

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

Кафедра Аерокосмічної теплотехніки (№ 205)  
(назва кафедри)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Гарант



(підпис)

Т. П. Михайленко  
(ініціали та прізвище)

« 30 » серпня 2024 р.

**РОБОЧА ПРОГРАМА ОBOB'ЯЗKOBA НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**  
**ПРИКЛАДНА ГІДРОГАЗОДИНАМІКА**

(назва навчальної дисципліни)

**Галузь знань**

14 «Електрична інженерія»

(шифр і найменування галузі знань)

**Спеціальність:**

144 «Теплоенергетика»

(код та найменування спеціальності)

**Освітня програма:**

«Комп'ютерно-інтегровані технології проектування  
енергетичних систем»

(найменування освітньої програми)

**Форма навчання:**

**денна**

**Рівень вищої освіти:**

перший (бакалаврський)

Харків 2024 рік


Розробник: Амброжевич М.В., доц. каф. аерокосмічної теплотехніки (205), к.т. н.  
(прізвище та ініціали, посада, науковий ступінь та вчене звання)



(підпис)

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

Протокол № 1 від «31» серпня 2024 р.

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

## 1. Опис навчальної дисципліни

Найменування показників	Галузь знань, напрям підготовки, рівень вищої освіти	Характеристика навчальної дисципліни:
Кількість кредитів – 4,0	Галузь знань <u>14 «Електрична інженерія»</u> (шифр та найменування)	Обов'язкова
Модулів - 2	Спеціальність: <u>144 «Теплоенергетика»</u> (код та найменування)  Освітні програми: <u>«Комп'ютерно-інтегровані технології проектування енергетичних систем (скорочена форма)»</u> (назва освітньої програми)	Навчальний рік 2024/2025
Змістовних модулів - 2		Семестр
Індивідуальне завдання – 4 розрахункові роботи: 1. Параметри надзвукового потоку газу за фронтом косою стрибка ущільнення 2. Параметри потоку за фронтом ударної хвилі 3. Комбінований вплив на потік газу 4. Розрахунок гідравлічного опору каналу складної геометрії		
Загальна кількість годин – 120/56		
Кількість тижневих годин для денної форми навчання: Аудиторних – 3/4 Самостійної роботи студента – 4	Рівень вищої освіти: перший (бакалаврський)	Лекції
		32
		Практичні, семінарські
		24
		Лабораторні
		0
		Самостійна робота
		64
Вид контролю		
іспит		

Співвідношення кількості аудиторних занять до самостійної роботи становить:  $56/64=0,875$

## 2. Мета та завдання навчальної дисципліни

**Мета:** надбання знань, вмінь і навичок, що дозволять розробляти змістові та математичні моделі гідрогазодинамічних процесів у енергетичному обладнанні.

**Завдання:** освоєння змістових та математичних моделей ньютонівського континууму, законів і рівнянь гідрогазодинаміки, основних явищ, що супроводжують рух рідини та газу.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти повинні досягти таких компетентностей:

### Компетентності, які набуваються:

#### Загальні компетентності:

ЗК1 – Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями.

ЗК2 – Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.

- ЗК3 – Навички використання інформаційних і комунікаційних технологій.
- ЗК4 – Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.
- ЗК5 – Здатність працювати в команді.
- ЗК6 – Здатність спілкуватися державною мовою як усно, так і письмово.
- ЗК7 – Здатність приймати обґрунтовані рішення.
- ЗК8 – Здатність спілкуватися іноземною мовою.

ФК1 – Здатність застосовувати відповідні кількісні математичні, наукові і технічні методи і комп'ютерне програмне забезпечення для вирішення інженерних завдань в теплоенергетичній галузі.

ФК2 – Здатність застосовувати і інтегрувати знання і розуміння інших інженерних дисциплін.

ФК3 – Здатність продемонструвати практичні інженерні навички при проектуванні та експлуатації теплоенергетичного обладнання.

ФК4 – Здатність продемонструвати знання і розуміння математичних принципів і методів, необхідних в теплоенергетичній галузі.

ФК5 – Здатність виявляти, класифікувати і описувати ефективність систем і компонентів на основі використання аналітичних методів і методів моделювання в теплоенергетичній галузі.

ФК6 – Здатність досліджувати та визначити проблему і ідентифікувати обмеження, включаючи ті, що пов'язані з проблемами охорони природи, сталого розвитку, здоров'я і безпеки та оцінками ризиків в теплоенергетичній галузі.

ФК7 – Здатність продемонструвати знання і розуміння комерційного та економічного контексту в теплоенергетичній галузі.

ФК8 – Здатність продемонструвати розуміння ширшого міждисциплінарного інженерного контексту і його основних принципів.

ФК9 – Здатність демонструвати розуміння питань використання технічної літератури та інших джерел інформації в теплоенергетичній галузі.

ФК10 – Здатність розробляти плани і проекти для забезпечення досягнення поставленої певної мети з урахуванням всіх аспектів вирішуваної проблеми, включаючи виробництво, експлуатацію, технічне обслуговування та утилізацію теплоенергетичного обладнання.

ФК11 – Здатність продемонструвати розуміння необхідності дотримання професійних і етичних стандартів високого рівня у діяльності в теплоенергетичній галузі.

ФК12 – Здатність демонструвати розуміння проблем якості в теплоенергетичній галузі.

ФК13 – Здатність продемонструвати знання характеристик і властивостей матеріалів, обладнання, процесів в теплоенергетичній галузі.

ФК14 – Здатність продемонструвати обізнаність з питань інтелектуальної власності та контрактів в теплоенергетичній галузі.

### **Програмні результати навчання.**

ПРН1 – Знання і розуміння математики, фізики, хімії, газодинаміки, тепло- та масообміну, технічної термодинаміки, міцності, трансформації (перетворення) енергії, технічної механіки, що лежать в основі спеціальності «Теплоенергетика» відповідної спеціалізації, на рівні, необхідному для досягнення результатів освітньої програми.

ПРН11 – Здатність продемонструвати систематичне розуміння ключових аспектів та концепцій в теплоенергетичній галузі, технології виробництва, передачі, розподілу і використання енергії.

ПРН12 – Розуміння застосовуваних методик проектування і дослідження, а також їх обмежень відповідно до спеціалізації спеціальності «Теплоенергетика».

ПРН13 – Практичні навички вирішення завдань, що передбачають реалізацію інженерних проектів і проведення досліджень відповідно до спеціалізації.

ПРН21 – Здатність розпізнавати необхідність і самостійно навчатися протягом життя.

ПРН22 – Здатність відстежувати розвиток науки і техніки.

**Пререквізити:** фізика, хімія, теоретична механіка.

**Кореквізити:** вища математика, технічна термодинаміка.

### 3. Програма навчальної дисципліни

#### Змістовий модуль № 1

##### Лекційні заняття

#### ***ТЕМА 1. Основні поняття прикладної гідрогазодинаміки. Рівняння газової динаміки для одиничної цівки.***

Фізичні властивості рідин і газів. Фізичні моделі деформованого середовища, параметрами стану та рівняння стану рідини і газу. Рівняння газової динаміки для одиничної цівки. Рівняння нерозривності. Рівняння енергії. Механічна форма рівняння енергії (рівняння Бернуллі для трубки струму кінцевих розмірів для простих течій). Дисипація і перенесення енергії. Рівняння переносу теплоти. Динамічна і об'ємна в'язкість. Гранична швидкість руху газу. О силах, які діють в рідині. Зв'язок між напругами та деформаціями. Рівняння кількості руху. Розрахунок реактивної сили (сили тяги). Рівняння Нав'є-Стоксу. Рівняння моментів кількості руху. Рівняння руху ідеальної рідини. Ентропія у потоку. Ізоентропна течія. Зв'язок збільшення ентропії з коефіцієнтом встановлення повного тиску для реальних потоків рідини та газу.

#### ***ТЕМА 2. Гідростатика.***

Основні поняття. Абсолютний і відносний спокій (рівновагу) рідких середовищ. Рівняння Ейлера. Основна формула Паскаля; розподіл тиску в спочиваючому газі. Відносна рівновага рідини. Два способи вираження і відліку тиску. Термостатичний натиск. Поняття про силах тиску. Гідростатичний закон тиску. Рівновага атмосфери, розподіл тиску та температури повітря по висоті. Рівновага при наявності тепломасопереносу в рідині та газі. Розподіл сил тиску на плоскій твердій стінці в рідині. Головний вектор і головний момент сил тиску у разі криволінійної стінки. Плавання тіл у рідині (газі). Закон Архімеда. Умови на границях розділу. Краплинні рідини. Поверхневий натяг. Рівняння Лапласа. Капілярність рідини. Умови на границях розділу при обліку капілярності. Стійкість рівноваги в умовах теплообміну.

#### ***ТЕМА 3. Гідродинамічна подоба. Основні закони моделювання.***

Геометричне, кінематичне і динамічне подібності. Математичні моделі та використання ЕОМ. Фізичні моделі. Критерії гідромеханічної подібності. Основні правила гідромеханічного моделювання. Моделювання ізотермічних і неізотермічних процесів. Теплова і дифузійна подібність. Окремі закони гідродинамічної подібності. Визначальні і невизначальні критерії. Моделювання руху рідини в напірних трубопроводах, відкритих руслах, спорудах, гідро-

пневмосистемах і гідромашинах. Планування експериментальних досліджень. Методи та прилади для вимірювання глибин, тисків, швидкостей, витрат, частот обертання, потужності, концентрації і т. д. Вимірювання миттєвих швидкостей і тисків.

#### ***ТЕМА 4. Одномірний рух рідини та газу.***

Одновимірні газові потоки. Адіабатичне течія газу з тертям. Криза течії у разі впливу тертя на потік. Розрахунок течії в'язкого газу в каналі постійного перетину. Рух газу, що підігривається, по трубі постійного перетину. Криза течія у разі теплового впливу на потік. Загальні умови переходу від дозвукового течії до надзвукового і назад. Про поширення детонації і горіння у газах. Розрахунок газових потоків з використанням газодинамічних функцій. Рівняння і формулювання закону оберненості впливу. Наслідки закону. Криза течії. Вплив її на витрату газу.

Вплив зміни площі перерізу на параметри енергоізолюваного 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.

#### ***ТЕМА 5. Гідравлічний підхід. Способи приведення багатовимірних задач прикладної гідрогазодинаміки до одновимірного вигляду.***

Основна формула рівномірного руху рідини і газу. Опір по довжині каналу, основна формула гідравлічного опору. Відомості щодо гідравлічного коефіцієнту тертя. Зони опору. Ламінарний потік в трубі і приведення його до одновимірної моделі. Турбулентний режим течії у трубах, фізична природа турбулентних напруг і їх уявлення на основі напівемпіричних теорій. Профіль швидкостей, концентрація речовини і температури. Зони гідродинамічного опору. Закони розподілу швидкостей і опір при турбулентному плинні рідини в трубах. Найбільш вживані формули для гідравлічного коефіцієнта тертя

#### ***ТЕМА 6. Прискорення газового потоку.***

Просте дозвукове сопло. Надзвукове сопло (сопло Лавалю). Нерозрахункові режими витікання з сопла Лавалю. Надзвукова течія газу з безперервним збільшенням швидкості уздовж каналу (течія Прандтля -Майера). Обтікання зовнішнього тупого кута. Обтікання плоскої стінки. Обтікання випуклої кривої стінки. Витікання газу з одиничного плоского сопла із косим зрізом в простір зі зниженим тиском. Характеристики рівнянь усталеного течії ідеального газу. Взаємодія однорідних надзвукових потоків.

#### ***ТЕМА 7. Гальмування газового потоку.***

Дифузор при дозвуковій швидкості польоту. Прямі стрибки ущільнення. Косі стрибки ущільнення. Простий дифузор при надзвуковій швидкості польоту. Надзвуковий дифузор з системою косих стрибків ущільнення. Взаємодія стрибків з твердою поверхнею, з межею струменя, між собою та з хвилями розширення. Схема надзвукового струменя з високим ступенем нерозрахунковості. Про застосування пневматичного насадка (насадка Піто) в надзвуковому потоці.

#### ***ТЕМА 8. Математичні моделі прямого стрибку, косоного стрибку і ударної хвилі.***

Схема формування прямого стрибка ущільнення і ударної хвилі. Умови динамічної сумісності та робочі формули для прямого стрибка. Схема формування ударної хвилі. Ударна адіабата (адіабата Гюгоніо), її порівняння з адіабатою Пуассона. Визначення параметрів газу за ударною хвилею. Теорема Цемплена. Схема виникнення косоного стрибку ущільнення. Умови динамічної сумісності та робочі формули для косоного стрибку ущільнення. Ударна поляра. Правило реалізації на практиці косоного стрибка ущільнення мінімальної інтенсивності як прояв глобального закону мінімуму приросту ентропії (Онзагера).

### **Практичні заняття**

**Заняття 1. Рівняння газової динаміки.** Реакція рідини, що тече у криволінійному каналі. Сила тиску на нахилену пластину (удар струменя по пластині). Робота рухливої лопатки. Сила тяги ПРД, ЖРД. Рівняння Ейлера для турбомашин.

**Заняття 2. Гідродинамічна подоба.** Об'ємний і масова витрата в'язкої рідини в циліндричному каналі заданої геометрії. Оцінка дисипації механічної енергії в елементах трубопроводів (крани, засувки, відстійники, фільтри, повороти, розширення/звуження каналів, etc.)

**Заняття 3. Гідрравлічний опір каналу складної геометрії (тематика розрахункової роботи № 1).** Знаходження путніх і місцевих втрат в каналах складної геометрії. Знаходження масової витрати газу в каналі складної геометрії при заданому перепаді тиску (гідрравлічних втратах уздовж каналу).

### **Лабораторні заняття.**

Не передбачені.

### **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 3 розрахункових робіт на теми:

«Розрахунок комбінованого впливу на потік (тобто, геометричного, теплового й тертя)». Навантаження розрахункової роботи — 10 академічних годин;

«Розрахунок параметрів надзвукового потоку газу за фронтом косоного стрибка ущільнення». Навантаження розрахункової роботи — 10 академічних годин;

«Розрахунок параметрів потоку за фронтом ударної хвилі». Навантаження розрахункової роботи — 10 академічних годин.

## **Змістовий модуль № 2**

### **Лекційні заняття**

#### ***ТЕМА 9. Витікання рідини і газу через отвори і насадки.***

Витікання рідини і газу через отвори і насадки. Витікання рідини через «малі» отвори в тонкій стінці: розрахунок середньої швидкості, витрати, траєкторії струменя рідини. Особливості витікання через затоплені отвори. Особливості витікання через зовнішній циліндричний насадок. Насадки інших видів. Силовий вплив потоку на стінки, що його обмежують. Затоплені струменя рідини і газу. Структура течії і розрахункові залежності. Подібність профілів

швидкостей, концентрації речовини і температури. Струмені в обмеженому і напівобмеженому просторі. Взаємодія хвилі тиску і хвилі розрядження з твердою стінкою та границею струменя. Облік неізотермічних струменів.

#### ***ТЕМА 10. Теорія газового ежектора.***

Призначення і схеми ежекторів. Робочий процес ежектора. Критичні режими роботи ежектора. Запирання ежектора. Характеристики ежектора. Про режим течії на виході з камери змішування ежектора. Особливості роботи ежектора з надзвуковим соплом. Наближені формули розрахунку ежектора. Теорія ежекторного збільшувача реактивної сили (двоконтурний повітряно-реактивний двигун). Розрахунок газового ежектора на основі рівноважної стаціонарної моделі. Наближені формули розрахунку ежектора. Приклад розрахунку ежектора на основі напівемпіричних співвідношень. Про довжину камери змішування ежектора.

#### ***ТЕМА 11. Теорія примежового шару.***

Основні поняття примежового шару. Ламінарний примежовий шар. Інтегральне співвідношення Прандтля для ламінарного прикордонного шару. Турбулентність і її основні статистичні характеристики. Рівняння Рейнольдса для турбулентного потоку. Перехід від ламінарного до турбулентного режиму течії в примежовому шарі. Ламінарний, турбулентний і змішаний примежовий шар на плоскій стінці. Вплив стисливості та повздожнього градієнту тиску примежовий шар. Приклади плоских автомобільних рішень Прандтля. Тепловий і дифузний примежовий шар. Відрив примежового шару. Взаємодія примежового шару зі стрибками. Струменевий примежовий шар. Управління течією в примежовому шарі.

#### ***ТЕМА 12. Турбулентні струмені.***

Загальні властивості струменів. Зміна параметрів уздовж довжини струменя. Початковий і перехідний відрізок струменя. Основний відрізок струменя у супутньому потоці. Вплив неізобаричності струменя на закономірності його поширення. Одновимірна теорія початкового ("газодинамічного") відрізка нерозрахункового понадзвукового струменя.

#### ***ТЕМА 13 Елементи газової динаміки одиночного крила і решітки профілів.***

Основні геометричні параметри крилового профілю та решітки профілів. Теорема Жуковського про силову дію потенційного потоку. Вплив в'язкості на силовий вплив потоку. Аеродинамічні коефіцієнти. Профіль в плоскому потоці нестисливої рідини. Дозвукове обтікання профілю. Надзвукове обтікання профілю. Навколозвукове обтікання профілю. Обтікання решітки профілів дозвуковим потоком газу. Обтікання решітки профілів потоком газу з надзвуковою осьовою складовою швидкості. Обтікання решітки надзвукових профілів потоком газу з дозвуковою осьовою складовою швидкості. Деякі відомості про просторове обтіканні одиночного крила і решітки профілів. Парний вихор. Сходження вихору з задньої кромки крила. Гіпотеза Чаплигіна-Жуковського.

#### ***ТЕМА 14. Види двофазних потоків і їх класифікація.***

Основні поняття гідродинаміки дисперсних середовищ, вихідні гіпотези. Концентрація компоненту об'ємна і масова. Системи «газ - тверді частки», «рідина - тверді частки». Поведінка твердої ізольованою частки. Витання твердих частинок в різних потоках. Коефіцієнт опору при обтіканні твердого тіла сталим двофазним потоком. Сталий і несталий потік газорідинних сумішей. Витрата рідини, газу та газорідинної суміші. Осадження монодисперсної і полідисперсної суспензії. Стиснуте осадження твердих частинок. Принципи гідравлічного розрахунку відстійників. Зважування частинок висхідним потоком. Поняття про псевдозріджений шар.



**ТЕМА 15. Закони збереження для двофазних потоків. Особливості осадження (спливання) крапель рідини і газових бульбашок. Кавітація.**

Збереження маси компонента. Збереження імпульсу. Перенесення імпульсу через поверхню в сумішах. Взаємодія на межі поділу фаз. Умови сумісності на границі розділу фаз для потоку маси, імпульсу і енергії. Умови сумісності для бінарних двофазних систем. Двофазні потоки рідини. Критична швидкість. Принципи гідравлічного розрахунку трубопроводів і апаратів з двофазною рідиною. Основи гідравлічного розрахунку руху і осадження частинок в потоці. Криза опору. Інтенсифікація перемішування. Барботаж.

Течії з розвиненою кавітацією. Класифікація типів, стадій і форм розвитку кавітації. Вплив в'язкості і шорсткості. Основні допущення і схеми класичної теорії розвиненою кавітації. Оцінка числа кавітації. Порівняння різних моделей розвиненою кавітації. Схлопування бульбашок в ідеальній і в'язкій рідині.

**Практичні заняття**

**Заняття 4. Математичні моделі прямого стрибку, косоного стрибку і ударної хвилі.** Розрахунок параметрів повітря за фронтом прямого и косоного стрибку ущільнення при відомих параметрах потоку перед фронтом стрибку. Розрахунок швидкості фронту ударної хвилі і параметрів обуреного повітря за фронтом ударної хвилі за відомих перепадом тисків перед і за фронтом ударної хвилі.

**Заняття 5. Теорія газового ежектора.** Розрахунок параметрів повітря на виході з камери змішування для струминного прямооточного повітряного ежектору заданої геометрії як функції коефіцієнту ежекції.

**Заняття 6 - 7. Комбінований вплив на потік.** Знаходження термічних, калоричних та кінематичних параметрів потоку в'язкої, стисливої рідини на виході з каналу, якщо він відчуває комбінований вплив (тобто, геометричний, тепловий й тертям).

**Заняття 8. Елементи газової динаміки одиничного крила і решітки профілів.** Розрахунок сили, що діє на одиничний профіль з боку високошвидкісного дозвукового газового потоку.

**Лабораторні заняття.**

Не передбачені.

**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 розрахункової роботи на тему «Розрахунок масової витрати газу в каналі складної геометрії при заданому перепаді тиску (сумарних гідравлічних втратах уздовж каналу)». Навантаження розрахункової роботи — 20 академічних годин.

## 4. Структура навчальної дисципліни

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин					
	денна форма					
	усього	у тому числі				
лекції		практичні	лабораторні	самостійна робота	індивідуальна робота (ДЗ)*	
1	2	3	4	5	6	7
<b>Змістовий модуль 1</b>						
<i>1. Основні поняття прикладної гідрогазодинаміки. Рівняння газової динаміки для одиначної цівки.</i>	7	2	1	—	4	—
<i>2. Гідростатика.</i>	7	2	1	—	4	—
<i>3. Гідродинамічна подоба. Основні закони моделювання.</i>	7	2	1	—	4	—
<i>4. Одномірний рух рідини та газу. Комбінований вплив.</i>	7	2	1	—	4	4*
<i>5. Гідравлічний підхід. Способи приведення багатомірних задач прикладної гідрогазодинаміки до одновимірного вигляду.</i>	8	2	2	—	4	10*
<i>6. Прискорення газового потоку.</i>	6	2	—	—	4	—
<i>7. Гальмування газового потоку.</i>	7	2	1	—	4	—
<i>8. Математичні моделі прямого стрибку, косоного стрибку і ударної хвилі.</i>	7	4	1	—	4	10*
<i>Модульний контроль</i>	2					
<b>Разом</b>	<b>58</b>	<b>18</b>	<b>8</b>	<b>0</b>	<b>32</b>	<b>24*</b>
<b>Змістовий модуль 2 «Одновимірна теорія течій газу»</b>						
<i>9. Витікання рідини і газу через отвори і насадки.</i>	12	2	4	—	6	—
<i>10. Теорія газового ежектора.</i>	10	2	4	—	4	—
<i>11. Теорія межового шару.</i>	8	2	2	—	4	—
<i>12. Турбулентні струмені.</i>	8	2	2	—	4	—
<i>13. Елементи газової динаміки одиначного крила і решітки профілів.</i>	8	2	2	—	4	—
<i>14. Види двофазних потоків і їх класифікація.</i>	6	2	—	—	4	—
<i>15. Закони збереження для двофазних потоків. Особливості осадження (спливання) крапель рідини і газових бульбашок. Кавітація.</i>	10	2	2	—	6	—
<i>Модульний контроль</i>	2					
<b>Разом</b>	<b>62</b>	<b>14</b>	<b>16</b>	<b>0</b>	<b>32</b>	<b>0</b>
<b>РАЗОМ З ДИСЦИПЛІНИ</b>	<b>120</b>	<b>32</b>	<b>24</b>	<b>0</b>	<b>64</b>	<b>24*</b>

\*Ці години індивідуальної роботи входять до самостійної роботи студента

## 5. Теми семінарських занять – не передбаченні

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1		

## 6. Теми практичних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	<i>Основні поняття прикладної гідрогазодинаміки. Рівняння газової динаміки для одичної цівки.</i>	1
2	<i>Гідростатика.</i>	1
3	<i>Гідродинамічна подоба. Основні закони моделювання.</i>	1
4	<i>Одномірний рух рідини та газу. Комбінований вплив. (тематика розрахункової роботи № 1)</i>	1
5	<i>Гідравлічний підхід. Способи приведення багатовимірних задач прикладної гідрогазодинаміки до одновимірного вигляду. (тематика розрахункової роботи № 2)</i>	2
6	<i>Гальмування газового потоку.</i>	1
7	<i>Математичні моделі прямого стрибку, косоого стрибку і ударної хвилі. (тематика розрахункової роботи № 3, 4)</i>	1
8	<i>Витікання рідини і газу через отвори і насадки.</i>	4
9	<i>Теорія газового ежектора.</i>	4
10	<i>Теорія межового шару.</i>	2
11	<i>Турбулентні струмені.</i>	2
12	<i>Елементи газової динаміки одичного крила і решітки профілів.</i>	2
13	<i>Закони збереження для двофазних потоків. Особливості осадження (спливання) крапель рідини і газових бульбашок. Кавітація.</i>	2
	<b>Разом</b>	<b>24</b>

## 7. Теми лабораторних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1		

## 8. Самостійна робота

№ з/п	Назва теми.	Кількість годин
1.	<i>Основні поняття прикладної гідрогазодинаміки. Рівняння газової динаміки для одичної цівки.</i>	4
2.	<i>Гідростатика.</i>	4
3.	<i>Гідродинамічна подоба. Основні закони моделювання.</i>	4
4.	<i>Одномірний рух рідини та газу. Комбінований вплив.</i>	4
5.	<i>Гідравлічний підхід. Способи приведення багатовимірних задач прикладної гідрогазодинаміки до одновимірного вигляду.</i>	4
6.	<i>Прискорення газового потоку.</i>	4
7.	<i>Гальмування газового потоку.</i>	4
8.	<i>Математичні моделі прямого стрибку, косоого стрибку і ударної хвилі.</i>	4
9.	<i>Витікання рідини і газу через отвори і насадки.</i>	6

№ з/п	Назва теми.	Кількість годин
10.	<i>Теорія газового ежектора.</i>	4
11.	<i>Теорія межового шару.</i>	4
12.	<i>Турбулентні струмені.</i>	4
13.	<i>Елементи газової динаміки одиничного крила і решітки профілів.</i>	4
14.	<i>Види двофазних потоків і їх класифікація.</i>	4
15.	<i>Закони збереження для двофазних потоків. Особливості осадження (сливання) крапель рідини і газових бульбашок. Кавітація.</i>	6
	<b>Разом</b>	<b>64</b>

## 9. Індивідуальні завдання

Учбовий план передбачає виконання в якості індивідуального завдання чотири розрахункові роботи. Витрати часу на їх виконання складають 10, 10, 10 та 20 академічних годин відповідно за рахунок обсягу самостійної роботи (131 година). Результати виконання робіт студент подає у вигляді пояснювальних записок обсягом біля 10...15 сторінок.

**В першій розрахунковій роботі** на тему «**Розрахунок параметрів надзвукового потоку газу за фронтом косоного стрибка ущільнення**» студенти обчислюють термодинамічні та кінематичні параметри надзвукового потоку газу (повітря, азоту, аргону, кисню, водню, etc.), що набігає на стінку зі зламом (типу напів-клин).

Вхідні дані: два термічних параметра потоку перед фронтом або за фронтом косоного стрибку ущільнення (наприклад,  $T^*$  і  $P^*$ , або  $T$  і  $P$ ) і один кінематичний параметр потоку перед фронтом або за фронтом косоного стрибку (наприклад,  $M_1$  або  $\lambda_2$ , або  $w_1$ ), а також кут злам стінки показник ізоентропи газу  $k$ , газова стала  $R$  або молекулярна маса газу  $\mu$ .

Треба визначити: кут нахилу фронту косоного стрибку ущільнення, температуру повну і статичну, тиск повний і статичний, щільність повну і статичну, швидкість розмірну і безрозмірну, швидкість звуку і критичну швидкість потоку перед фронтом і за фронтом косоного стрибка ущільнення, приріст ентропії у косому стрибку  $\Delta s$ , коефіцієнт відновлення повного тиску у косому стрибку  $\sigma$ , питомий потік енергії (повної ентальпії), питомий потік повної кількості руху, питомий потік маси (питому витрату) потоку газу перед фронтом і за фронтом косоного стрибка ущільнення. Навантаження розрахункової роботи — 10 академічних годин.

Роботу виконують протягом другого–четвертого тижнів п'ятого семестру; на четвертому тижні призначений її прийом. Бали за розрахункову роботу нараховують згідно якості та своєчасності її виконання.

**У другій розрахунковій роботі** на тему «**Розрахунок параметрів потоку за фронтом ударної хвилі**» студенти обчислюють термодинамічні та кінематичні параметри потоку газу (повітря) за фронтом ударної хвилі.

Вхідні дані: статичні температура і тиск незбуреного повітря, показник ізоентропи газу  $k$ , газова стала  $R$  або молекулярна маса газу  $\mu$ , а також відношення статичного тиску обуреного середовища за фронтом ударної хвилі до статичного тиску незбуреного середовища перед фронтом ударної хвилі.

Треба визначити: швидкість фронту плоскої ударної хвилі, температуру повну і статичну, тиск повний і статичний, щільність повну і статичну, швидкість супутнього потоку – розмірну і безрозмірну, швидкість звуку і критичну швидкість незбуреного та обуреного потоків перед та за фронтом ударної хвилі, приріст ентропії в ударної хвилі  $\Delta s$ , коефіцієнт від-

новлення повного тиску в плоскій ударної хвилі  $\sigma$ . Навантаження розрахункової роботи — 10 академічних годин.

Роботу виконують протягом третього – п'ятого тижнів п'ятого семестру; на п'ятому тижні призначений її прийом. Бали за розрахункову роботу нараховують згідно якості та своєчасності її виконання.

**У третій розрахунковій роботі** на тему «**Розрахунок комбінованого впливу на потік (тобто, геометричного, теплового й тертям)**» студенти обчислюють термодинамічні та кінематичні параметри потоку газу (повітря, азоту, аргону, кисню, водню, etc.) на виході з конічного каналу заданої геометрії при одночасній дії на нього, крім геометричного, також і теплового впливу і наявності внутрішнього тертя.

Вхідні дані: два термічних параметра потоку на вході в канал (наприклад,  $T^*$  і  $P^*$ , або  $T$  і  $P$ ) і один кінематичний параметр на вході в канал (наприклад,  $M_1$  або  $\lambda_1$ , або  $w_1$ ), а також показник ізоентропи газу  $k$ , газова стала  $R$  або молекулярна маса газу  $\mu$ , тепла потужність, загальна або питома, що підводиться (відводиться) до потоку, геометрія каналу, коефіцієнт путніх втрат  $\xi_{\text{пт}}$ .

Треба визначити: характер розподілу по довжині каналу повної і статичної температури, повного і статичного тиску, повної і статичної щільності, швидкості розмірної і безрозмірної, швидкості звуку і критичної швидкості потоку, ентропії, потоку енергії (повної ентальпії), потоку повного імпульсу, потоку маси (витрати) газу. Навантаження розрахункової роботи — 10 академічних годин.

Роботу виконують протягом шостого – восьмого тижнів п'ятого семестру; на восьмому тижні призначений її прийом. Бали за розрахункову роботу нараховують згідно якості та своєчасності її виконання.

В четвертій розрахунковій роботі на тему «**Розрахунок масової витрати газу в каналі складної геометрії при заданому перепаді тиску (сумарних гідравлічних втратах уздовж каналу)**» треба навчитися знаходити шляхові та місцеві гідравлічні втрати в каналі складної геометрії.

Вхідні дані: теплофізичні властивості робочого тіла (газу або рідини), геометрія каналу, загальні втрати тиску.

Треба визначити: коефіцієнти путніх і місцевих втрат для всіх елементів трубопроводу (каналу складної геометрії), динамічний напір і швидкість робочого тіла на всіх ділянках каналу, витрати каналу на стаціонарному режимі. Навантаження розрахункової роботи — 20 академічних годин.

Роботу виконують протягом дев'ятого – чотирнадцятого тижнів п'ятого семестру; на п'ятнадцятому тижні призначений її прийом. Бали за розрахункову роботу нараховують згідно якості та своєчасності її виконання.

## 10. Методи навчання

Навчання проводиться у вербальній та практичній формах на лекціях і практичних роботах.

## 11. Методи 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 консультацій.

## 12. Критерії оцінювання та розподіл балів, які отримують студенти

### 12.1 Розподіл балів, які отримують студенти (кількісні критерії оцінювання)

Складові навчальної роботи	Бали за одне заняття (завдання)	Кількість занять (завдань)	Сумарна кількість балів
<b>Змістовний модуль 1</b>			
Робота на лекціях	0,1...0,5	8	1...4
Робота на практичних заняттях	0,5...1	8	4...8
Виконання і захист розрахункових робіт (№№ 1-3)	3...6	3	9...18
Модульний контроль	13...20	1	13...20
<b>Змістовний модуль 2</b>			
Робота на лекціях	0,1...0,5	8	1...4
Робота на практичних заняттях	0,5...1	8	4...8
Виконання і захист розрахункових робіт (№4)	9...13	1	9...13
Модульний контроль	19...25	1	19...25
<b>Усього за семестр</b>			<b>60...100</b>

**За розрахункову роботу** студент в залежності від якості виконання роботи 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 – 3 бали (за роботи 1-3) і 9 балів (за роботу №4).
- **«добре»**– робота виконана та оформлена, студент відповідає на питання з незначними помилками –5 балів (за роботи 1-3) і 11 балів (за роботу №4)балів.
- **«відмінно»**– робота виконана та оформлена, студент відповідає на питання –6 балів (за роботи 1-3) і 13 балів (за роботу №4).

Семестровий контроль (іспит) проводиться у разі відмови студента від балів поточного тестування й за наявності допуску до іспиту, тобто якщо він виконав і захистив розрахункові роботи, передбачені навчальним планом.

**Допуском до іспиту є здача усіх розрахункових робіт.**

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

Білет для іспиту складається з 4 теоретичних, у відповідності до модуля, та двох практичних завдань. Максимальна сума балів за теоретичні запитання є 60, за практичні – 40 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.
- вміти 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»).
- вміти записувати систему рівнянь газової динаміки для прямого і косоного 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.
- записувати зв'язок між напруженнями та деформаціями щодо деформованого середовища.
- записувати рівняння Нав'є-Стоксу.
- 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 одновимірні дозвукові та надзвукові потоки із впливами (геометричним, розхідним, тепловим, механічним та в'язкістним). Аналізувати одержані результати.
- Розраховувати прямі та косістрибка ущільнення.
- розраховувати параметри потоку за фронтом ударної хвилі.
- розраховувати плоскіпотенціальні 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 одиначного профілю та решітки профілів з дозвуковим і надзвуковим потоком в двовимірній постановці, використовуючи 1) закон збереження імпульсу, 2) метод конформних відображень, 3) теорему Жуковського.
- вміти записувати систему рівнянь газової динаміки для двофазногогазо-рідинного або паро-рідинного потоку (тобто розраховувати параметри процесів в системах з фазовим перетворенням).
- 

### 12.3 Критерії оцінювання роботи студента протягом семестру

#### Семестр №5

**Задовільно (60-74).** Показати мінімум знань та умінь. Захистити 4 розрахункові 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 вміти записувати систе-

му 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 косоного стрибків ущільнення. Знати сутність гідравлічного підходу. Знати основні теореми теорії подібності та розмінностей.

**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 косоного стрибків ущільнення, параметрів потоку за фронтом ударної хвилі, потоку Прандтля-Майєра, розпаду розриву. Уміти 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. Знати основні теореми теорії подібності та розмінностей.

**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
90 – 100	Відмінно	Зараховано
75 – 89	Добре	
60 – 74	Задовільно	
0 – 59	Незадовільно	Не зараховано

### 13. Методичне забезпечення

1. Амброжевич, М.В. Газова динаміка одновимірних потоків [електронний ресурс]: учеб. посібник / М.В. Амброжевич, В.А. Серєда. – Х.: електронна бібліотека Нац. аерокосм. ун-та ім. Н.Е. Жуковського «Харьк. авиац. ин-т», 2024. – \_\_\_\_\_ с. (сайт кафедри <https://khaikaf205.wixsite.com/main/%D0%B3%D0%B8%D0%B4%D1%80%D0%BE%D0%B3%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%B0>).
2. Гакал П.Г. Гідравлічні втрати. Навчальний посібник до лабораторного практикуму / П.Г. Гакал, Ю.Г. Потехин, М.В. Амброжевич. — Харків, ХАІ, 2024. — 32 с: іл. (сайт кафедри <https://khaikaf205.wixsite.com/main/%D0%B3%D0%B8%D0%B4%D1%80%D0%BE%D0%B3%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%B0>).



## 11. Рекомендована література.

### Базова література.

1. Бойко А.В. Гідрогазодинаміка : підручник. Х.: НТУ "ХПІ", 2007. – 444 с. (сайт кафедри <https://khaikaf205.wixsite.com/main/%D0%B3%D0%B8%D0%B4%D1%80%D0%BE%D0%B3%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%B0>)
2. Турик, В.М. Гідрогазодинаміка. Курс лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальностей 142 Енергетичне машинобудування, 143 Атомна енергетика, 144 Теплоенергетика, / В.М. Турик; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 8,37 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 145 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41225> (сайт кафедри <https://khaikaf205.wixsite.com/main/%D0%B3%D0%B8%D0%B4%D1%80%D0%BE%D0%B3%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%B0>)
3. Вамболь, С.О. Технічна механіка рідини і газу: підручник / С.О. Вамболь, І.В. Міщенко, О.М. Кондратенко. – Х.: НУЦЗУ, 2016. – 300 с. (сайт кафедри <https://khaikaf205.wixsite.com/main/%D0%B3%D0%B8%D0%B4%D1%80%D0%BE%D0%B3%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%B0>)
4. Тягній В. Г. Основи аеродинаміки та динаміки польоту. Частина I. Аерогідрогазодинаміка / В.Г. Тягній, В. В. Ємець; МВС України, Харків. нац. ун-т внутр. справ, Кременчуцьк. льотний коледж. – Хар-ків : ХНУВС, 2024. – 280 с. (сайт кафедри <https://khaikaf205.wixsite.com/main/%D0%B3%D0%B8%D0%B4%D1%80%D0%BE%D0%B3%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%B0>)

### Допоміжна література.

3. Powers J.M. Lecture notes on gas dynamics. Notre Dame, Indiana, USA: University of Notre Dame. 2019. 166 p. (сайт кафедри <https://khaikaf205.wixsite.com/main/%D0%B3%D0%B8%D0%B4%D1%80%D0%BE%D0%B3%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%B0>)
4. Notes on Thermodynamics, Fluid Mechanics, and Gas Dynamics. Carl Wassgren, Ph.D. School of Mechanical Engineering Purdue University [wassgren@purdue.edu](mailto:wassgren@purdue.edu), 2016, 1697 p. (сайт кафедри <https://khaikaf205.wixsite.com/main/%D0%B3%D0%B8%D0%B4%D1%80%D0%BE%D0%B3%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%B0>)
5. Fundamentals of Compressible Fluid Mechanics Genick Bar–Meir, Ph. D., 7449 North Washtenaw Ave, Chicago, IL 60645, email: [barmeir@gmail.com](mailto:barmeir@gmail.com). (сайт кафедри <https://khaikaf205.wixsite.com/main/%D0%B3%D0%B8%D0%B4%D1%80%D0%BE%D0%B3%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%B0>)

### Інформаційні ресурси

1. Бібліотека НАКУ «ХАІ».
2. Методичний кабінет кафедри.
3. Мережа Internet.
4. Сайт кафедри <https://khaikaf205.wixsite.com/main>

## 14. КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ З НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

### Прикладна гідрогазодинаміка

галузь знань: 14 «Електрична інженерія»

спеціальність: 144 «Теплоенергетика»

#### Модуль 1

1. Записати рівняння енергії для стаціонарного одновимірного потоку в безрозмірному вигляді.
2. Запишіть систему рівнянь гідрогазодинаміки (нерозривності, руху та енергії) у інтегральному та диференціальному вигляді для контрольного об'єму. Який вигляд має та ж сама система для контрольної маси?
3. Дивергентна форма запису систему рівнянь гідрогазодинаміки.
4. У чому суть гіпотези замикання. Запишіть рівняння замикання для системи рівнянь гідрогазодинаміки.
5. Назвіть умови однозначності системи рівнянь гідрогазодинаміки, що таке початкові і граничні умови. У якому випадку можуть бути відсутніми початкові умови?
6. Що називається крайовою задачею гідрогазодинаміки? Які існують методи розв'язання крайової задачі гідрогазодинаміки?
7. Перша і друга теореми теорії подібності та розмірностей. Приклади.
8. Критеріальні числа у гідрогазодинаміці: Рейнольдса, Ейлера, Фруда, Прандтля, Пуассона, Струхалія, Маха, показник ізоентропи, їхній фізичний зміст.
9. Запишіть критеріальні рівняння гідрогазодинаміці.
10. Розкажіть про найпоширеніші спрощення: лінеаризацію рівнянь, спрощенні границі розрахункової області, поділі течії на область в'язкого пограничного шару і нев'язкої зони потенційної течії, і так далі.
11. Запишіть систему рівнянь для турбулентних струмів. Флуктуації параметрів потоку.
12. Газодинамічна функція температури  $\tau(\lambda)$  (а так же  $\tau(M)$ ): її фізичний зміст, формула, графік. Її значення в критичному перетині. Газодинамічна функція тиску  $\pi(\lambda)$  (а так же  $\pi(M)$ ): її фізичний зміст, формула, графік. Її значення в критичному перетині. Газодинамічна функція щільності  $\epsilon(\lambda)$ , (а так же  $\epsilon(M)$ ): її фізичний зміст, формула, графік. Її значення в критичному перетині.
13. Газодинамічна функція витрати  $q(\lambda)$ , її фізичний зміст, графік. Чи може  $q(\lambda)$  бути більше 1 і чому?
14. 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?
15. 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.
16. Назвати види впливів на потік. Сформулювати закон звернення впливу і основні слідства з нього.
17. Як впливає звуження каналу на швидкість дозвукового потоку? Сформулюйте закон звернення впливу стосовно геометричного впливу.
18. Намалюйте сопло Лавалія, який перетин називається критичним, чому площа критики мінімальна? Явище запирання стосовно до сопла Лавалія. Схематично зобразіть зміну швидкості потоку, його температури і тиску уздовж сопла Лавалія.
19. Як впливає підведення теплоти на швидкість дозвукового потоку? надзвукового потоку? Сформулюйте закон звернення впливу стосовно теплового впливу.
20. 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.
21. Запишіть систему рівнянь гідрогазодинаміки для одновимірної, стаціонарної, адіабатної (енергоізолюваної) течії в'язкого газу уздовж каналу з незмінною площею перерізу.

22. 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.
23. 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.
24. 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  $\lambda_2$ ?
25. 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?
26. 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?
27. 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  $\lambda_1$ ?
28. Розповідь про механічний та витратний вплив на потік. Як змінюються повні та статичні параметри потоку при механічному та витратному впливах на потік?
29. Наведіть систему рівнянь гідрогазодинаміки у випадку механічного та витратного впливів. Як саме виглядає механічне сопло?
30. Що називається комбінованим впливом. Методика його розрахунку. Система рівнянь гідрогазодинаміки для розрахунку комбінованого впливу на потік газу.
31. 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?
32. Запишіть формулу Прандтля. Сформулюйте теорему Цемплена стосовно прямого стрибка ущільнення.
33. Як змінюються повні параметри потоку  $T^*$  і  $P^*$  в прямому стрибку ущільнення? Що називається коефіцієнтом відновлення повного тиску  $\sigma$ ? Запишіть формулу.
34. 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.
35. 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.
36. Умови існування безвихрових течій. Система рівнянь та граничні умови щодо плоского безвихрового руху нестисливої рідини.
37. 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.
38. 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.
39. 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).
40. Метод накладення потоків: вихроджерело/вихросток, безциркуляційне обтікання кругового циліндру однорідним потоком. Розподіл тиску на поверхні кругового циліндру.
41. Циркуляційний обтікання кругового циліндра однорідним потоком. Розподіл тиску на поверхні кругового циліндру.
42. Поняття особливостей. Потік поблизу пласкої стінки (уявлені особливості).
43. Обтікання тіл довільної форми (приєднані особливості). Обтікання круга потоком від особливостей.

44. Метод конформних відображень. Гідродинамічний сенс конформних відображень.
45. Обтікання кута. Обтікання довільного контуру. Загальний вигляд функції, що здійснює конформне відображення. Встановлення взаємно-однозначної відповідності на основі розкладання в ряд Лорану.
46. Метод годографу. Приклад використання методу годографу для пошуку оптимальної форми плоского повітрязабірника.
47. Формула Чаплигіна. Постулат Жуковського-Чаплигіна.
48. Формула Жуковського для підйомної сили.
49. Аеродинамічні характеристики профілю. Індуктивний опір крила кінцевого розмаху.
50. Рішення задачі обтікання тіл методом безперервно розподілених особливостей. Напруження вихрового шару. Вихровий опір профілю.
51. Особливості опису плоских потенціальних течій газу.

## Модуль 2

52. Лінеаризація рівняння потенціалу швидкості. Система рівнянь для лінеаризованих потоків. Різниця між дозвуковими і надзвуковими течіями газу.
53. Надзвукова течія в каналі змінного перерізу або напрямку.
54. Відбиття і перетин лінеаризованих хвиль.
55. Схема витікання газу із сопла Лаваля (мале відхилення від розрахункового режиму).
56. Метод характеристик. Характеристики першого та другого сімейства. Лінії обурення як характеристики. Змінення швидкості уздовж характеристик.
57. Рівняння характеристик в плоскості годографу швидкості. Вибір сталої у рівнянні характеристик. Чотири основні задачі потенціальної течії газу, що рішенняються методом характеристик.
58. Течія Прандтля-Майєра. Робочі формули.
59. Косі стрибки ущільнення. Умови динамічної сумісності та робочі формули для косих стрибків.
60. Ударна поляра, її рівняння. Два типу косих стрибків: сильні і слабкі. Обтікання клину надзвуковим потоком під нульовим кутом атаки.
61. Взаємодія стрибків з твердою поверхнею, з межею струменя, між собою та з хвилями розширення.
62. Схема надзвукового струменя з високим ступенем нерозрахунковості.
63. Ламінарний, турбулентний і змішаний межовий шар на пласкій стінці.
64. Вплив стисливості та поздовжнього градієнту тиску.
65. Взаємодія межового шару зі стрибками.
66. Струменевий межовий шар.
67. Особливості витікання рідини і газу через отвори і насадки.
68. Витікання рідини через «малі» отвори в тонкій стінці: розрахунок середньої швидкості, витрати, траєкторії струменя рідини.
69. Особливості витікання рідини і газу через затоплені отвори.
70. Особливості витікання рідини і газу через зовнішній циліндричний насадок. Особливості витікання через насадки інших видів.
71. Силовий вплив потоку на стінки, що його обмежують.
72. Особливості затоплених струменів рідини і газу. Структура течії затопленого струменя і розрахункові залежності для нього.
73. Подібність профілів швидкостей, концентрації речовини і температури.
74. Струмені в обмеженому і напівобмеженому просторі. Взаємодія хвилі тиску і хвилі розрядження з твердою стінкою та границею струменя. Облік неізотермічних струменів.
75. Призначення і схеми ежекторів. Робочий процес ежектора. Критичні режими роботи ежектора. Запирання ежектора. Характеристики ежектора. Режим течії на виході з камери змішування ежектора.
76. Особливості роботи ежектора з надзвуковим соплом. Наближені формули розрахунку ежектора.
77. Теорія ежекторного збільшувача реактивної сили (двоконтурний повітряно-реактивний двигун).
78. Розрахунок газового ежектора на основі рівноважної стаціонарної моделі. Наближені формули розрахунку ежектора. Напівемпіричні співвідношення розрахунку ежектора.

79. Основні поняття межового шару. Ламінарний межовий шар.
80. Інтегральне співвідношення Прандтля для ламінарного прикордонного шару.
81. Турбулентність і її основні статистичні характеристики. Рівняння Рейнольдса для турбулентного потоку.
82. Перехід від ламінарного до турбулентного режиму течії в межовому шарі.
83. Ламінарний, турбулентний і змішаний межовий шар на пласкій стінці. Вплив стисливості та поздовжнього градієнту тиску на примежовий шар.
84. Приклади плоских автотельних рішень Прандтля.
85. Тепловий і дифузний межовий шар. Відрив межового шару. Взаємодія межового шару зі стрибками. Струменевий межовий шар. Управління течією в прикордонному шарі.
86. Загальні властивості струменів. Зміна параметрів уздовж довжини струменя.
87. Початковий і перехідний відрізок струменя. Основний відрізок струменя у супутньому потоці. Вплив неізобаричності струменя на закономірності його поширення. Одновимірна теорія початкового ("газодинамічного") відрізка нерозрахункового понадзвукового струменя.
88. Основні геометричні параметри крилового профілю та решітки профілів.
89. Теорема Жуковського про силову дію потенційного потоку. Вплив в'язкості на силовий вплив потоку.
90. Аеродинамічні коефіцієнти.
91. Профіль в плоскому потоці нестисливої рідини. Дозвукове обтікання профілю. Надзвукове обтікання профілю. Навколо
92. звукове обтікання профілю.
93. Обтікання решітки профілів дозвуковим потоком газу. Обтікання решітки профілів потоком газу з надзвуковою осьовою складовою швидкості. Обтікання решітки надзвукових профілів потоком газу з дозвуковою осьовою складовою швидкості.
94. Особливості просторового обтікання одиничного крила і решітки профілів.
95. Парний вихор. Сходження вихору з задньої кромки крила. Гіпотеза Чаплигіна-Жуковського.
96. Основні поняття гідродинаміки дисперсних середовищ, вихідні гіпотези.
97. Концентрація компоненту об'ємна і масова.
98. Системи «газ - тверді частки», «рідина - тверді частки». Поведінка твердої ізольованою частки. Витання твердих частинок в різних потоках.
99. Коефіцієнт опору при обтіканні твердого тіла сталим двофазним потоком. Сталий і несталий потік газорідних сумішей.
100. Витрата рідини, газу та газорідної суміші.
101. Осадження монодисперсної і полідисперсної суспензії. Стиснуте осадження твердих частинок.
102. Принципи гідравлічного розрахунку відстійників. Зважування частинок висхідним потоком. Поняття про псевдозріджений шар.
103. Закони збереження для двофазних потоків. Збереження маси компонента. Збереження імпульсу. Перенесення імпульсу через поверхню в сумішах.
104. Взаємодія на межі поділу фаз у двофазних потоках. Умови сумісності на границі розділу фаз для потоку маси, імпульсу і енергії. Умови сумісності для бінарних двофазних систем.
105. Двофазні потоки рідини. Критична швидкість. Принципи гідравлічного розрахунку трубопроводів і апаратів з двофазною рідиною.
106. Основи гідравлічного розрахунку руху і осадження частинок в потоці. Криза опору. Інтенсифікація перемішування. Барботаж.
107. Що таке кавітація? Течії з розвинутою кавітацією. Класифікація типів, стадій і форм розвитку кавітації.
108. Основні допущення і схеми класичної теорії розвинутою кавітації. Вплив в'язкості і шорсткості. Оцінка числа кавітації.
109. Порівняння різних моделей розвинутою кавітації. Схлопування бульбашок в ідеальній і в'язкій рідині при кавітації.