

Міністерство освіти і науки України  
Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»

Кафедра \_\_\_\_\_ Аерокосмічної теплотехніки (№ 205) \_\_\_\_\_  
(назва кафедри)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Голова НМК**



(підпис)

**М. А. Шевцова**  
(ініціали та прізвище)

«31» серпня 2019 р.

**РОБОЧА ПРОГРАМА ОBOB'ЯЗКОВОЇ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**

**ГІДРОГАЗОДИНАМІКА**  
(назва навчальної дисципліни)

**Галузь знань** \_\_\_\_\_ 14 «Електрична інженерія» \_\_\_\_\_  
(шифр і найменування галузі знань)

**Спеціальність:** \_\_\_\_\_ 144 «Теплоенергетика» \_\_\_\_\_  
(код та найменування спеціальності)

**Освітня програма:** \_\_\_\_\_ «Енергетичний менеджмент». «Енергетичний менеджмент»  
(скорочена форма), «Комп'ютерно-інтегровані технології про-  
ектування енергетичних систем» (скорочена форма),  
«Теплофізика» \_\_\_\_\_  
(найменування освітньої програми)

**Форма навчання:** \_\_\_\_\_ **денна**

**Рівень вищої освіти:** \_\_\_\_\_ **перший (бакалаврський)**

**Харків 2019 рік**

Робоча програма по курсу  
для студентів за спеціальністю  
напряму підготовки

«Гідрогазодинаміка»  
(назва навчальної дисципліни)  
144 «Теплоенергетика»  
(шифр і назва спеціальності)  
«Енергетичний менеджмент». «Енергетичний менеджмент» (скорочена форма), «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування енергетичних систем» (скорочена форма), «Теплофізика»  
(шифр і назва напряму підготовки)

«26» червня 2019 р., – 26 стор.

Розробник: Амброжевич М. В., доцент кафедри аерокосмічної теплотехніки (205),

канд. техн. наук, доцент  
(прізвище та ініціали, посада, науковий ступінь та вчене звання)  (підпис)

Робочу програму розглянуто на засіданні каф. аерокосмічної теплотехніки (205)  
(назва кафедри)

Протокол №9 від «26» червня 2019 р.

Завідувач кафедри д-р техн. наук, доцент  
(науковий ступінь та вчене звання)  (підпис) П.Г. Гакал  
(ініціали та прізвище)

## 1. Опис навчальної дисципліни

| Найменування показників                                                                                             | Галузь знань, напрям підготовки, освітньо-кваліфікаційний рівень                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Характеристика навчальної дисципліни |                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
|                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | денна форма навчання                 |                                   |
| Кількість кредитів – 7,5                                                                                            | <div>Галузь знань<br/><u>14 «Електрична інженерія»</u><br/>(шифр і назва)</div> <div>Спеціальність:<br/><u>144 - «Теплоенергетика»</u><br/>(код та найменування)</div> <div>Освітні програми:<br/><u>«Енергетичний менеджмент».</u><br/><u>«Енергетичний менеджмент»</u><br/>(скорочена форма),<br/><u>«Теплофізика», «Комп’ютерно-інтегровані технології проектування енергетичних систем»</u><br/>(скорочена форма)<br/>(шифр і назва)</div> <div>Рівень вищої освіти:<br/><br/><u>перший (бакалаврський)</u></div> | Нормативна                           |                                   |
| Модулів – 2                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Навчальний рік:<br>2019/2019         |                                   |
| Змістових модулів – 2                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Семестр<br>4-й                       |                                   |
| Індивідуальне науково-дослідне завдання<br>- 1 РР:<br><u>Розрахунок сопла Лавалю з тепловою насадкою</u><br>(назва) |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                      |                                   |
| Загальна кількість годин – 225                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                      | Лекції<br>32 год.                 |
| Тижневих годин для денної форми навчання:<br><br>аудиторних – 5,0; 5,0<br><br>самостійної роботи студента – 9,06    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                      | Практичні, семінарські<br>16 год. |
|                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                      | Лабораторні<br>32 год.            |
|                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Самостійна робота<br>145 год.        |                                   |
|                                                                                                                     | Індивідуальні завдання:<br>30 год.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                      |                                   |
|                                                                                                                     | Вид контролю:<br>іспит                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                      |                                   |

Співвідношення кількості годин аудиторних занять до самостійної роботи становить:  
для денної форми навчання  $80/145=0,55$ .

## 2. Мета та завдання навчальної дисципліни

**Мета** – Мета вивчення – придбання знань, вмінь і навичок, що дозволять розробляти спрощені змістові та математичні моделі газодинамічних процесів у теплових двигунах.

**Завдання:** У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен мати базові знання в галузі гідрогазодинаміки та вміти їх використовувати.

### Знати:

- Наукову термінологію та базові поняття в галузі гідро газодинаміки.
- Методи експериментального вимірювання параметрів потоку.
- Фундаментальні закони та рівняння гідрогазодинаміки.
- Принципи створення математичних моделей течії суцільного середовища та головні припущення при їх створенні.
- Особистості течії газу з навколо звуковою та понад звуковою швидкістю; фізичні ефекти, що супроводжують таку течію; вплив геометрії каналу, в'язкості, теплообміну, розходу газу на параметри течії.
- Особистості розповсюдження ударної хвилі.
- Особистості формування і розвитку ламінарного, турбулентного і змішаного межового шару, та взаємодії межового шару зі стрибками.
- Метод характеристик.
- 

### Вміти: .....

- Експериментального вимірювання параметрів потоку газу.
- Використовувати таблиці і діаграми для розрахунку газотермодинамічних процесів.
- Складати систему рівнянь щодо розрахунку газового потоку у елементах теплового двигуна.
- Розраховувати одномірні дозвукові і надзвукові потоки із впливами (геометричним, розхідним, тепловим, механічним та в'язкістним). Аналізувати одержані результати.
- Розраховувати прямі і косі стрибка ущільнення, ударну хвилю.
- Розраховувати плоскі потенціальні течії газу.
- Розраховувати параметри потоку Прандтля-Майєра.
- 

### Програмні результати навчання.

У результаті вивчення навчальної дисципліни студент буде здатен:

- вміти переказати характерні фізичні властивості рідин і газів, параметри, якими вони описуються, їхні одиниці вимірювання.
- експериментально вимірювати основні параметри потоку газу.
- оцінювати точність вимірів, знаходити похибку виміру.
- знати фізичні моделі деформованого середовища, параметрами стану та рівняння стану рідини і газу.
- використовувати таблиці і діаграми для розрахунку типових газотермодинамічних процесів.
- вміти записувати рівняння газової динаміки для одиначної цівки — стаціонарні і не-стаціонарні: рівняння нерозривності, рівняння кількості руху, рівняння моментів кількості руху, рівняння енергії, відповідно, у інтегральному і дивергентному вигляді, у безрозмірному вигляді, за допомогою газодинамічних функцій  $\tau(\lambda)$ ,  $\pi(\lambda)$ ,  $\varepsilon(\lambda)$ ,  $q(\lambda)$ ,  $z(\lambda)$ ,  $\chi(\lambda)$ ,  $y(\lambda)$ , etc.

- Вміти використовувати рівняння Христиановича для аналізування характеру змін властивостей параметрів потоку.
- записувати зв'язок між напругами та деформаціями щодо деформованого середовища.
- записувати рівняння Нав'є-Стоксу.
- вміти записувати систему рівнянь газової динаміки для найпростіших об'єктів: сопла Лавалля та міжлопаткового каналу, «теплової труби», камери згоряння, каналу, по якому тече в'язкий газ («труби з тертям»).
- вміти записувати систему рівнянь газової динаміки для прямого і косого стрибків ущільнення.
- вміти записувати систему рівнянь газової динаміки для ударної хвилі у відносній і абсолютній системі координат.
- вміти записувати зв'язок збільшення ентропії з коефіцієнтом встановлення повного тиску для реальних потоків рідини та газу.
- використовуючи гідравлічний підхід, що приводить 2-х і 3-х мірні задачі прикладної гідрогазодинаміки до одновимірного вигляду, розраховувати шляхові та місцеві втрати для складних гідравлічних систем.
- Розраховувати реактивну силу (силу тяги).
- Розраховувати одномірні дозвукові та надзвукові потоки із впливами (геометричним, розхідним, тепловим, механічним та в'язкістним). Аналізувати одержані результати.
- Розраховувати прямі та косі стрибка ущільнення.
- розраховувати параметри потоку за фронтом ударної хвилі.
- розраховувати плоскі потенціальні течії газу.
- розраховувати параметри потоку Прандтля-Майєра.
- розраховувати розпад розриву.
- розраховувати типові елементи і об'єкти прикладної гідрогазодинаміки: струминний насос (ежектор), параметри потоку газу і пари за дроселем, характеристики затопленого струменя, параметри потоку на зрізі сопла Лавалю та за ним на нерозрахунковому режимі.
- розраховувати силову взаємодію одиничного профілю та решітки профілів з дозвуковим і надзвуковим потоком в двовірній постановці, використовуючи 1) закон збереження імпульсу, 2) метод конформних відображень, 3) теорему Жуковського.
- 

**Міждисциплінарні зв'язки:** вища математика, фізика, хімія, технічна термодинаміка.

### 3. Програма навчальної дисципліни

#### Зміст робочої програми

#### Змістовий модуль № 1

#### «Концептуально-методологічний базис гідрогазодинаміки. Одновимірна теорія течій газу»

#### Лекційні заняття

**ТЕМА 1. Основні поняття гідрогазодинаміки. Гіпотеза суцільності. Фізичні моделі деформованого середовища.**

Фізичні властивості рідин і газів. Фізичні моделі деформованого середовища, параметрами стану та рівняння стану рідини і газу. Поняття суцільного середовища. Механічні, термодинамічні та переносні характеристики континууму. Швидкість деформації як головний критерій для класифікації стану тіл (твердих, рідких, газоподібних).

**ТЕМА 2. Кінематика рідини і газу. Кінематичні характеристики середовища, що рухається.**

Методи Лагранжа і Ейлера вивчення руху суцільного середовища. Різниця понять координат в підходах Лагранжа і Ейлера. Змінні Лагранжа. Координати в підході Ейлера. Поняття контрольної маси і контрольного обсягу. Поняття траєкторії і лінії струму, рівняння траєкторії і лінії струму. Поняття поля швидкостей і прискорень, ротора, дивіргенції і градієнта швидкості. Зв'язок субстанціональної, локальної і конвективної похідних. Трубка струму, цівка струму, інтенсивність цівки. Циркуляція швидкості по контуру. Щільність потоку маси. Вихрова лінія, вихрова трубка, вихровий шнур, інтенсивність вихрового шнура. Оператор Гамільтона. Формула Стокса. Формула Остроградського-Гаусса. Тензор швидкостей деформацій. Розкладання тензора на симетричний і антисиметричний. Розкладання загального руху на найпростіші: обертальний рух, деформацію розтягування-стиснення і деформацію чистого зсуву. Перша та друга теореми Гельмгольца.

**ТЕМА 3. Фундаментальні закони та рівняння гідрогазодинаміки.**

Сутність універсального закону збереження субстанції (маси, імпульсу й енергії) у макросвіті. Формулювання його для континууму відносно маси, імпульсу й енергії. Рівняння нерозривності, руху та енергії. Окремі випадки рівнянь збереження (одновимірна, стаціонарна течія рідини та газу). Приклади для рівняння руху в різному вигляді (рівняння Ейлера, рівняння Нав'є-Стоксу, рівняння руху у напругах, узагальнений закон Ньютона). Система рівнянь гідрогазодинаміки на базі рівнянь нерозривності, руху та енергії. Гіпотези замикання. Умови одновизначеності. Методи розв'язання крайової задачі гідрогазодинаміки. Критеріальні числа та критеріальні рівняння.

**ТЕМА 4. Одновимірна теорія течій газу. Рівняння одновимірних течій газу.**

Одновимірні рівняння газодинаміки. Модифікація їх для урахування впливів. Критерії подібності одновимірних течій газу. Повні і статичні параметри потоку. Характерні швидкості та зони течії газу. Коефіцієнти швидкості (безрозмірні швидкості  $M$ ,  $\lambda$ ,  $\Lambda$ ).

**ТЕМА 5. Газодинамічні функції.**

Газодинамічні функції температури, тиску, густини. Газодинамічні функції витрати та імпульсу. Рівняння Християновича. Вираз для потоку повного імпульсу взагалі і у випадку одновимірного потоку газу. Запис системи одновимірних рівнянь через газодинамічні функції та повні параметри.

**ТЕМА 6. Математична модель прямого стрибка і ударної хвилі.**

Схема формування прямого стрибка ущільнення і ударної хвилі. Умови динамічної сумісності та робочі формули для прямого стрибка. Схема формування ударної хвилі. Умови динамічної сумісно-

сті та робочі формули для прямого стрибка. Ударна адіабата. Визначення параметрів газу за ударною хвилею. Теорема Цемплена.

#### **ТЕМА 7. Закон оберненості впливу.**

Рівняння і формулювання закону оберненості впливу. Наслідки закону. Криза течії. Вплив її на витрату газу.

#### **ТЕМА 8. Течії газу із впливами. Геометричний вплив. Тепловий вплив. Вплив в'язкості газу. Механічний та витратний вплив на потік.**

Вплив зміни площі перерізу на параметри енергоізованого потоку газу. Основне рівняння течії. Схема розрахунку розподілу параметрів газу вздовж простого сопла і сопла Лавалю. Режими роботи цих сопел. Вплив теплообміну на течію нев'язкого газу в каналі незмінного перерізу. Основне рівняння течії в «трубі з теплообміном» і схема розрахунку розподілу параметрів газу вздовж неї. Поведінка потоку в разі передачі закритичної кількості теплоти. Вплив в'язкості газу на адіабатну течію його в каналі незмінного перерізу. Основне рівняння течії в «трубі з тертям» і схема розрахунку розподілу параметрів газу вздовж неї. Поведінка потоку в разі закритичної довжини труби. Механічний та витратний вплив на потік. Комбінований вплив.

#### **Практичні заняття**

1. Основні закони газової динаміки.
2. Формула взаємодії потоку газу з соплом чи колектором теплового двигуна.
3. Газодинамічний розрахунок течій в трубах з використанням одновимірної теорії.
4. Профілювання вихідної частини плоского сопла Лавалю.
5. Профілювання вихідної частини плоского сопла Лавалю.
6. Визначення параметрів газу в надзвуковому струмені.
7. Розрахунок впливу теплообміну на течію нев'язкого газу в каналі незмінного перерізу.
8. Розрахунок прямих і косих стрибків.

#### **Лабораторні заняття.**

1. Методи вимірювання параметрів потоку.
2. Режими течії (число Рейнольдса)
3. Втрати повного тиску в соплах Лавалю.
4. Знаходження коефіцієнту тиску на поверхні циліндру (Реальне обтікання кругового циліндру).
5. Решітка профілів.

#### **Самостійна робота.**

Сутністю самостійної роботи над матеріалом модулю є опрацювання лекційних тем за допомогою підручників та формулювання відповідей на запитання з цих тем, що задає викладач у поточному режимі. Самостійна робота містить також підготовку до практичних занять і модульного контролю.

#### **Індивідуальна робота**

Виконання розрахункових робіт на тему «Газодинамічне проектування елементу теплового двигуна (сопла Лавалю) з тепловим напівсоплом».

## Змістовий модуль № 2

### «Двовимірні моделі газових потоків у каналах»

#### Лекційні заняття

##### ***ТЕМА 9. Плоский безвихровий рух ідеальної нестисливої рідини.***

Умови існування безвихрових течій. Потенціал швидкості і його визначення по заданому полю швидкостей. Інтеграл Лагранжа-Коші. Застосування функцій комплексного змінного для опису плоского безвихрового руху нестисливої рідини. Комплексний потенціал і його складові: ізопотенціальні лінії і лінії струму. Комплексні потенціали деяких найпростіших потоків. Метод накладення потоків. Поняття особливостей.

##### ***ТЕМА 10. Метод конформних відображень. Формула Жуковського для підйомної сили. Приклади використання метода конформних відображень.***

Метод конформних відображень і його застосування для рішення деяких задач обтікання тіл довільної форми потоком ідеальної рідини. Гідродинамічний сенс конформних відображень. Обтікання кута. Обтікання довільного контуру. Метод годографу. Формула Чаплигіна. Постулат Жуковського-Чаплигіна. Формула Жуковського для підйомної сили. Приклади використання метода конформних відображень (обтікання еліпсу і пластини). Індуктивний опір крила кінцевого розмаху. Вихровий опір профілю.

##### ***ТЕМА 11. Метод малих збурень. Лінеаризований надзвуковий потік.***

Особливості опису плоских потенціальних течій газу. Лінеаризація рівняння потенціалу швидкості. Система рівнянь для лінеаризованих потоків. Різниця між дозвуковими і надзвуковими течіями газу. Надзвукова течія в каналі змінного перерізу або напрямку. Відбиття і перетин лінеаризованих хвиль. Схема витікання газу із сопла Лавалю (мале відхилення від розрахункового режиму).

##### ***ТЕМА 12. Кінцеві збурення в надзвукових потоках.***

Метод характеристик. Течія Прандтля-Майєра. Косі стрибки. Умови динамічної сумісності та робочі формули для косих стрибків. Взаємодія стрибків з твердою поверхнею, з межею струменя, між собою та з хвилями розширення. Схема надзвукового струменя з високим ступенем нерозрахунковості.

##### ***ТЕМА 13. Межовий шар у газі.***

Ламінарний, турбулентний і змішаний межовий шар на плоскій стінці. Вплив стисливості та продольного градієнту тиску. Взаємодія межового шару зі стрибками. Струменевий межовий шар.

#### Практичні заняття

немає

#### Лабораторні заняття.

6. Шляхові гідравлічні втрати у каналі.
7. Місцеві гідравлічні втрати у каналі.
8. Взаємодія твердого тіла з надзвуковим потоком.
9. Розподіл швидкості в газовому струмені.
10. Ежектор.

#### Самостійна робота.

Сутністю самостійної роботи над матеріалом модулю є опрацювання лекційних тем за допомогою підручників та формулювання відповідей на запитання з цих тем, що задає викладач у поточному режимі. Самостійна робота містить ще підготовку до практичних занять і модульного контролю.

## 4. Структура навчальної дисципліни

| Назви змістових модулів і тем                                                                                                       | Кількість годин |              |           |             |               |                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------|-----------|-------------|---------------|-------------------|
|                                                                                                                                     | денна форма     |              |           |             |               |                   |
|                                                                                                                                     | усього          | у тому числі |           |             |               |                   |
|                                                                                                                                     |                 | лекції       | практичні | лабораторні | індивідуальна | самостійна робота |
| 1                                                                                                                                   | 2               | 3            | 4         | 5           | 6             | 7                 |
| <b>Змістовий модуль 1</b><br><b>«Концептуально-методологічний базис гідрогазодинаміки.</b><br><b>Одновимірна теорія течії газу»</b> |                 |              |           |             |               |                   |
| 1. Предмет і метод дисципліни та її значення для формування розробника теплових двигунів. Гіпотеза суцільності.                     | 4               | 1            | —         | —           | —             | 3                 |
| 2. Кінематика рідини і газу                                                                                                         | 20              | 2            | 2         | 4           | —             | 12                |
| 3. Фундаментальні закони та рівняння                                                                                                | 26              | 4            | 2         | 8           | 4*            | 12                |
| 4. Рівняння одновимірних течій газу                                                                                                 | 30              | 4            | 2         | 4           | 6*            | 20                |
| 5. Газодинамічні функції                                                                                                            | 20              | 4            | 4         | 2           | 6*            | 12                |
| 6. Математична модель прямого стрибка                                                                                               | 19              | 3            | 2         | 2           | 4*            | 12                |
| 7. Закон оберненості впливу                                                                                                         | 14              | 2            | —         | —           | 4*            | 12                |
| 8. Течії газу із впливами                                                                                                           | 20              | 2            | 2         | 4           | 6*            | 12                |
| модульний контроль                                                                                                                  | 2               |              |           |             |               |                   |
| <b>Разом</b>                                                                                                                        | <b>157</b>      | <b>22</b>    | <b>14</b> | <b>24</b>   | <b>30*</b>    | <b>95</b>         |
| <b>Змістовий модуль 2</b><br><b>«Двовимірні моделі газових потоків у каналах»</b>                                                   |                 |              |           |             |               |                   |
| 9. Плоский безвихровий рух ідеальної нестисливої рідини                                                                             | 16              | 2            | —         | 4           | —             | 10                |
| 10. Метод конформних відображень                                                                                                    | 12              | 2            | —         | —           | —             | 10                |
| 11. Метод малих збурень. Лінеаризований надзвуковий потік                                                                           | 15              | 1            | —         | 4           | —             | 10                |
| 12. Кінцеві збурення в надзвукових потоках                                                                                          | 11              | 1            | —         | —           | —             | 10                |
| 13. Межовий шар у газі                                                                                                              | 12              | 2            | —         | —           | —             | 10                |
| модульний контроль                                                                                                                  | 2               |              |           |             |               |                   |
| <b>Разом</b>                                                                                                                        | <b>68</b>       | <b>8</b>     | <b>0</b>  | <b>8</b>    | <b>0</b>      | <b>50</b>         |
| <b>РАЗОМ З ДИСЦИПЛІНИ</b>                                                                                                           | <b>225</b>      | <b>30</b>    | <b>16</b> | <b>32</b>   | <b>30*</b>    | <b>145</b>        |

\* — в розрахунках не враховується

### 5. Теми семінарських занять – не передбаченні

| № з/п | Назва теми | Кількість годин |
|-------|------------|-----------------|
| 1     |            |                 |

### 6. Теми практичних занять

| № з/п | Назва теми                         | Кількість годин |
|-------|------------------------------------|-----------------|
| 1     | Закони Архімеда, Паскаля, Бернуллі | 2               |
| 2     | Кінематика рідини і газу           | 2               |
| 3     | Фундаментальні закони та рівняння  | 2               |
| 4     | Рівняння одновимірних течій газу   | 2               |
| 5     | Газодинамічні функції              | 2               |
| 6     | Математична модель прямого стрибка | 2               |
| 8     | Течії газу із впливами             | 2               |
|       | <b>Разом</b>                       | <b>14</b>       |

### 7. Теми лабораторних занять

| № з/п | Назва теми                                            | Кількість годин |
|-------|-------------------------------------------------------|-----------------|
| 1     | Вимірювання швидкості потоку пневмоприймачами.        | 2               |
| 2     | Силовий вплив потоку на решітку профілів.             | 4               |
| 3     | Вивчення особливостей руху газу в ежекторі            | 4               |
| 4     | Режими течії в'язкої рідини в трубах.                 | 4               |
| 5     | Шляхові гідравлічні втрати у каналі.                  | 4               |
| 6     | Місцеві гідравлічні втрати у каналі.                  | 4               |
| 7     | Порівняння дійсного обтікання циліндра з потенційним. | 2               |
| 8     | Вивчення обтікання тіл плоским надзвуковим потоком.   | 2               |
| 9     | Розподіл швидкості в газовому струмені.               | 4               |
| 10    | Втрати повного тиску в соплах Лавалю.                 | 2               |
|       | <b>Разом</b>                                          | <b>32</b>       |

### 8. Самостійна робота

| № з/п | Назва теми.                                                                            | Кількість годин |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 1     | ТЕМА 1. Гіпотеза суцільності                                                           | 3               |
| 2     | ТЕМА 2. Кінематика рідини і газу. Кінематичні характеристики середовища, що рухається. | 12              |
|       | ТЕМА 3. Фундаментальні закони та рівняння                                              | 12              |
| 3     | ТЕМА 4. Рівняння одновимірних течій газу                                               | 20              |
| 4     | ТЕМА 5. Газодинамічні функції                                                          | 12              |
| 5     | ТЕМА 6. Математична модель прямого стрибка і ударної хвилі                             | 12              |
| 6     | ТЕМА 7. Закон оберненості впливу                                                       | 12              |
| 7     | ТЕМА 8. Течії газу із впливами                                                         | 12              |
|       | ТЕМА 9. Плоский безвихровий рух ідеальної нестисливої рідини.                          | 10              |
| 8     | ТЕМА 10. Метод малих збурень                                                           | 10              |
| 9     | ТЕМА 11. Лінеаризований надзвуковий потік.                                             | 10              |
| 10    | ТЕМА 12. Кінцеві збурення в надзвукових потоках                                        | 10              |
| 11    | ТЕМА 13. Межовий шар у газі                                                            | 10              |
|       | <b>Разом</b>                                                                           | <b>145</b>      |

## 9. Індивідуальні завдання

Учебний план передбачає виконання в якості індивідуального завдання розрахункову роботу на тему «Газодинамічне проектування елементу теплового двигуна (сопла Лавалю) з тепловим напівсоплом». Витрати часу на їх виконання складають **30 академічних годин** відповідно за рахунок обсягу самостійної роботи (**145 годин**). Результати виконання робіт студент подає у вигляді пояснювальних записок обсягом біля 10...15 сторінок.

В розрахунковій роботі на тему «Газодинамічне проектування елементу теплового двигуна (сопла Лавалю) з тепловим напівсоплом» студенти обчислюють термодинамічні та кінематичні параметри дозвукового та надзвукового потоку газу (повітря) у соплі Лавалю та тепловому напів-соплі.

Вхідні дані розрахункової роботи:

- витрата газу через конічне сопло Лавалю  $G$ ;
- повна температура газу на вході в сопло  $T_1^0$ ;
- повний тиск газу на вході в сопло  $P_1^0$ ;
- протитиск на зрізі сопла  $P_2$ ;
- швидкість газу на вході в сопло  $w_1$  (або  $M_1$ , або  $\lambda_1$ );
- кути конусності сопла  $\theta_1$  і  $\theta_2$ ;
- фізичні властивості газу, а саме, його газова постійна  $R$  і показник адіабати  $k$  (замість газової постійної  $R$  може бути задана його удельна ізобарна теплоємність  $c_p$ );
- швидкість газу на виході з теплового напів-сопла  $\lambda_3$ .

Треба: Розрахувати геометрію сопла на розрахунковому режимі в припущенні одномірності, стаціонарності, адіабатності і оборотності течії. Розрахувати надзвукову течію уздовж теплового напів сопла. Розрахувати прямий стрибок ущільнення, якій розташований на зрізі сопла Лавалю перез входом до теплового напівсопла. Розрахувати дозвукову течію уздовж теплового напів сопла після стрибку ущільнення.

Побудувати епюри температури, тиску, щільності, швидкості, швидкості звуку, критичної швидкості, потоку повного імпульсу вздовж осі сопла Лавалю та теплового напів-сопла для випадку відсутності прямого стрибка ущільнення на вході у тепловий насадок і для випадку наявності стрибка.

Роботу виконують протягом сьомого – тринадцятого тижнів четвертого семестру; на чотирнадцятому тижні призначений її прийом. Бали за розрахункову роботу нараховують згідно якості та своєчасності її виконання.

## 10. Методи навчання

Навчання проводиться в аудиторній формі (лекції, практичні заняття, лабораторні роботи, консультації), та самостійно.

## 11. Методи поточного контролю

Контроль виконується у вигляді поточного семестрового контролю під час здачі змістовних модулів і розрахункових робіт та спілкування зі студентами під час проведення практичних занять і консультацій.

## 12. Методи контролю

Контроль знань студентів здійснюється з допомогою:

- 1) підсумкових письмових контрольних роботах по тематиці змістових модулів;
- 2) перевірки виконання індивідуального розрахункового завдання
- 3) перевірки виконання завдань, що виконуються на лабораторних заняттях;
- 4) письмових екзаменаційних завдань.

### 12.1 Критерії оцінювання та розподіл балів, які отримують студенти

Розподіл балів, які отримують студенти (кількісні критерії оцінювання)

| Складові навчальної роботи              | Бали за одне заняття (завдання) | Кількість занять (завдань) у годинах | Сумарна кількість балів |
|-----------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| <b>Змістовний модуль 1</b>              |                                 |                                      |                         |
| Робота на лекціях                       | 0,25...0,5                      | 22                                   | 5,5...11                |
| Робота на лабораторних заняттях         | 0,25...0,5                      | 16                                   | 4...8                   |
| Робота на практичних заняттях           | 0,25...0,5                      | 16                                   | 4...8                   |
| Модульний контроль                      | 13...20                         | 1                                    | 13...20                 |
| <b>Змістовний модуль 2</b>              |                                 |                                      |                         |
| Робота на лекціях                       | 0,25...0,5                      | 10                                   | 2,5...5                 |
| Робота на лабораторних заняттях         | 0,25...0,5                      | 16                                   | 4...8                   |
| Робота на практичних заняттях           | 0,25...0,5                      | 0                                    | 0...0                   |
| Виконання і захист розрахункової роботи | 14...20                         | 1                                    | 14...20                 |
| Модульний контроль                      | 13...20                         | 1                                    | 13...20                 |
| <b>Усього за семестр</b>                |                                 |                                      | <b>60...100</b>         |

**За розрахункову роботу** студент в залежності від якості виконання роботи, основної відповіді та відповідей на запитання у усній формі отримує наступні оцінки:

- «задовільно» – робота виконана та оформлена, студент відповідає на питання, які відносяться до роботи з помилками, але логіка відповідей правильна – 14 балів.
- «добре» – робота виконана та оформлена, студент відповідає на питання з незначними помилками – 17 балів.
- «відмінно» – робота виконана та оформлена, студент відповідає на питання – 20 бала.

**Поточний контроль** здійснюється у формі занять за розкладом (практичні заняття, здача лабораторних робіт та розрахункової роботи) і формі поточних зрізів (відповідь на контрольні запитання двох модулів). Останній вид контролю є домінуючим, що приймається до уваги під час оцінки засвоєння студентом матеріалу модуля і дисципліни у цілому.

Поточний зріз потребує відповіді на повну кількість запитань: 3 запитання і 1 невелика задача під час зрізу по 1 і 2 модулю.

**Підсумковий контроль:** семестровий контроль (іспит) проводиться у разі відмови студента від балів поточного тестування й за наявності допуску до іспиту, тобто якщо він виконав і захистив **розрахункову і лабораторні** роботи, передбачені навчальним планом. Здійснюється

ся в кінці семестру у формі іспиту (по білетах з контрольними запитаннями). Екзаменаційні білети складаються з **5 питань**, два з яких мають практичний ухил відповідно до обчислення параметрів газових потоків. Максимальна сума балів за теоретичні запитання є 60, за практичні – 40 балів.

**Оцінку** виставляють беручи до уваги рейтинг студента і рівень знань, що був показаний під час поточних зрізів. Рейтинг студента визначається загальною кількістю набраних ним балів; рівень знань під час поточного зрізу – кількістю балів, одержаних на зрізі. За згодою студента екзаменаційна оцінка може бути виставлена лише на основі вказаних показників (без здачі іспиту, як такого).

**Допуском до іспиту є виконання та захист розрахункової роботи.**

Під час складання семестрового іспиту студент має можливість отримати максимум **100** балів.

## 12.2 Якісні критерії оцінювання

Для отримання позитивної оцінки студент повинен отримати знання, які дозволять розробляти розрахунки газодинамічних процесів в теплоенергетичних об'єктах.

**Студент повинен вміти:**

- вміти переказати характерні фізичні властивості рідин і газів, параметри, якими вони описуються, їхні одиниці вимірювання.
- експериментально вимірювати основні параметри потоку газу.
- оцінювати точність вимірів, знаходити похибку виміру.
- знати фізичні моделі деформованого середовища, параметрами стану та рівняння стану рідини і газу.
- використовувати таблиці і діаграми для розрахунку типових газотермодинамічних процесів.
- вміти записувати рівняння газової динаміки для одиначної цівки — стаціонарні і не-стаціонарні: рівняння нерозривності, рівняння кількості руху, рівняння моментів кількості руху, рівняння енергії, відповідно, у інтегральному і дивергентному вигляді, у безрозмірному вигляді, за допомогою газодинамічних функцій  $\tau(\lambda)$ ,  $\pi(\lambda)$ ,  $\varepsilon(\lambda)$ ,  $q(\lambda)$ ,  $z(\lambda)$ ,  $\chi(\lambda)$ ,  $y(\lambda)$ , *etc.*
- Вміти використовувати рівняння Християновича для аналізування характеру змін властивостей параметрів потоку.
- записувати зв'язок між напругами та деформаціями щодо деформованого середовища.
- записувати рівняння Нав'є-Стоксу.
- вміти записувати систему рівнянь газової динаміки для найпростіших об'єктів: сопла Лавала та міжлопаткового каналу, «теплової труби», камери згоряння, каналу, по якому тече в'язкий газ («труби з тертям»).
- вміти записувати систему рівнянь газової динаміки для прямого і косого стрибків ущільнення.
- вміти записувати систему рівнянь газової динаміки для ударної хвилі у відносній і абсолютній системі координат.
- вміти записувати зв'язок збільшення ентропії з коефіцієнтом встановлення повного тиску для реальних потоків рідини та газу.
- використовуючи гідравлічний підхід, що приводить 2-х і 3-х мірні задачі прикладної гідрогазодинаміки до одновимірного вигляду, розраховувати шляхові та місцеві втрати для складних гідравлічних систем.
- Розраховувати реактивну сили (силу тяги).
- Розраховувати одновірні дозвукові та надзвукові потоки із впливами (геометричним, розхідним, тепловим, механічним та в'язкістним). Аналізувати одержані результати.

- Розраховувати прямі та косі стрибка ущільнення.
- розраховувати параметри потоку за фронтом ударної хвилі.
- розраховувати плоскі потенціальні течії газу.
- розраховувати параметри потоку Прандтля-Майєра.
- розраховувати розпад розриву.
- розраховувати типові елементи і об'єкти прикладної гідрогазодинаміки: струминний насос (ежектор), параметри потоку газу і пари за дроселем, характеристики затопленого струменя, параметри потоку на зрізі сопла Лавалю та за ним на нерозрахунковому режимі.
- розраховувати силову взаємодію одиничного профілю та решітки профілів з дозвуковим і надзвуковим потоком в двовірній постановці, використовуючи 1) закон збереження імпульсу, 2) метод конформних відображень, 3) теорему Жуковського.
- 

### 12.3 Критерії оцінювання роботи студента протягом семестру

**Задовільно (60-74).** Показати мінімум знань та умінь. Захистити розрахункову роботи та здати тестування.

Вміти експериментально вимірювати основні параметри потоку рідини і газу. Вміти переказати характерні фізичні властивості рідини і газу, параметри, якими вони описуються, їхні одиниці вимірювання. Мати уявлення про особливості розрахунку і уміти записувати систему рівнянь газової динаміки для найпростіших об'єктів: сопла Лавалю та міжлопаткового каналу, «теплової труби», камери згоряння, каналу, по якому тече в'язкий газ («труби з тертям») у одновимірному вигляді, а також системи рівнянь для прямого і косого стрибків ущільнення. Знати сутність гідрравлічного підходу. Знати основні теореми теорії подібності та розмінностей. Знати газодинамічні функції.

**Добре (75-89).** Твердо знати мінімум. Захистити розрахункову роботу та здати тестування.

Уміти експериментально вимірювати основні параметри потоку газу і оцінювати точність вимірів, знаходячи похибку виміру. Мати уявлення про особливості розрахунку прямих і косих стрибків ущільнення, параметрів потоку за фронтом ударної хвилі, потоку Прандтля-Майєра, розпаду розриву. Вміти записувати основні рівняння газової динаміки у інтегральному і дивергентному вигляді, у одновимірному та багатовимірному підході — стаціонарні і нестаціонарні, а саме: рівняння нерозривності, рівняння кількості руху, рівняння моментів кількості руху, рівняння енергії. Уміти розраховувати типові елементи і об'єкти теплоенергетики: струминний насос (ежектор), параметри потоку газу і пари за дроселем, характеристики затопленого струменя, параметри потоку на зрізі сопла Лавалю та за ним на нерозрахунковому режимі. Вміти застосовувати газодинамічні функції у розрахунках.

**Відмінно (90-100).** Здати всі контрольні позиції з оцінкою «відмінно». Досконально знати всі теми та уміти застосовувати теоретичні знання на практиці.

### Шкала оцінювання: бальна і традиційна

| Сума балів      | Оцінка за традиційною шкалою  |               |
|-----------------|-------------------------------|---------------|
|                 | Іспит, диференційований залік | Залік         |
| <b>90 – 100</b> | Відмінно                      | Зараховано    |
| <b>75 – 89</b>  | Добре                         |               |
| <b>60 – 74</b>  | Задовільно                    |               |
| <b>0 – 59</b>   | Незадовільно                  | Не зараховано |

### 13. Методичне забезпечення

1. Амброжевич, М.В. Газодинамические функции и их использование в решении задач газовой динамики [электронный ресурс]: учеб. пособие / М.В. Амброжевич, В.А. Середа. – Х.: электронная библиотека Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «Харьк.авиаци. ин-т», 2012. – 138 с.
2. Блинков В.Н., Горбенко Г.А., Костиков А.О. Теоретические основы аэрокосмической теплотехники. Ч. 2. Основы гидрогазодинамики объектов аэрокосмической техники. — Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т, 2004. – 132 с.
3. Гидрогазодинамика: Учеб. пособие по лабораторному практикуму / Под ред. О.Н. Костилова. — Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1989. – 78 с.
4. Мунштуков Д.А. Субстанциональные формы закона сохранения импульса для потока идеальной жидкости и их приложение. Учебное пособие.— Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1979. – 52 с.
5. Мунштуков Д.А. Интегральные формы законов сохранения импульса и момента количества движения для потоков жидкости и их использование. Учебное пособие.— Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1979. – 68 с.
6. Мунштуков Д.А. Дивергентные формы уравнений, описывающих движение среды в турбомашинах. Учебное пособие.— Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1995. – 73 с.
7. Мунштуков Д.А. Особенности одномерных стационарных движений жидкости и газа. Учебное пособие.— Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1980. – 76 с.
8. Мунштуков Д.А. Особенности описания течения вязкой сжимаемой жидкости. Учебное пособие по курсу «Гидрогазодинамика».— Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1980. – 56 с.
9. Мунштуков Д.А. Теория подобия и размерностей в гидрогазодинамике. Учебное пособие.— Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1995. – 56 с.
10. Борисенко А.И. Гидрогазодинамика (Конспект лекций). — Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1975. – 71 с.

### 14. Рекомендована література.

#### 14.1 Базова література.

1. Борисенко А. И. Газовая динамика двигателей. – М.: Оборонгиз, 1962. – 794с.
2. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. В 2-х ч. Учеб. руководство: Для втузов.– 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. – 600 с и 304 с. — ISBN 5-02-014015-5 и ISBN 5-02-014962-4.
3. Атанов Г. А. Газовая динамика: Учеб пособие. – К.: Выща школа, 1991. – 359 с.: ил.
4. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. – 5-е изд., перераб. и доп.– М.: Наука, 1978. – 736 с.
5. Черный Г. Г. Газовая динамика: Учебник для университетов и втузов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 424 с. – ISBN 5-02-013814-2.

#### 14.2 Допоміжна література.

6. Седов Л. И. Механика сплошной среды: В 2-х т. – М., 1983 и 1984.
7. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, 1964. – 814 с.
8. Повх И. Л. Техническая гидромеханика. 2-е изд., доп. – Л.: «Машиностроение», 1976. – 504 с. с ил.
9. Овсянников Л. В. Лекции по основам газовой динамики. – М.: Наука, 1981.

10. Дейч М. Е., Зарянкин А.Е. Гидрогазодинамика: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 384 с., ил.
11. Сергель О. С. Прикладная гидрогазодинамика. – М.: Машиностроение, 1981. – 376с.
12. Шашин В.М. Гидромеханика: Учеб. для техн. вузов. – М.: Высшая шк., 1990. – 384 с. с ил. ISBN 5-06-000707-3.
13. Некрасов Б. Б. Гидравлика и её применение на летательных аппаратах. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1967. – 368 с.
14. Вулис Л. А. Термодинамика газовых потоков. – М.: Энергия, 1960. – 303 с.
15. Бекнев В. С., Панков О.М., Янсон Р.А. Газовая динамика газотурбинных и комбинированных установок. – М.: Машиностроение, 1973. – 392 с.
16. Константинов Ю. М. Гидравлика: Учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Выща шк., Головное изд-во, 1988. – 398 с., ил. ISBN 5-11-000072-7.
17. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. – М.: изд-во иностр. лит., 1949. – 520 с.
18. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1969. – 742 с.
19. Степчиков А. А. Задачник по гидрогазовой динамике. – М.: Машиностроение, 1980. – 180 с.
20. Самойлович Г. С., Нитусов В.В. Сборник задач по гидроаэромеханике. – М.: Машиностроение, 1986. – 152 с., ил.

#### 14.3

#### Інформаційні ресурси

1. Бібліотека НАКУ «ХАІ».
2. Методичний кабінет кафедри.
3. Мережа Internet.
4. Сайт кафедри [www.k205.khai.edu](http://www.k205.khai.edu)

Програму склала к.т.н., доц. каф. 205

М. В. Амброжевич.

## 15. КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ З НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

### Модуль 1

1. Як Ви розумієте поняття «суцільне середовище»? Наведіть приклади. У чому полягає гіпотеза суцільності?
2. Якими параметрами характеризується стисливість середовища, плинність середовища? Як вводяться коефіцієнти стисливості і пружності; кінематичної і динамічної в'язкості? Вкажіть одиниці їх вимірювання.
3. Зв'язок швидкості звуку і модуля пружності середовища. Написати формулу для швидкості поширення слабких збурень в суцільному середовищі (формулу швидкості звуку). Чи залежить швидкість звуку від швидкості самого середовища, якщо так, то яким чином? Чому дорівнює швидкість звуку в нестисливому середовищі?
4. Що називається ідеальною рідиною? Чи можна вважати повітря ідеальною рідиною? А воду?
5. Запишіть закон Ньютона для в'язкої середовища. Запишіть закон Паскаля. Запишіть закон Бернуллі.
6. Підходи Ейлера і Лагранжа опису руху рідини і газу.
7. Повна, локальна та конвективна похідні зміни параметрів за часом. Яка з цих похідних називається ейлеровою, яка лагранжевою? Зв'язок ейлерової і лагранжевої похідних.
8. Поділ сил на поверхневі і об'ємні. Що називається об'ємною щільністю сили, питомою силою? Що називається напругою сили, в чому вимірюється напруга?
9. Яка величина (скалярна, векторна, тензорна) однозначно характеризує напружений стан в точці? Що означають індекси в запису  $P_{zx}$ ?
10. Існування рівняння руху в різних виглядах. Рівняння руху ідеальної рідини в формі Ейлера. Рівняння Нав'є-Стоксу. Рівняння руху у напругах. Узагальнений закон Ньютона.
11. Основні поняття теорії поля: градієнт, ротор, дивергенція. Записати вираз для градієнта температури в декартовій системі координат. Записати вираз для дивергенції швидкості в декартовій системі координат (3-х мірний випадок).
12. Теорема Остроградського-Гаусса на прикладі потоку маси.
13. Що називається щільність речовини, щільністю потоку маси, потоком маси через контрольну поверхню? Одиниці виміру цих величин. Чому дорівнює потік маси через контрольну поверхню (написати вираз балансу маси для контрольного обсягу)? Який фізичний зміст потоку швидкості через контрольну поверхню?
14. Що називається щільність імпульсу, щільністю потоку імпульсу, потоком імпульсу через контрольну поверхню? Одиниці виміру цих величин. Чому дорівнює потік імпульсу через контрольну поверхню для стаціонарного потоку (написати вираз)?
15. Що називається потоком повного імпульсу? Його одиниці виміру. Записати потік повного імпульсу для одновимірного стаціонарного потоку газу.
16. Що називається щільністю енергії, щільністю потоку енергії, потоком енергії через контрольну поверхню? Що називається потоком повної ентальпії через контрольну поверхню. Одиниці виміру цих величин. Чому дорівнює потік повної ентальпії через контрольну поверхню для стаціонарного потоку (написати рівняння балансу енергії для контрольного об'єму)?
17. Сутність універсального закону збереження субстанції (маси, імпульсу й енергії). Загальна формулювання закону балансу субстанції для контрольного об'єму. З яких причин може змінюватися субстанція всередині контрольного обсягу?
18. Формулювання його для контрольної маси та контрольного об'єму відносно маси, імпульсу й енергії.
19. Рівняння нерозривності, руху та енергії у інтегральному та диференціальному вигляді. Окремий випадок рівнянь збереження: одновимірна, стаціонарна течія рідини та газу.
20. Що називається силою реакції потоку? Як визначити силовий вплив на тіло, яке поміщене в потік? Записати формулу сили тяги ПРД. Записати формулу сили тяги РРД.

21. Записати систему рівнянь газової динаміки для одновимірного стаціонарного потоку.
22. Поняття повної (загальмованої) температури  $T^*$ . Аналогом чого вона є? Як змінюється  $T^*$  при підводі теплоти в камері згоряння ВРД, в компресорі, на турбіні, в соплі, в дифузорі (повітрозаборнику)? Відповідь обґрунтуйте.
23. Поняття повного (загальмованого) тиску  $P^*$ . Аналогом чого він є? Зв'язок приросту ентропії в необоротньому процесі і падіння повного тиску.
24. Як змінюється  $P^*$  при підводі теплоти в камері згоряння ПРД, в компресорі, на турбіні, в соплі, в дифузорі (повітрозаборнику)? Відповідь обґрунтуйте.
25. Вплив незворотності процесу на  $T^*$  і  $P^*$ .
26. Записати рівняння енергії для стаціонарного одновимірного потоку в безрозмірному вигляді.
27. Запишіть систему рівнянь гідрогазодинаміки (нерозривності, руху та енергії) у інтегральному та диференціальному вигляді для контрольного об'єму (підхід Ейлера). Який вигляд має та ж сама система для контрольної маси (у підході Лагранжа)?
28. Дивергентна форма запису систему рівнянь гідрогазодинаміки.
29. У чому суть гіпотези замикання. Запишіть рівняння замикання для системи рівнянь гідрогазодинаміки.
30. Назвіть умови одновизначеності системи рівнянь гідрогазодинаміки, що таке початкові і граничні умови. У якому випадку можуть бути відсутніми початкові умови?
31. Що називається крайовою задачею гідрогазодинаміки? Які існують методи розв'язання крайової задачі гідрогазодинаміки?
32. Розкажіть про найпоширеніші спрощення: лінеаризацію рівнянь, спрощенні границі розрахункової області, поділі течії на область в'язкого пограничного шару і невязкої зони потенційної течії, і так далі.
33. Перша і друга теореми теорії подібності та розмірностей. Приклади.
34. Критеріальні числа у гідрогазодинаміці: Рейнольдса, Ейлера, Фруда, Прандтля, Пуассона, Струхалю, Маха, показник ізоентропії, їхній фізичний зміст.
35. Запишіть критеріальні рівняння гідрогазодинаміки.
36. Запишіть систему рівнянь для турбулентних струмів. Флуктуації параметрів потоку.
37. Що називається числом Маха  $M$ ? Чи може число Маха дорівнювати нулю, бути більше 1, бути рівним нескінченності?
38. Яка швидкість називається критичною, за якою формулою вона визначається? Чи залежить критична швидкість від швидкості самого середовища, якщо так, то яким чином?
39. Чим самим критична швидкість відрізняється від місцевої швидкості звуку? Яка з них більше? Відповідь обґрунтуйте.
40. Як вводиться безрозмірна швидкість  $\lambda$ . Чи може швидкість  $\lambda$  бути більше 1, більше  $\sqrt{\frac{k+1}{k-1}}$ , рівною нескінченності? Чому?
41. Як пов'язані число Маха  $M$  і число  $\lambda$ ? Чому дорівнює число  $\lambda$ , що відповідає  $M = 1$ ,  $M = 10$ ?
42. Як визначити максимальну швидкість, до якої можна адіабатно розігнати потік газу? Чому при цьому дорівнює швидкість звуку в потоці, критична швидкість потоку? Як пов'язані критична і максимальна швидкості?
43. Безрозмірна швидкість  $\Lambda$ . Чи може швидкість  $\Lambda$  бути більше 1, більше, рівною нескінченності? Чому?
44. Газодинамічна функція температури  $\tau(\lambda)$  (а так же  $\tau(M)$ ): її фізичний зміст, формула, графік. Її значення в критичному перетині.
45. Газодинамічна функція тиску  $\pi(\lambda)$  (а так же  $\pi(M)$ ): її фізичний зміст, формула, графік. Її значення в критичному перетині.
46. Газодинамічна функція щільності  $\varepsilon(\lambda)$ , (а так же  $\varepsilon(M)$ ): її фізичний зміст, формула, графік. Її значення в критичному перетині.

47. Газодинамічна функція витрати  $q(\lambda)$ , її фізичний зміст, графік. Чи може  $q(\lambda)$  бути більше 1?
48. Рівняння Христиановича. Розмірність кожного параметра, що входить у рівняння. Як визначити константу  $m_c$  в рівнянні Христиановича? Чому дорівнює константа  $m_c$  для повітря, водню, водяної пари? Як за допомогою рівняння Христиановича знайти площу критичного перетину?
49. Газодинамічна функція імпульсу  $z(\lambda)$  - формула і графік. Записати вираз потоку повного імпульсу для одновимірної течії через газодинамічну функцію  $z(\lambda)$ . Величина потоку повного імпульсу в критичному перетині каналу.
50. Назвати види впливів на потік. Сформулювати закон звернення впливу і основні слідства з нього.
51. Як впливає звуження каналу на швидкість дозвукового потоку? Сформулюйте закон звернення впливу стосовно геометричного впливу.
52. Намалюйте сопло Лавалю, який перетин називається критичним, чому площа критики мінімальна? Явище запирання стосовно до сопла Лавалю. Схематично зобразіть зміну швидкості потоку, його температури і тиску уздовж сопла Лавалю.
53. Як впливає підведення теплоти на швидкість дозвукового потоку? надзвукового потоку? Сформулюйте закон звернення впливу стосовно теплового впливу.
54. Зобразіть схему теплового сопла, запишіть систему рівнянь для його розрахунку. В чому полягає явище запирання для теплового сопла. Зобразіть характер зміни швидкості потоку, його температури і тиску уздовж теплового сопла.
55. Що називається прямим стрибком ущільнення? Чим прямий стрибок відрізняється від косого стрибка, від ударної хвилі? Як в прямому стрибку змінюються щільність, тиск, температура потоку, як змінюється його швидкість?
56. Запишіть формулу Прандтля. Сформулюйте теорему Цемплена стосовно прямого стрибка ущільнення.
57. Як змінюються повні параметри потоку  $T^*$  і  $P^*$  в прямому стрибку ущільнення? Що називається коефіцієнтом відновлення повного тиску  $\sigma$ ? Запишіть формулу.
58. Співвідношення статичних параметрів потоку газу  $T_2/T_1, p_2/p_1, \rho_2/\rho_1$  за прямим стрибком і перед прямим стрибком ущільнення.
59. Запишіть систему рівнянь ГД для розрахунку прямого стрибка ущільнення. Закон Прандтля для швидкостей до і після стрибка. Чи можливий стрибкоподібний перехід потоку із дозвука на надзвук? Відповідь обґрунтуйте.
60. Запишіть систему рівнянь гідрогазодинаміки для одновимірної, стаціонарної, адіабатної (енергоізолюваної) течії в'язкого газу уздовж каналу з незмінною площею перерізу.
61. Газодинамічна функція  $\chi(\lambda)$ , її властивості і графік. З якого рівняння вона отримується? При якій швидкості потоку  $\lambda$  газодинамічна функція  $\chi(\lambda)$  має мінімум і чому. Чи може ГДФ  $\chi(\lambda)$  бути нескінченно великою величиною, бути менше одиниці, дорівнюватися нулю? Поясніть відповідь.
62. Як змінюються повна температура і повний тиск потоку газу у випадку «руху із тертям»? як змінюється ентропія потоку? потік повного імпульсу? потік повної ентальпії? Поясніть.
63. Що таке приведена довжина труби, її одиниці вимірювання, розрахункова формула. Як приведена довжина труби пов'язана із безрозмірними швидкостями потоку на вході у канал  $\lambda_1$  та виході з каналу  $\lambda_2$ ?
64. Яка схема розрахунку розподілу параметрів газу вздовж простої «трубі з тертям». Як саме вони виглядають? Як тертя впливає на швидкість дозвукового та надзвукового потоків? Чому на дозвуці вплив тертя доводить до збільшення швидкості потоку?
65. Поясніть закон оберненості впливу у разі впливу в'язкості. Чи можна використовуючи тільки «ефекти тертя» розігнати дозвуковий енергоізолюваний потік газу у циліндричному каналі до надзвукової швидкості? Чому?

66. Що таке криза течії у «трубі з тертям»? Яка поведінка потоку в разі закритичної довжини труби? Що таке гранична довжина труби, як вона залежить від швидкості потоку на вході у канал  $\lambda_1$ ?
67. Розповідь про механічний та витратний вплив на потік. Як змінюються повні та статичні параметри потоку при механічному та витратному впливах на потік?
68. Наведіть систему рівнянь гідрогазодинаміки у випадку механічного та витратного впливів. Як саме виглядає механічне сопло?
69. Що називається комбінованим впливом. Методика його розрахунку. Система рівнянь гідрогазодинаміки для розрахунку комбінованого впливу на потік газу.

## Модуль 2

70. Умови існування безвихрових течій. Система рівнянь та граничні умови щодо плоского безвихрового руху нестисливої рідини.
71. Потенціал швидкості і його визначення по заданому полю швидкостей. Інтеграл Лагранжа-Коші. Функція току. Її гідродинамічний сенс. Рівняння Лапласу для потенціалу швидкості і функції току.
72. Застосування функцій комплексного змінного для опису плоского безвихрового руху нестисливої рідини. Комплексний потенціал (характеристична функція) і його складові: ізопотенціальні лінії і лінії струму. Комплексна швидкість та комплексно-сполучена швидкість.
73. Комплексні потенціали деяких найпростіших потоків: (однорідний плоскопаралельний потік, джерело/стік, точковий вихор (ядро вихрю), диполь). Їх характеристики (комплексний потенціал однорідного плоскопаралельного потоку, об'ємні витрата джерела/стоку, циркуляція вихору, момент диполю).
74. Метод накладення потоків: вихроджерело/вихросток, безциркуляційне обтікання кругового циліндру однорідним потоком. Розподіл тиску на поверхні кругового циліндру.
75. Циркуляційний обтікання кругового циліндра однорідним потоком. Розподіл тиску на поверхні кругового циліндру.
76. Поняття особливостей. Потік поблизу пласкої стінки (уявлювані особливості).
77. Обтікання тіл довільної форми (приєднані особливості). Обтікання круга потоком від особливостей.
78. Метод конформних відображень. Гідродинамічний сенс конформних відображень.
79. Обтікання кута. Обтікання довільного контуру. Загальний вигляд функції, що здійснює конформне відображення. Встановлення взаємно-однозначної відповідності на основі розкладання в ряд Лоранау.
80. Метод годографу. Приклад використання методу годографу для пошуку оптимальної форми плоского повітрязабірника.
81. Формула Чаплигіна. Постулат Жуковського-Чаплигіна.
82. Формула Жуковського для підйомної сили.
83. Аеродинамічні характеристики профілю. Індуктивний опір крила кінцевого розмаху.
84. Рішення задачі обтікання тіл методом безперервно розподілених особливостей. Напруження вихрового шару. Вихровий опір профілю.
85. Особливості опису плоских потенціальних течій газу.
86. Лінеаризація рівняння потенціалу швидкості. Система рівнянь для лінеаризованих потоків. Різниця між дозвуковими і надзвуковими течіями газу.
87. Надзвукова течія в каналі змінного перерізу або напрямку.
88. Відбиття і перетин лінеаризованих хвиль.
89. Схема витікання газу із сопла Лавалю (мале відхилення від розрахункового режиму).
90. Метод характеристик. Характеристики першого та другого сімейства. Лінії обурення як характеристики. Змінення швидкості уздовж характеристик.

91. Рівняння характеристик в плоскості годографу швидкості. Вибір сталої у рівнянні характеристик. Чотири основні задачі потенціальної течії газу, що рішенням методом характеристик.
92. Течія Прандтля-Майєра. Робочі формули.
93. Косі стрибки ущільнення. Умови динамічної сумісності та робочі формули для косих стрибків.
94. Ударна поляра, її рівняння. Два типу косих стрибків: сильні і слабкі. Обтікання клину надзвуковим потоком під нульовим кутом атаки.
95. Взаємодія стрибків з твердою поверхнею, з межею струменя, між собою та з хвилями розширення.
96. Схема надзвукового струменя з високим ступенем нерозрахунковості.
97. Ламінарний, турбулентний і змішаний межовий шар на пласкій стінці.
98. Вплив стисливості та продольного градієнту тиску.
99. Взаємодія межового шару зі стрибками.
100. Струменевий межовий шар.

## 16. ПРИКЛАДИ БІЛЕТІВ З НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Національний аерокосмічний університет  
ім. М.Є. Жуковського "ХАІ"  
Спеціальність 144 «Теплоенергетика» Семестр 4  
Учбова дисципліна Гидрогазодинаміка

### ЗАЛКОВО – ЕКЗАМЕНАЦІЙНИЙ КВИТОК № 1

1. Якими параметрами характеризується стисливість середовища, плинність середовища? Як вводяться коефіцієнти стисливості і пружності; кінематичної і динамічної в'язкості? Вкажіть одиниці їх вимірювання.
2. Як впливає підведення теплоти на швидкість дозвукового потоку? надзвукового потоку? Сформулюйте закон звернення впливу стосовно теплового впливу.
3. Метод конформних відображень. Гідродинамічний сенс конформних відображень.
4. Задача
5. Задача

Затверджено на засіданні кафедри 205

Протокол № \_\_\_\_\_ від "\_\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Зав. кафедрою \_\_\_\_\_ Екзаменатор \_\_\_\_\_  
(підпис) (підпис)

Національний аерокосмічний університет  
ім. М.Є. Жуковського "ХАІ"  
Спеціальність 144 «Теплоенергетика» Семестр 4  
Учбова дисципліна Гидрогазодинаміка

### ЗАЛКОВО – ЕКЗАМЕНАЦІЙНИЙ КВИТОК № 2

1. Підходи Ейлера і Лагранжа опису руху рідини і газу.
2. Як змінюється  $P^*$  при підводі теплоти в камері згоряння ПРД, в компресорі, на турбіні, в соплі, в дифузорі (повітрозаборнику)? Відповідь обґрунтуйте.
3. Рівняння характеристик в плоскості годографа швидкості. Вибір сталої у рівнянні характеристик. Чотири основні задачі потенціальної течії газу, що вирішуються методом характеристик.
4. Задача
5. Задача

Затверджено на засіданні кафедри 205

Протокол № \_\_\_\_\_ від "\_\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Зав. кафедрою \_\_\_\_\_ Екзаменатор \_\_\_\_\_  
(підпис) (підпис)

Національний аерокосмічний університет  
ім. М.Є. Жуковського "ХАІ"  
Спеціальність 144 «Теплоенергетика» Семестр 4  
Учбова дисципліна Гидрогазодинаміка

### ЗАЛКОВО – ЕКЗАМЕНАЦІЙНИЙ КВИТОК № 3

1. Критеріальні числа у гідрогазодинаміці: Рейнольдса, Ейлера, Фруда, Прандтля, Пуассона, Струхалю, Маха, показник ізоентропи, їхній фізичний зміст.
2. Поясніть закон оберненості впливу у разі впливу в'язкості. Чи можна використовувати тільки «ефекти тертя» розігнати дозвуковий енергоізольований потік газу у циліндричному каналі до надзвукової швидкості? Чому?
3. Ударна поляра, її рівняння. Два типу косих стрибків: сильні і слабкі. Обтікання клину надзвуковим потоком під нульовим кутом атаки.
4. Задача
5. Задача

Затверджено на засіданні кафедри 205

Протокол № \_\_\_\_\_ від "\_\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Зав. кафедрою \_\_\_\_\_ Екзаменатор \_\_\_\_\_  
(підпис) (підпис)

Національний аерокосмічний університет  
ім. М.Є. Жуковського "ХАІ"  
Спеціальність 144 «Теплоенергетика» Семестр 4  
Учбова дисципліна Гидрогазодинаміка

### ЗАЛКОВО – ЕКЗАМЕНАЦІЙНИЙ КВИТОК № 4

1. Зв'язок швидкості звуку і модуля пружності середовища. Написати формулу для швидкості поширення слабких збурень в суцільному середовищі (формулу швидкості звуку). Чи залежить швидкість звуку від швидкості самого середовища, якщо так, то яким чином? Чому дорівнює швидкість звуку в нестисливому середовищі?
2. Співвідношення статичних параметрів потоку газу  $T_2/T_1, p_2/p_1, \rho_2/\rho_1$  за прямим стрибком і перед прямим стрибком ущільнення.
3. Рівняння характеристик в площині годографа швидкості. Вибір сталої у рівнянні характеристик. Чотири основні задачі потенціальної течії газу, що рішенням методом характеристик.
4. Задача
5. Задача

Затверджено на засіданні кафедри 205

Протокол № \_\_\_\_\_ від "\_\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Зав. кафедрою \_\_\_\_\_ Екзаменатор \_\_\_\_\_  
(підпис) (підпис)

Національний аерокосмічний університет  
ім. М.Є. Жуковського "ХАІ"  
Спеціальність 144 «Теплоенергетика» Семестр 4  
Учбова дисципліна Гидрогазодинаміка

### ЗАЛКОВО – ЕКЗАМЕНАЦІЙНИЙ КВИТОК № 5

1. Закон Ньютона для в'язкої середовища. Закон Паскаля. Закон Бернуллі.
2. Газодинамічна функція імпульсу  $z(\lambda)$  - формула і графік. Записати вираз потоку повного імпульсу для одновимірної течії через газодинамічну функцію  $z(\lambda)$ . Величина потоку повного імпульсу в критичному перетині каналу.
3. Циркуляційний обтікання кругового циліндра однорідним потоком. Розподіл тиску на поверхні кругового циліндру.
4. Задача
5. Задача

Затверджено на засіданні кафедри 205

Протокол № \_\_\_\_\_ від "\_\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Зав. кафедрою \_\_\_\_\_ Екзаменатор \_\_\_\_\_  
(підпис) (підпис)

Національний аерокосмічний університет  
ім. М.Є. Жуковського "ХАІ"  
Спеціальність 144 «Теплоенергетика» Семестр 4  
Учбова дисципліна Гидрогазодинаміка

### ЗАЛКОВО – ЕКЗАМЕНАЦІЙНИЙ КВИТОК № 6

1. Повна, локальна та конвективна похідні параметрів. Яка з цих похідних називається ейлеревою, яка лагранжевою? Зв'язок ейлеревої і лагранжевої похідних.
2. Рівняння Христиановича. Розмірність кожного параметра, що входить у рівняння. Як визначити константу  $m_c$  в рівнянні Христиановича? Чому дорівнює константа  $m_c$  для повітря, водню, водяної пари? Як за допомогою рівняння Христиановича знайти площу критичного перетину?
3. Взаємодія стрибків з твердою поверхнею, з межею струменя, між собою та з хвилями розширення.
4. Задача
5. Задача

Затверджено на засіданні кафедри 205

Протокол № \_\_\_\_\_ від "\_\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Зав. кафедрою \_\_\_\_\_ Екзаменатор \_\_\_\_\_  
(підпис) (підпис)

## 17. ПРИКЛАД ЕКЗАМЕНАЦІЙНИХ ЗАДАЧ

### ЗАДАЧА 1.

Визначити швидкість повітря на виході із сопла Лавалю, якщо  $T^0=500$  К,  $P^0=2$  МПа, тиск на зрізі  $P_{\text{атм}}=0,1$  МПа.

Чому дорівнює витрата, якщо площа критичного перетину сопла  $F_{\text{кр}}=0,0001$  м<sup>2</sup>?

### ЗАДАЧА 2.

Як зміниться швидкість витікання повітря з сопла Лавалю, якщо повна температура зросте в 2 рази, в 4 рази? А якщо при незмінній повної температурі тиск повний тиск збільшити в 10 разів? Прийняти  $T_1^0=500$  К,  $P_1^0=20$  бар. Тиск на зрізі сопла дорівнює 1 бар.

### ЗАДАЧА 3.

До газу, що протікає по циліндричному каналу з витратою  $G=2$  кг / с, підводиться теплова потужність  $Q=4,2 \cdot 10^5$  Вт. Якою буде швидкість потоку на виході з каналу, якщо на вході у канал  $w_1=100$  м/с, а температура  $T_1=300$  К.

Прийняти ізобарну теплоємність газу і показник адіабати газу  $c_p = 1000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ;  $k=1,4$ .

### ЗАДАЧА 4.

Скільки теплової потужності треба підвести до газу при витраті  $G=10$  кг/с, щоб загальмувати його від швидкості  $\lambda_1=1,5$  до швидкості  $\lambda_2=1,1$ ? Повна температура на вході  $T_1^*=800$  К. Чи можна підведенням теплоти зменшити швидкість потоку до 300 м/с?

### ЗАДАЧА 5.

Скільки теплової потужності треба підвести до газу при витраті  $G=1$  кг/с, щоб розігнати його від швидкості  $\lambda_1=1,1$  до швидкості  $\lambda_2=1,8$ ? Повна температура на вході  $T_1^*=360$  К. Чи можна підведенням теплоти збільшити швидкість цього потоку до 1000 м/с?

### ЗАДАЧА 6.

Визначити коефіцієнт відновлення повного тиску в прямому стрибку ущільнення, якщо безрозмірна швидкість до стрибка  $\lambda_1$  дорівнює 2. Знайти швидкість потоку після стрибка (у м/с), якщо повна температура до стрибка  $T_1^*$  дорівнює 1000 К. Знайти статичні температури до і після стрибка.

### ЗАДАЧА 7.

Аеростат заповнений 1000 м<sup>3</sup> гелію при температурі 17<sup>0</sup>С. Визначити підйомну силу аеростату, якщо атмосферний тиск дорівнює 1 бар, а температура повітря 27<sup>0</sup>С. Маса оболонки аеростату 500 кг.

**ЗАДАЧА 8.**

Визначити швидкість звуку в повітрі у землі і на висоті 8 км, якщо температура біля поверхні землі дорівнює  $25^{\circ}\text{C}$ .

**ЗАДАЧА 9.**

Визначити швидкість звуку у воді, якщо модуль пружності води становить 20.000 бар.

**ЗАДАЧА 10.**

Визначити граничну довжину циліндричної труби, по якій тече в'язкий газ (повітря). Діаметр труби дорівнює 40 мм, безрозмірна швидкість на вході в трубу  $\lambda_1 = 0,3$ , коефіцієнт шляхових втрат становить 0,015.

**ЗАДАЧА 11.**

Визначити допустиму безрозмірну швидкість потоку повітря  $\lambda_1$  на вході в циліндричний канал в уникненні режиму замикання каналу, якщо діаметр каналу дорівнює 40 мм, довжина каналу 80 м, коефіцієнт шляхових втрат становить 0,015.

**ЗАДАЧА 12.**

Визначити мінімальну площу перетину каналу, здатного пропустити за 1 секунду 5 кг повітря з температурою гальмування 400 К і тиском гальмування 4 бари. Як зміниться ця площа при збільшенні тільки температури гальмування в 4 рази? при збільшенні тільки тиску гальмування в 4 рази?