичних явищ

Нехай необхідно визначити характеристики стаціонарного конвективного теплообміну в каналі при малих числах Маха шляхом проведення досвіду на моделі. Для цього необхідно виконати наступні умови:

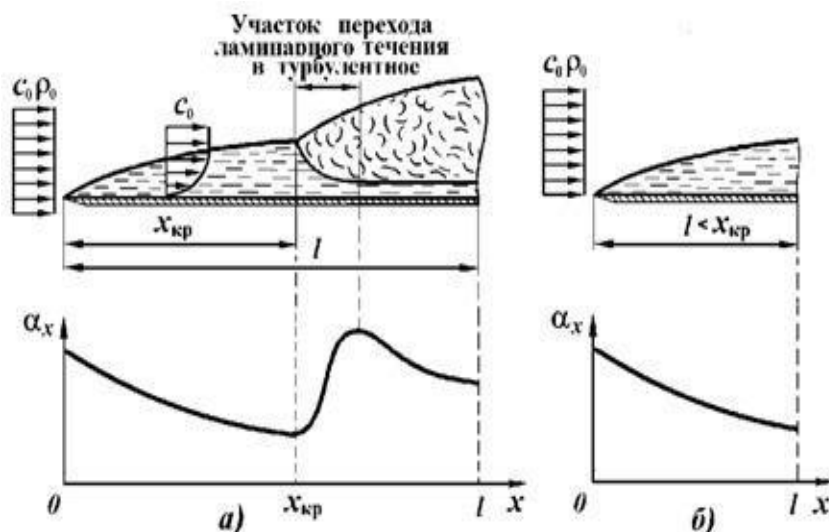
1. Модель повинна бути геометрично подібна натурному зразку;
2. При проведенні досвіду з моделлю необхідно забезпечити рівність визначальних критеріїв подібності на моделі і натурному зразку.

### 8.4 Тепловіддача при обтіканні плоскої пластини.

Конвективні теплообмін при вимушеній течії в каналах. Особливості теплообміну при русі газу з великою швидкістю

### Тепловіддача при обтіканні плоскої пластини

Розглянемо процес теплообміну для випадку, коли потік рідини або газу зі швидкістю  $c_0$ , температурою  $T_0$  і щільністю  $\rho_0$  обтікає плоску пластину (малюнок) під нульовим кутом атаки.





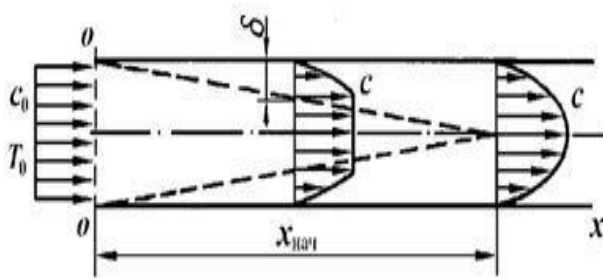
***Положення точки переходу ламінарного режиму течії в турбулентний залежить від швидкості, щільності і в'язкості набегаючих на пластину потоку, а також від рівня турбулентності в набігає потоці.***

Процеси теплообміну при турбулентному прикордонному шарі інтенсивніше, ніж при ламінарному. Тому ламінаризації потоку, тобто використання коштів, що сприяють збільшенню частки поверхні, покритої ламінарним шаром (збільшення довжини  $x_{кр}$ ), буде сприяти зменшенню тепловіддачі; турбулізація ж потоку, навпаки, сприяє підвищенню інтенсивності теплообміну.

### **Конвективний теплообмін при вимушеному перебігу в каналах**

Розглянемо випадок, коли протягом відбувається в круглій трубі, причому швидкість і температура потоку на вході в трубу рівномірні по перетину (рисунок). На стінках труби, через яку тече теплоносіє, утворюється прикордонний шар (штрихові лінії), який може бути ламінарним або турбулентним. Товщина прикордонного шару на стінці труби збільшується по довжині каналу і на деякій відстані від вхідного перетину  $x_{нач}$  він зникається, тобто заповнює весь поперечний переріз каналу. Починаючи з цього перетину, встановлюється стабільне (незмінне) розподіл швидкості теплоносія по перетину потоку. Відрізок довжиною  $x_{нач}$  від початку труби до цього перетину називається початковою ділянкою або ділянкою стабілізації.

На початковій ділянці змінюється і профіль температур. Якщо у вхідному перетині потік має постійну по перетину температуру  $T_0$ , то в міру віддалення від входу в теплообмін залучаються все нові верстви, поки не встановиться характерний профіль температури, який залежить від напрямку теплового потоку.



Якщо стінки каналів мають помітну шорсткість (висота горбків більше товщини ламінарного підшару) або забезпечені спеціальними турбулізаторами, то інтенсивність тепловіддачі буде вищою, що враховується за допомогою спеціальних поправочних коефіцієнтів.

### **Особливості теплообміну при русі газу з великою швидкістю**

При русі газового потоку з великою швидкістю процеси теплообміну



ускладнюються. Це пов'язано з тим, що в прикордонному шарі бла годаря сил в'язкості відбувається різке зменшення швидкості від максимального її значення в зовнішньому потоці до нуля на поверхні тіла. Великі градієнти швидкості поперек прикордонного шару призводять до виникнення значних сил тертя, робота яких переходить в теплоту. У цих умовах прикордонний шар можна розглядати як малу просторову область, в якій відбувається розігрів газу за рахунок дисипації кінетичний енергії. Збільшення температури газу призводить до відповідної зміни теплових потоків. Крім того, великі діапазони зміни температури газу в прикордонному шарі призводять до значних змін щільності, в'язкості, теплопровідності і теплоємності теплоносія,