



## Гідрогазодинаміка

### Робоча програма навчальної дисципліни (силабус)

#### Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Перший (бакалаврський)</i>
Галузь знань	<i>14 Електрична інженерія</i>
Спеціальності	<i>143 Атомна енергетика</i>
Освітня програма	<i>Атомні електричні станції</i>
Статус дисципліни	<i>Нормативна</i>
Форма навчання	<i>очна(денна)</i>
Рік підготовки, семестр	<i>II курс, осінній семестр</i>
Обсяг дисципліни	<i>6 кредитів ЄКТС (180 годин), 54 години лекцій, 18 годин практичні заняття, 18 годин лабораторні заняття, 90 годин самостійної роботи</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>екзамен/ розрахункова робота, модульна контрольна робота</i>
Розклад занять	<a href="http://roz.kpi.ua/">http://roz.kpi.ua/</a>
Мова викладання	<i>українська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: <i>к.т.н., професор, Турик Володимир Миколайович</i> , <a href="mailto:Turick46@gmail.com">Turick46@gmail.com</a> Практичні заняття: <i>к.т.н., професор, Турик Володимир Миколайович</i> , <a href="mailto:Turick46@gmail.com">Turick46@gmail.com</a> Лабораторні заняття: <i>к.т.н., доцент, Мураценко Альона Миколаївна</i>
Розміщення курсу	<a href="https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41225">https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41225</a> <a href="https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41226">https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41226</a> <a href="https://ela.kpi.ua/handle/123456789/48479">https://ela.kpi.ua/handle/123456789/48479</a>

#### Програма навчальної дисципліни

##### 1. Опис навчальної дисципліни, її мета, предмет вивчення та результати навчання

**Гідрогазодинаміка** — це розділ фізики суцільних середовищ, загальним змістом якого є вивчення законів рівноваги і макроскопічних процесів руху рідин та газів, а також їх силової взаємодії з твердими тілами, при яких конкретна молекулярна будова середовищ неістотна. В основу покладено модель неперервності (суцільності) рідин і газів, довільні нескінченно малі об'єми яких характеризується тими самими властивостями, що й об'єми скінченних розмірів.

Закони руху середовищ в елементах ядерних реакторів, парових котлів, теплообмінних апаратів, теплових двигунів, в трубопроводах водо-, паро-, газопостачання визначають гідро- аеродинамічний опір і процеси тепломасообміну, а отже, і ефективність використання енергії і надійність устаткування. Тому **метою** навчальної дисципліни є формування у студентів відповідних базових знань основних положень гідрогазодинаміки, і це є необхідною передумовою отримання майбутніми фахівцями вмінь і навичок для високоякісної професійної діяльності в галузях енергомашинобудування, атомної енергетики та теплоенергетики, включаючи системи новітніх джерел енергії, МГД-машин, експериментальні установки для досліджень в галузях водневої і термоядерної енергетики тощо.

**Предмет** вивчення дисципліни «Гідрогазодинаміка»: фізичні властивості та моделі рідин і газів; основи гідрогазостатики; кінематика суцільних середовищ; динаміка ідеальних і в'язких рідин і газів; плоскі потенціальні течії; основні поняття примежового шару та відривних (у тому числі кавітаційних) течій; елементи теорії гідравлічного удару; елементи газової динаміки.

Курс має на меті сформувати та розвинути такі фахові компетентності студентів:

ФК 13. Здатність використовувати знання характеристик специфічних матеріалів, обладнання, процесів та продуктів у професійній діяльності в галузі атомної енергетики.

Згідно з освітньо-професійною програмою студенти після засвоєння навчальної дисципліни мають продемонструвати такі програмні результати навчання (ПРН):

ПРН 1. Знання і розуміння математики, фізики, хімії та інженерних наук на рівні, необхідному для досягнення результатів освітньої програми, в тому числі певна обізнаність в останніх досягненнях в галузі.

- ПРН 3. Обирати і застосовувати типові аналітичні, розрахункові та експериментальні методи для розв'язування складних спеціалізованих задач і практичних проблем у галузі атомної енергетики; правильно інтерпретувати результати виконаних досліджень та розрахунків.
- ПРН 5. Здійснювати розрахунки об'єктів атомно-енергетичного комплексу, виробів, процесів і систем в галузі атомної енергетики, що задовольняють конкретні технічні, економічні, законодавчі та інші вимоги; обрання і застосовування адекватної методології проектування.
- ПРН 10. Знати і розуміти основні методи та засоби експериментальних досліджень в атомній енергетиці, вміти планувати і виконувати експериментальні дослідження, оцінювати точність і надійність їх результатів, робити обґрунтовані висновки з урахуванням сучасних знань з відповідної тематики.
- ПРН 20. Знання і розуміння інженерних дисциплін на рівні, необхідному для досягнення інших результатів освітньої програми, в тому числі певна обізнаність в останніх досягненнях атомної енергетики

## **2. Пререквізити та постреквізити дисциплін (місце в структурно-логічній схемі навчання за відповідною освітньою програмою)**

**Пререквізити:** Теоретична механіка.

**Постреквізити:** Теорія теплообміну, також курс забезпечує теоретичну та практичну підготовку для наступного вивчення дисциплін, що пов'язані з розрахунками і дослідженнями фізичних процесів в енергетичних машинах, апаратах та системах.

### **Зміст навчальної дисципліни**

#### **Розділ 1. Вступ до ГГД. Фізичні моделі й властивості рідин і газів.**

**Тема 1.1.** Предмет, методи й гіпотези ГГД. Сили й напруження, що діють в рідинах і газах.

**Тема 1.2.** Основні фізичні властивості, термодинамічні та гідромеханічні моделі рідин і газів.

#### **Розділ 2. Кінематика рідин і газів.**

**Тема 2.1.** Методи вивчення руху, кінематичні поняття й характеристики руху рідких частинок і потоків.

**Тема 2.2.** Кінематика вихрових течій.

#### **Розділ 3. Напружений стан рідини та фундаментальні закони в ГГД.**

**Тема 3.1.** Тензор напружень. Основне рівняння динаміки рідин і газів «в напруженнях».

**Тема 3.2.** Закони збереження моменту імпульсу та енергії.

#### **Розділ 4. Гідрогазостатика.**

**Тема 4.1.** Гідростатика.

**Тема 4.2.** Основи газостатики.

#### **Розділ 5. Динаміка ідеальної рідини.**

**Тема 5.1.** Рівняння руху ідеальної рідини, початкові й крайові умови, основні інтеграли.

**Тема 5.2.** Динамічні теореми про вихори.

**Тема 5.3.** Застосування законів збереження щодо одновимірних рухів нестисливої рідини.

#### **Розділ 6. Елементи гідравліки в'язкої нестисливої рідини.**

**Тема 6.1.** Енергетичний баланс одновимірних потоків. Гідравлічні опори при течії рідини в трубопроводах.

**Тема 6.2.** Витікання нестисливої рідини через отвори та насадки.

**Тема 6.3.** Гідравлічний удар.

#### **Розділ 7. Потенціальні течії ідеальної нестисливої рідини.**

**Тема 7.1.** Кінематика плоских потенціальних течій.

**Тема 7.2.** Динаміка потенціальних течій.

#### **Розділ 8. Динаміка в'язкої рідини (просторові течії).**

**Тема 8.1.** Диференціальні рівняння руху Нав'є-Стокса. Елементи теорії подібності й моделювання гідрогазодинамічних явищ.

**Тема 8.2.** Ламінарна та турбулентна течії. Рейнольдсів тензор турбулентних напружень.

**Тема 8.3.** Напівемпіричні теорії турбулентного переносу. Закони розподілу швидкості та опору для потоків в трубах.

**Тема 8.4.** Ознайомлення з методами комп'ютерного моделювання в'язких течій.

#### **Розділ 9. Поняття примежового шару та відривних течій.**

**Тема 9.1.** Гідродинамічний примежовий шар та його основні характеристики.

**Тема 9.2.** Рівняння Прандтля примежового шару. Задача Блазіуса.

**Тема 9.3.** Відрив примежового шару. Відривні кавітаційні течії: схеми «нев'язкого» відриву.

#### **Розділ 10. Рух газу з до- та надзвуковими швидкостями.**

**Тема 10.1.** Основні співвідношення щодо одновимірних течій газу. Способи одержання надзвукових швидкостей.

**Тема 10.2.** Стрибки ущільнення. Ударна адіабата. Хвильовий опір.

#### 4. Навчальні матеріали та ресурси

Базова (підручники, навчальні посібники) література

1. Путята В. Й., Сідляр М. М. Гідроаеромеханіка: підручник. Київ: Видавництво Київського університету, 1963. 480 с.
2. Турик В. М. Гідрогазодинаміка. Курс лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальностей 142 Енергетичне машинобудування, 143 Атомна енергетика, 144 Теплоенергетика / 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>
3. Турик В. М. Гідрогазодинаміка. Практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальностей 142 Енергетичне машинобудування, 143 Атомна енергетика, 144 Теплоенергетика / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові дані (1 файл: 2,0 Мбайт). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 38 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41226>
4. Турик В. М. Основи газодинаміки [Електронний ресурс]: навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Автоматизовані та роботизовано механічні системи» спеціальності 131 Прикладна механіка / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові дані (1 файл: 1,82 Мбайт). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 139 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/48479>
5. Скочеляс Б. А., Турик В. М. Прикладна гідромеханіка (Гідростатика): Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів спеціальності «Гідравлічні і пневматичні машини» всіх форм навчання. Київ.: Нац. техн. ун-т України “КПІ”, 2009. 25 с. (Надано гриф «Рекомендовано Методичною радою НТУУ «КПІ» від 24 грудня 2009 р., прот. № 4. Свідоцтво про надання грифа електронному засобу навчального призначення НМУ № Е9/10-106).
6. Скочеляс Б. А., Турик В. М. Прикладна гідромеханіка (Гідродинаміка): Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів спеціальності «Гідравлічні і пневматичні машини» всіх форм навчання. Київ.: Нац. техн. ун-т України “КПІ”, 2010. 26 с. (Надано гриф «Рекомендовано Методичною радою НТУУ «КПІ» від 15 квітня 2010 р., прот. № 8. Свідоцтво про надання грифа електронному засобу навчального призначення НМУ № Е9/10-266).
7. Скочеляс Б. А., Турик В. М., Ящук П. П. Прикладна гідромеханіка. Гідроаеромеханіка: Елементи кінематики і динаміки рідини: Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів спеціальностей «Гідравлічні і пневматичні машини», «Динаміка і міцність машин» всіх форм навчання. Київ.: Нац. техн. ун-т України. “КПІ”, 2011. 34 с. (Надано гриф «Рекомендовано Методичною радою НТУУ «КПІ» від 16 червня 2011 р., прот. № 10. Свідоцтво про надання грифа електронному засобу навчального призначення НМУ № Е 10/11-530).
8. Гідравліка: Зошит до виконання лабораторних робіт для студентів денної та заочної форм навчання / Уклад.: Б. А. Скочеляс, В. А. Ковальов, В. М. Турик та ін. Київ.: НТУУ «КПІ», 2010. — 12 с.

#### *Додаткова література*

9. Повх И.Л. Техническая гидромеханика. Л.: Машиностроение, 1976. 504 с.
10. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика. М: Машиностроение, 1987. 440 с.
11. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1987. 840 с.
12. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 712 с.
13. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1976. 888 с.
14. Аэрогидромеханика / А.М. Мхитарян, В.В. Ушаков, А.Г. Баскакова, В.Д. Трубенко; Под общ. ред. А.М. Мхитаряна. М.: Машиностроение, 1984. 352 с.
15. Методические указания к лабораторным работам по гидромеханике и газовой динамике для студентов машиностроительных, энергетических и приборостроительных специальностей / Сост. О. М. Яхно, В. Н. Турик, В. З. Аверин и др. Киев: КПИ, 1989. 32 с.
16. Liepman H.W., Roshko A. Elements of gasdynamics. Mineola, New York: Dover Publications, inc., 2002. 464 p.
17. Zucker R.D., Biblarz O. Fundamentals of gas dynamics, 2nd ed. Monterey, California: John Wiley&Sons, inc., 2002. 493 p.
18. Powers J.M. Lecture notes on gas dynamics. Notre Dame, Indiana, USA: University of Notre Dame. 2019. 166 p.
19. Приходько А. А. Компьютерные технологии в аэрогидродинамике и тепломассообмене. Киев: Наукова думка, 2003. 380 с. <http://www.skif.biz/files/b46f4a.pdf>

### рекомендації та роз'яснення

- Всі базові літературні джерела є в бібліотеці КПІ та в методичному кабінеті кафедри, додаткові джерела спрямовані на поглиблене ознайомлення з окремими розділами.
- Базові джерела містять теоретичні матеріали та приклади за темами дисципліни, що можна використовувати разом з матеріалами лекцій, але тільки під час лекцій, лабораторних і практичних занять реалізується їх інтегральний зв'язок з сучасними проблемами ГГД, чого не можна отримати з жодного літературного джерела.
- Жодне джерело, як і всі перелічені літературні джерела, не є достатніми для опанування дисципліни без конспекту лекцій, розв'язання завдань на практичних заняттях, виконання модульної контрольної і розрахункової робіт, які побудовано за певною методикою, що враховує специфіку і об'єм лекційних занять відповідно до освітньої програми.

### Навчальний конвент

#### 5. Методика опанування навчальної дисципліни(освітнього компонента)

Методика опанування кожної теми складається з таких компонентів: теоретичні відомості за темою, методики їх застосування на практичних заняттях, приклади застосування методик, самостійне виконання питань модульної контрольної роботи (МКР) і розрахункової роботи.

#### ЛЕКЦІЙНІ ЗАНЯТТЯ

№ лекції	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичного забезпечення, посилання на літературу та завдання на СРС)
1	<b>Предмет, методи й гіпотези ГГД. Сили й напруження, що діють в рідинах і газах.</b> Історія розвитку та місце дисципліни «Гідрогазодинаміка» при підготовці фахівців в галузі теплової і атомної енергетики, енергомашинобудування, теплофізики, фізико-технічних проблем енергетики. Роль механіки рідини та газу в розумінні явищ природи, в розвитку науки і техніки. Структура курсу та особливості його студіювання. Гіпотези суцільності та текучості рідкого середовища, їх застосовуваність. Визначення понять “рідина”, “краплинна” та “газоподібна рідина”. Густина й питома вага рідини. Сили та напруження, що діють у рідині. Тиск, його види та одиниці вимірювання. • Демонстрація навчального кінофільму.
Література:	[1, 2, 4]. Додаткова література: [9–14].
Завдання на СРС:	Засвоїти теоретичний матеріал, прослуханий на лекції.
2	<b>Основні фізичні властивості, термодинамічні та гідромеханічні моделі рідин і газів.</b> В'язкість; течія Куетта; закон тертя Ньютона. Ньютонівські та неньютонівські рідини; класифікація рідин за Доджем. Стисливість рідин та газів (коефіцієнт об'ємного стиску; модуль об'ємної пружності рідини; швидкість звуку в середовищі та її ізотермічна й ізотропійна моделі; число Маха-Маієвського). Термодинамічні та гідромеханічні моделі газів і рідин. Ізотерми Ван-дер-Ваальса. Поверхневий натяг. Параметри насичення. Кавітація.
Література:	[1–4]. Додаткова література: [9–11].
Завдання на СРС:	Звернути увагу на питання кавітації та реології неньютонівських рідин].
3, 4, 5	<b>Методи вивчення руху, кінематичні поняття й характеристики руху рідких частинок і потоків.</b> Системи відліку. Підходи Лагранжа й Ейлера, їх взаємозв'язок. Функціональний визначник. Потік рідини та поле швидкостей. Стаціонарний та нестаціонарний руху. Лінія течії і траєкторія, їх диференціальні рівняння. Гідравлічні елементи потоку: трубка течії, елементарний струмінь та його властивості, живий переріз, змочений периметр, гідравлічний радіус та діаметр. Класифікація потоків: напірні, безнапірні потоки й струмені. Витрата, її види. Середня швидкість рідини. Рівняння нерозривності в гідравлічній формі. Режимы течії рідини; досліди О. Рейнольдса. Місцеві миттєві («актуальні»), місцеві усереднені за часом та пульсаційні швидкості. Поняття про епюри швидкостей в ламінарному та турбулентному потоках. Прискорення рідкої частинки, локальна та конвективна похідні. Інтегральна та диференціальна форми рівнянь нерозривності (у змінних Лагранжа та Ейлера). Модель руху рідкої частинки: <b>Теорема Коші-Гельмгольца (Перша теорема Гельмгольца про вихори)</b> ; тензор швидкостей деформацій та його інваріанти. Потенціал швидкості.

	Класифікація рухів рідини: поступальний, деформаційний, потенціальний, вихровий рухи.
Література:	[1, 2, 4, 7, 8]. Додаткова література: [9–14].
Завдання на СРС:	Звернути особливу увагу на проробку теореми Коші–Гельмгольца та тензора швидкостей деформацій. Чи можна розігнати потік газу в каналі постійного перерізу? Обґрунтувати поняття «теплого замикання» каналу.
<b>6, 7</b>	<b>Кінематика вихрових течій.</b> Основні елементи та характеристики вихрового руху: вихрова лінія та її диференціальні рівняння; вихрові трубка, шнур, нитка, їх напруження та інтенсивність; потік вихорів. Циркуляція швидкості. Багатозначний потенціал. Зв'язність області. Теорема Стокса щодо одно- та багатозв'язної області. Багатозначність потенціалу при наявності вихорів. Інтегральна та диференціальна форми рівняння нерозривності для поля вектора вихра. <b>Друга кінематична теорема Гельмгольца про вихорі та її наслідки.</b> Поняття про “вільні вихорі”, смерчі, вири та вихрові кільця. Поле швидкостей, що викликане вихорами; формула Біо-Савара.
Література:	[1]. Додаткова література: [9–11].
Завдання на СРС:	Звернути особливу увагу на застосування теореми Стокса для багатозв'язної області та на зміст багатозначності потенціалу при наявності вихорів додаткова література. З'ясувати зміст та наслідки формули Біо-Савара.
<b>8</b>	<b>Тензор напружень. Основне рівняння динаміки рідин і газів «в напруженнях».</b> Інтегральна форма закону кількості руху; формула Коші; тензор напружень; основні властивості напружень; теорема про нормальні напруження в точці; девіатор нормальних напружень. Основне рівняння динаміки суцільного середовища «в напруженнях». • Використання плаката –схеми.
Література:	[1, 2, 4]. Додаткова література: [9–12].
Завдання на СРС:	Засвоїти фізичний зміст та математичну форму запису основного рівняння динаміки суцільного середовища «в напруженнях».
<b>9</b>	<b>Закони збереження моменту імпульсу та енергії.</b> Формулювання та аналітичний вираз закону збереження моменту імпульсу. Симетрія тензора напружень. Рівняння енергії та переносу тепла.
Література:	[1, 2, 4]. Додаткова література: [9–12].
Завдання на СРС:	Уявити зміст та аналітичний вираз закону збереження моменту імпульсу рідини.
<b>10</b>	<b>Гідростатика.</b> Напруження при рівновазі рідини. Гідростатичний тиск. Диференціальні рівняння рівноваги Л.Ейлера та умови їх інтегрування. Потенціал масових сил. Поверхні рівня та їх диференціальне рівняння. Основне рівняння гідростатики. Закон Паскаля. Гідростатичний парадокс Галілея. Стійкість рівноваги нестисливої рідини. Абсолютна та відносна рівновага рідини. Визначення сил і моментів, що діють на тверді поверхні й тіла в рідині. Закон Архімеда. • Використання мультимедійних засобів для демонстрації слайдів.
Література:	[1, 2, 4, 5, 8]. Додаткова література: [9–11].
Завдання на СРС:	Самостійно вивчити питання визначення сил тиску рідини на тверді поверхні: Вивчити самостійно розділ «Сили гідростатичного тиску на елементи резервуарів».
<b>11</b>	Рівновага газу. Інтегрування рівняння рівноваги Л.Ейлера для газу. Формули Галлея та Б'єркнеса. Міжнародна стандартна атмосфера. Будова земної атмосфери. Умови механічної та теплової стійкості рівноваги газу.
Література:	[1, 2, 4, 5, 8]. Додаткова література: [9–11].
Завдання на СРС:	Самостійно вивчити питання будови земної атмосфери; додаткова література: [14].
<b>12</b>	<b>Рівняння руху ідеальної рідини, початкові та крайові умови, основні інтеграли.</b> Модель ідеальної рідини. Диференціальні рівняння руху ідеальної рідини Л. Ейлера;

	<p>початкові та крайові умови. Баротропний рух рідини. Рівняння руху в формі Громеки-Лемба. Інтеграл Коші-Лагранжа та Ейлера для потенціального руху. Інтеграл Бернуллі та Громеки для вихрового руху. Рівняння Бернуллі та Ейлера-Бернуллі: фізичний зміст, геометрична інтерпретація. Приклади застосування в гідрогазодинамічних дослідженнях і техніці. Інтеграл Бернуллі для нестационарного руху.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Використання мультимедійних засобів для демонстрації слайдів. Показ навчального відеофільму.</li> </ul>
Література:	[1, 2, 4]. Додаткова література: [9–11].
Завдання на СРС:	Уявити значення диференціального рівняння руху ідеальної рідини в формі Громеки-Лемба та 4-х його інтегралів.
<b>13</b>	<b>Динамічні теореми про вихори.</b> Динаміка вихорів в ідеальній рідині. Рідкий контур. Теорема Томсона (лорда Кельвіна) та її наслідки; теорема Лагранжа. Перша та друга динамічні теореми Гельмгольца про вихори.
Література:	[1]. Додаткова література: [9–11].
<b>14</b>	<b>Застосування законів збереження щодо одновимірних рухів нестисливої рідини.</b> Рівняння нерозривності одновимірного руху в диференціальному вигляді. Рівняння кількості руху та моменту кількості руху за методом Ейлера. Силова дія стаціонарного потоку нестисливої рідини (одновимірні задачі) на твердій поверхні: фасонні частини трубопроводів, перепони, елементи турбін. Основне рівняння лопатевих турбомашин Л.Ейлера ( <b>“турбінне рівняння”</b> ). <ul style="list-style-type: none"> <li>• Використання мультимедійних засобів для демонстрації слайдів. Показ навчального відеофільму.</li> </ul>
Література:	Додаткова література: [9, 10].
Завдання на СРС:	Самостійно вивчити питання силової дія потоку на фасонні частини трубопроводів, перепони, елементи турбомашин, «турбінне» рівняння Л. Ейлера.
<b>15</b>	<b>Енергетичний баланс одновимірних потоків. Гідравлічні опори при течії рідини в трубопроводах.</b> Внутрішня задача технічної гідромеханіки в'язкої рідини. Рівняння Д. Бернуллі для елементарного струменя та для потоку в'язкої нестисливої рідини. Коефіцієнт кінетичної енергії Коріоліса. Гідравлічні опори, їх природа. Структура загальних формул щодо гідравлічних втрат напору. Коефіцієнт кількості руху (поток імпульсу) Буссинеска. Втрати напору на тертя за довжиною каналу; місцеві втрати напору. Теорема Борда-Карно та її застосування. Ділянки гідродинамічної стабілізації ( <b>“початкові ділянки”</b> ) ламінарного та турбулентного потоків в трубах. Принцип суперпозиції втрат напору. Поняття про інтерференцію місцевих опорів. Складні трубопроводи.
Література:	[1–3, 6, 8]. Додаткова література: [9, 10].
<b>16</b>	<b>Витікання нестисливої рідини.</b> Стаціонарне витікання рідини через отвори та насадки; діючий напір; коефіцієнти швидкості, витрати, стиску. Види насадків. Безвідривний та зривний режими витікання через насадки. Критичний напір насадка. Одновимірний нестационарний рух нестисливої рідини. Витікання рідини при змінному напорі; час спорожнення та наповнення резервуарів.
<b>17</b>	<b>Гідравлічний удар.</b> Природа гідравлічного удару. Елементи теорії гідравлічного удару: розповсюдження малих збурень; пружність краплинної рідини; формула М.Є. Жуковського щодо прямого гідравлічного удару. Засоби запобігання гідравлічному удару. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Використання мультимедійних засобів для демонстрації слайдів. Показ навчальних кінофільмів.</li> </ul>
Література:	[2, 3]. Додаткова література: [9, 10].
Завдання на СРС:	Самостійно вивчити питання одновимірного нестационарного руху рідини. Прямий та непрямий гідравлічний удар [2], [3]. додаткова література: [9, 10].



18	<b>Кінематика плоских потенціальних течій.</b> Вихор вектора швидкості. Потенціал швидкості; функція течії; ортогональна сітка течії. Умови Коші-Рімана й комплексний потенціал. Комплексно-спряжена швидкість. Площина годографу швидкості. Властивості інтеграла по довільному замкненому контуру від комплексно-спряженої швидкості.
19	Найпростіші плоскі потенціальні течії: <b>1.</b> Плоскопаралельний потік. <b>2.</b> Точкові джерело й стік. <b>3.</b> Точковий вихор (циркуляційна течія). Порівняння вільних («потенціальних») і змушених вихорів. <b>4.</b> Вихроджерело, вихростік. <b>5.</b> Гідродинамічний диполь.
Література:	[1, 2]. Додаткова література: [9–11].
20	<b>Динаміка потенціальних течій.</b> Безциркуляційне обтікання колового циліндра. Парадокс Ейлера –Д'Аламбера. Циркуляційне обтікання циліндра. Теорема М.Є. Жуковського для підйимальної сили. Ефект Магнуса та практичні випадки застосування його. Елементи теорії профіля; конформні відображення; теоретичні профілі. Поняття про метод скінченних елементів та метод дискретних вихорів. Постулат Жуковського-Чаплигіна. Поняття про обтікання решітки профілів. • Використання мультимедійних засобів для демонстрації слайдів. Показ навчального кінофільму.
Література:	[1, 2]. Додаткова література: [9–11].
Завдання на СРС:	Самостійно вивчити питання відривного обтікання профілів у складі решітки профілів; додаткова література [9–11].
21	<b>Динаміка в'язкої рідини. Узагальнений закон Ньютона. Рівняння руху Нав'є-Стокса; умови однозначності. Елементи теорії гідромеханічної подібності та моделювання течій.</b> Основні критерії подібності. Парадокси моделювання та принцип часткової подібності. Метод розмінностей. П-теорема. Елементи експериментальної гідроаеромеханіки. • Використання мультимедійних засобів для демонстрації слайдів.
Література:	[1, 2, 4]. Додаткова література: [9–12].
Завдання на СРС:	Самостійно поглиблено вивчити П-теорему, питання практичного застосування теорії подібності для постановки гідромеханічного експерименту
22	<b>Ламінарна та турбулентна течії. Рейнольдсів тензор турбулентних напружень.</b> Стабілізована ламінарна течія в круглій трубі: профіль швидкості Стокса; коефіцієнт гідравлічного тертя; формула Хагена-Пуазейля. Турбулентність, механізми її виникнення, внутрішня структура, каскадна схема. Поняття про «когерентну» турбулентність. Методи осереднення параметрів турбулентної течії. Ергодична гіпотеза. Статистичні характеристики турбулентності: ступінь турбулентності, кореляційні моменти зв'язку, коефіцієнти кореляції, масштаб турбулентності. Диференціальні рівняння О. Рейнольдса для турбулентної течії; тензор турбулентних напружень.
23	<b>Напівемпіричні теорії турбулентного переносу. Закони розподілу швидкості та опору для труб.</b> Проблема «замикання» системи рівнянь турбулентного переносу. Моделі турбулентних напружень, їх характеристики та схеми «замикання». Закони розподілу швидкості в турбулентному потоці. Напівемпіричні закони опору при стабілізованому русі у трубах; графіки Нікурадзе, Ісаєва, Муріна та ін. Основні методи сучасного комп'ютерного моделювання в'язких течій. • Використання плакатів –схем.
Література:	[1, 2, 4, 6, 8]. Додаткова література: [9–12].
Завдання на СРС:	Самостійно ознайомитись з багатопараметричними диференціальними моделями турбулентності з додаткової літератури [19].
24, 25	<b>Гідродинамічний примежовий шар та його основні характеристики. Рівняння Прандтля примежового шару. Задача Блазіуса.</b> Основні характеристики примежового шару (товщина, товщина витіснення, товщина втрати імпульсу, товщина втрати енергії), його види та структура; зона переходу. Математичні моделі: рівняння

	Л. Прандтля для ламінарного примежового шару (ЛПШ), оцінки порядку його членів та співвідношення, що відображають основні властивості ЛПШ; розв'язки задачі Блазіуса; рівняння турбулентного примежового шару. Умови й запобігання відриву примежового шару, методи управління ним. Відривні кавітаційні течії. • Використання мультимедійних засобів для демонстрації слайдів.
Література:	[1, 2, 4]. Додаткова література: [9–12].
Завдання на СРС:	Звернути особливу увагу на практичне визначення характеристик примежового шару та сил опору при обтіканні рідиною твердих поверхонь. Проаналізувати умови виникнення відриву примежового шару та охарактеризувати методи керування відривом. Самостійно ознайомитись з інтегральними співвідношеннями примежового шару.
<b>26, 27</b>	<b>Основні співвідношення щодо одновимірних течій газу. Способи одержання надзвукових швидкостей.</b> Рівняння газової динаміки. Ізотермічна та адіабатна течії ідеального газу. Інтеграл Бернуллі для вихрового адіабатного руху ідеального газу. Параметри гальмування. Рівняння ентальпії газу. Аеродинамічний нагрів тіл. Рівняння Бернуллі–Сен-Венана. Максимальна та критична швидкості; зведена швидкість. Ізоентропійне витікання газу з резервуара. Газодинамічне та теплове «замикання» сопла. Формула Гюгонію як обґрунтування загальної форми геометричного сопла (Лавалю). Способи одержання надзвукових швидкостей. <b>Стрибки ущільнення. Ударна адіабата. Хвильовий опір.</b>
Література:	[1–4]. Додаткова література: [9,11, 13, 16–18].
Завдання на СРС:	Ознайомитись із таблицями газодинамічних функцій, принципом побудови сопла Лавалю [4, 11, 13].

#### ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ

№ з/п	Назва теми заняття та перелік основних питань (перелік дидактичного забезпечення, посилання на літературу та завдання на СРС)
<b>1</b>	<b>Теми 1.1–2.1. Моделі й властивості суцільних середовищ. Методи вивчення руху, кінематичні поняття й характеристики руху рідких частинок і потоків.</b> Основні фізичні властивості рідин і газів як суцільних середовищ. Витрата, її види. Середня швидкість рідини. Рівняння нерозривності в гідравлічній та диференціальній формах. Режими течії рідини. Епюри швидкостей в ламінарному та турбулентному потоках. Прискорення рідкої частинки, субстанціональна похідна та її складові.
Література:	[1–4, 7, 8]. Додаткова література: [9–11].
Завдання на СРС:	Рідкий контур. Теорема Томсона (лорда Кельвіна) та її наслідки; теорема Лагранжа. Перша та друга динамічні теореми Гельмгольца про вихори. Звернути особливу увагу на зміст формули Біо-Савара, застосування теореми Стокса для багатозв'язної області та зміст багатозначності потенціалу при вихрових течіях.
<b>2</b>	<b>Тема 4.1. Елементи гідрогазостатики.</b> Гідростатичний тиск. Поверхні рівня при відносній рівновазі. Основне рівняння гідростатики. Закон Паскаля. Гідростатичний парадокс Галілея. Визначення сил тиску рідини на плоскі й криволінійні стінки.
Література:	[1, 2, 4, 5, 8]. Додаткова література: [9–11].
Завдання на СРС:	Практичне застосування правил розрахунку сил тиску рідини на тверді поверхні.
<b>3, 4</b>	<b>Теми 6.1–6.3. Енергетичний баланс в'язких одновимірних потоків. Гідравлічні опори при течії рідини в трубопроводах.</b> Внутрішня задача технічної гідромеханіки в'язкої рідини. Рівняння Д. Бернуллі для потоку в'язкої нестисливої рідини. Коефіцієнт кінетичної енергії Коріоліса. Гідравлічні опори. Розрахунок гідравлічних втрат напору й тиску на тертя за довжиною каналу та на місцевих опорах. Теорема Борда-Карно та її застосування. Урахування ділянок гідродинамічної стабілізації ("початкових ділянок") ламінарного та турбулентного потоків в



	трубах. Принцип суперпозиції втрат напору. Урахування інтерференції місцевих опорів. <b>Витікання нестисливої рідини через отвори та насадки. Гідравлічний удар.</b>
Література:	[1–3, 6, 8]. Додаткова література: [9, 10].
Завдання на СРС:	Самостійно вивчити питання витікання рідини через отвори і насадки, а також проробити питання прямого гідравлічного удару.
<b>5, 6</b>	<b>Теми 8.1–8.3. Диференціальні рівняння руху Нав'є-Стокса. Елементи теорії подібності й моделювання гідрогазодинамічних явищ.</b> Задачі на застосування критеріїв гідродинамічної подібності. Напівемпіричні теорії турбулентного переносу. Розрахунки гідравлічних втрат напору при течії рідин в трубах при ламінарному і турбулентному режимах. Застосування графіків Нікурадзе, Ісаєва, Муріна та ін.
Література:	[1, 2, 4]. Додаткова література: [9–12].
Завдання на СРС:	Практичне застосування простіших класичних моделей турбулентності в розрахунках течій; додаткова література [1, 2, 4]. Додаткова література: [9–12].]. Можливості щодо практичного застосування існуючих методів моделювання турбулентних течій [19, 20].
<b>7</b>	<b>Модульна контрольна робота по матеріалах пророблених тем 1.1 — 8.3.</b> <b>Теми 6.1–6.2. Основні характеристики та рівняння примежового шару.</b> Основні характеристики примежового шару (товщина, товщина витіснення, товщина втрати імпульсу, товщина втрати енергії, обчислення числа Рейнольдса). Рівняння Л. Прандтля для ламінарного примежового шару. Співвідношення, що відображають основні властивості ЛПШ; застосування співвідношень задачі Блазіуса. Інтегральне співвідношення Кармана. Практичне визначення сил опору при обтіканні рідиною твердих поверхонь.
Література:	[1, 2, 4]. Додаткова література: [9–12].
Завдання на СРС:	Самостійно ознайомитись з інтегральними співвідношеннями примежового шару, з методами розрахунку ламінарних і турбулентних примежових шарів. Додаткова література: [9–12, 19].
<b>8, 9</b>	<b>Теми 7.1–7.2. Основні співвідношення щодо одновимірних течій газу. Способи одержання надзвукових швидкостей.</b> Рівняння газової динаміки. Ізотермічна та адіабатна течії ідеального газу. Інтеграл Бернуллі для вихрового адіабатного руху ідеального газу. Параметри гальмування. Застосування рівняння ентальпії газу. Максимальна та критична швидкості; зведена швидкість. Ізоентропійне витікання газу з резервуара. Газодинамічне та теплове «замикання» сопла. Формула Гюгоніо як обґрунтування загальної форми геометричного сопла (Лавалю). Способи одержання надзвукових швидкостей. <b>Сстрибки ущільнення. Ударна адіабата. Хвильовий опір.</b>
Література:	[1–4]. Додаткова література: [9, 11, 13, 16–18].
Завдання на СРС:	Робота з таблицями газодинамічних функцій, принципом побудови сопла Лавалю [4, 11, 13].

#### ЛАБОРАТОРНІ ЗАНЯТТЯ

Основні завдання циклу лабораторних занять: закріплення знань, набутих на лекціях, практичних заняттях, а також при самостійній проробці матеріалу курсу. Лабораторні роботи, що супроводжується відповідними розрахунками, сприяють наочному вивченню студентами гідрогазодинамічних процесів і явищ.

Перелік лабораторних робіт надано відповідно до розділів і тем лекційного курсу.

№ з/п	Назва лабораторної роботи	Кількість ауд. годин
1	<b>«Фізичні моделі й властивості рідин та газів» (розділ 1, тема 1), «Гідрогазостатика» (розділ 4, тема 4.1). Варіант 1:</b> Гідростатичний тиск та його вимірювання. <b>Варіант 2:</b> Прилади для вимірювання тиску. Перевірка робочого манометра.	2
2	<b>«Гідрогазостатика» (розділ 4, тема 4.1):</b> Вивчення відносного спокою	2

	рідини.	
3	«Кінематика рідини» (розділ 2, тема 2.1): Вивчення режимів руху рідини.	2
4	«Динаміка ідеальної рідини» (розділ 5, тема 5.1), «Елементи гідравліки в'язкої нестисливої рідини» (розділ 6, тема 1): Дослідне вивчення рівняння Бернуллі.	2
5	«Кінематика рідини» (розділ 2, тема 2.1), «Динаміка ідеальної рідини» (розділ 5, тема 5.1), «Елементи гідравліки в'язкої нестисливої рідини» (розділ 6, тема 6.1), : Прилади для вимірювання витрат рідини. Градування витратомірного пристрою змінного перепаду тиску.	2
6	«Елементи гідравліки в'язкої нестисливої рідини» (розділ 6, тема 6.1), «Динаміка в'язкої рідини» (розділ 8, теми 8.2, 8.3): Втрати напору на тертя по довжині труби. Визначення коефіцієнтів гідравлічного тертя.	2
7	«Елементи гідравліки в'язкої нестисливої рідини» (розділ 6, тема 6.1): Місцеві втрати напору. Визначення коефіцієнтів місцевих опорів.	2
8	«Елементи гідравліки в'язкої нестисливої рідини» (розділ 6, тема 6.2): Витікання нестисливої рідини через отвори й насадки.	2
9	«Рух газу з до- та надзвуковими швидкостями» (розділ 10, тема 10.1): Ізоентропійне витікання газу з резервуара.	2

### 6. Самостійна робота студента

Метою самостійної роботи є засвоєння наданих на лекціях теоретичних матеріалів. Самостійна робота студентів складається з підготовки до аудиторних занять, розв'язання завдань, які відображають окремі фрагменти лекційного матеріалу щодо його поглибленої проробки, виконання модульної контрольної роботи (МКР), а також виконання розрахункової роботи (РР), див. додатки 1–3.

Для виконання розрахункової роботи видаються типові задачі згідно варіанту

## Політика та контроль

### 7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Система вимог, які викладач ставить перед студентом:

- обов'язкове відвідування лекцій, лабораторних і практичних занять, а також готовність відповідей при опитуванні;
- необхідне виконання таких вимог: активність, підготовка коротких доповідей чи текстів, відключення телефонів; відповідно до завдання викладача використання засобів зв'язку для пошуку інформації на гугл-диску викладача чи в інтернеті;
- заохочувальні бали надаються у відповідності до «системи оцінювання результатів», штрафні бали є засобом протидії плагіату та несамостійному виконанню робіт;
- політика дедлайнів та перескладань полягає в виконанні поточних модульних робіт до початку сесії;
- політика щодо академічної доброчесності відповідає загальним положенням, прийнятим в «КПІ ім. Сікорського» (детальніше: <https://kpi.ua/code>);
- політика навчальної дисципліни спрямована на розвиток індивідуальних здібностей в напрямку набуття компетентностей щодо створення та модернізації сучасних енергетичних систем, унікального обладнання в галузях котло- і реакторобудування, експериментальної теплофізики, ядерної та теплової енергетики, а також в напрямку розширення сфер застосування отриманих знань, умінь і досвіду.
- за бажанням студентів, допускається вивчення матеріалу за допомогою англійських онлайн-курсів за тематикою, яка відповідає тематиці конкретних занять.

### 8. Види контролю та рейтингова система оцінювання результатів навчання (PCO)

Види контролю знань студентів з дисципліни ГГД:

- відповіді на практичних заняттях;
- виконання та захист лабораторних робіт;

- виконання МКР;
- виконання розрахункової роботи (РР);
- відповідь на екзамені – максимально 40 балів.

Рейтинг студента з дисципліни ГГД складається з балів, які він отримує за:

1) дві відповіді, в середньому, кожного студента на практичних заняттях (на одному занятті опитуються приблизно 4 студенти; при середній чисельності групи 20 осіб і дев'яти практичних заняттях (18 годин) отримуємо:  $4 \cdot 9 / 20 \approx 2$  відп.);

- 2) виконання та захист 9 лабораторних робіт;
- 3) виконання 1 МКР;
- 4) виконання РР;
- 5) відповідь на екзамені.

**Система рейтингових балів та критерії оцінювання**

### **1. Робота на практичних заняттях**

Ваговий бал — 4. Максимальна кількість балів студента на всіх практичних заняттях дорівнює  $r_1=4$  бали  $\times 2 = 8$  балів.

Критерії оцінювання:

**4 бали** — повна вірна відповідь або правильний розв'язок завдання; **3 бали** — відповідь або розв'язання завдання мають несуттєві похибки; **2 бали** — неповні відповідь або розв'язання завдання; **1 бал** — наявність суттєвих помилок в неповних відповіді або розв'язанні завдань; **0 балів** — відсутність відповіді або розв'язання завдання.

### **2. Лабораторні роботи**

Ваговий бал — 4. Максимальна кількість балів студента за всі лабораторні роботи дорівнює  $r_2=4$  бали  $\times 9 = 36$  балів.

Критерії оцінювання (підготовка, виконання, якість захисту роботи):

**4 бали** — при попередній перевірці підготовленості до виконання лабораторної роботи студент дає чіткі відповіді на контрольні запитання, добре орієнтується в лабораторному устаткуванні, приладах і в методиці виконання дослідів, отримує задовільні результати дослідів, дає їх вичерпане пояснення й відмінно захищає; **3 бали** — студент добре знає теоретичний матеріал, добре орієнтується в методиці проведення роботи і отримує задовільні результати дослідів, але допускає незначні похибки в процесі їх проведення та при відповідях на контрольні запитання; **2 бали** — студент не повністю орієнтується в теоретичному матеріалі, допускає похибки в процесі виконання дослідів і обробці їх результатів; **1 бал** — студент робить суттєві помилки у відповідях при попередній перевірці знань, в процесі виконання та при захисті роботи, але після корегування викладачем результати дослідів можна вважати задовільними; **0 балів** — повна непідготовленість до виконання роботи або відсутність її результатів.

**Штрафні бали за:**

- недопуск до лабораторних робіт за результатами вхідного контролю — - **5 балів**;
- відсутність на лабораторному занятті без поважної причини — - **5 балів**;
- несвоечасний захист лабораторної роботи без поважної причини — - **5 балів**.

### **3. Розрахункова робота (РР)**

Максимальна кількість балів дорівнює  $r_3= 4$ . РР являє собою комплексне практичне завдання, що передбачає використання відомого або самостійно засвоєного теоретичного матеріалу, і складається з аргументовано виконаних розрахунків, докладних пояснень, а також необхідних схем та ескізів.

Критерії оцінювання РР:

**4 бали** — повне та правильне розв'язання завдання; **3 бали** — розв'язок або хід розв'язання завдання мають несуттєві похибки; **2 бали** — неповне розв'язання завдання; **1 бал** — наявність суттєвих помилок в неповному розв'язанні завдання; **0 балів** — завдання повністю не виконане.

### **4. Модульна контрольна робота (МКР)**

Ваговий бал — 4. Максимальна кількість балів за самостійну роботу над 3 завданнями МКР дорівнює  $r_4=4 \times 3 = 12$  балів.

Критерії оцінювання аналогічні критеріям, застосованим щодо аналізу якості виконання РР.

**Штрафні та заохочувальні бали**

- несвоечасне (пізніше ніж за тиждень) подання РР або МКР..... — - **2 бали**;
- участь в олімпіадах з гідрогазодинаміки, студентських наукових конференціях, модернізації лабораторних робіт і дидактичних матеріалів..... — **+5 балів**.

**Поточний контроль:** опитування на практичних заняттях, виконання та захист лабораторних робіт, виконання на захист МКР, РР. **Календарний контроль:** провадиться двічі на семестр як моніторинг стану виконання вимог силабусу і враховує суму поточних балів кожного студента.

#### **5. Критерії оцінювання відповідей на екзамені**

Екзаменаційний білет складається з трьох питань: 2 теоретичних (вага кожного питання 15 балів) та практичного завдання (10 балів). Максимальна кількість балів становить **30+10 = 40 балів**.

#### **6. Розрахунок шкали рейтингу з дисципліни ( $R_d$ ):**

Сума вагових балів контрольних заходів в семестрі (стартовий рейтинг) складає:  $R_c = \sum_i r_i$ ,

де  $r_i$  — рейтингові або вагові бали за кожний вид робіт з дисципліни.

Тоді сума вагових балів контрольних заходів протягом семестру складає максимально можливий стартовий рейтинг:  $R_c = 8+36+4+12 = 60$  балів.

Екзаменаційна складова  $R_E$  шкали дорівнює:  $R_E = 40$  балів.

Таким чином, максимальна кількість балів за рейтинговою шкалою з дисципліни складає

$$R_D = R_c + R_E = 60 + 40 = 100 \text{ балів.}$$

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою:

Кількість балів	Оцінка
100-95	Відмінно
94-85	Дуже добре
84-75	Добре
74-65	Задовільно
64-60	Достатньо
Менше 60	Незадовільно
Не виконані умови допуску	Не допущено

Студенти, які набрали в семестрі рейтинг з дисципліни більше, ніж  $0,5 \times R_c = 30$  балів, допускаються до екзамену. Студенти, які набрали в семестрі рейтинг з дисципліни менше, ніж  $0,5 \times R_c = 25$  балів, зобов'язані до початку екзаменаційної сесії підвищити його, інакше вони не допускаються до екзамену з цієї дисципліни і мають академічну заборгованість.

Згідно Тимчасового регламенту проведення семестрового контролю в дистанційному режимі (Наказ № 7/86 від 08.05 2020 року), допускається застосувати підхід щодо виставлення оцінки з кредитного модуля «автоматом» шляхом пропорційного перерахунку стартових балів у підсумкові за 100-бальною шкалою. При цьому обов'язковим залишається виконання аспірантом умов допуску до екзамену. Студентам, які набрали фактичний стартовий рейтинг не менший, ніж 0,9 від максимально можливого (тобто  $R_c \geq 45$ ), екзаменатор може запропонувати виставити оцінку «Дуже добре». Найвища оцінка «автоматом» не виставляється.

Переведення стартових балів у підсумкові здійснюється за формулою

$$R = 50 + \frac{50 \cdot (R_i - R_D)}{(R_c - R_D)},$$

де  $R$  – оцінка за 100-бальною шкалою;

$R_i$  – сума балів, набраних аспірантом продовж семестру;

$R_c$  – максимальна сума вагових балів контрольних заходів продовж семестру;

$R_D$  – бал допуску до екзамену.

Студенти, які хочуть підвищити оцінку з кредитного модуля, виконують екзаменаційну роботу. При цьому переведення стартових балів у підсумкові не здійснюється.

#### **Процедура оскарження результатів контрольних заходів**

Студенти мають можливість підняти будь-яке питання, яке стосується процедури контрольних заходів та очікувати, що воно буде розглянуто згідно із наперед визначеними процедурами.

Студенти мають право оскаржити результати контрольних заходів, але обов'язково аргументовано, пояснивши з яким критерієм не погоджуються відповідно до оціночного листа та/або зауважень.

Норми етичної поведінки студентів і працівників визначені у розділі 2 Кодексу честі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Детальніше: <https://kpi.ua/code>).

## **9. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)**

### *1. Дистанційне навчання:*

В умовах дистанційного режиму організація освітнього процесу здійснюється з використанням технологій дистанційного навчання: платформи дистанційного навчання «Сікорський» та «Електронний кампус». Навчальний процес у дистанційному режимі здійснюється відповідно до затвердженого розкладу навчальних занять. Заняття проходять з використанням сучасних ресурсів проведення онлайн-зустрічей (організація відео-конференцій на платформі Zoom).

### *2. Навчання в умовах правового режиму воєнного стану:*

- передбачає проведення усіх видів занять дистанційно (з використанням синхронної або асинхронної моделі освітньої взаємодії), у відповідності до Регламенту організації освітнього процесу в дистанційному режимі та Положення про дистанційне навчання в КПІ ім. Ігоря Сікорського;
- кінцеві терміни виконання індивідуальних завдань і завдань самостійної роботи переносяться на кінець семестру (з обов'язковим виконанням і захистом);
- у рейтингову систему оцінювання вносяться зміни стосовно нарахування штрафних балів за не своєчасне виконання завдань: штрафні бали не нараховуються.

3. Для студентів існує можливість зарахування (у вигляді додаткових балів до рейтингу до 10 балів):

- сертифікатів проходження дистанційних чи онлайн курсів за тематикою дисципліни;
- сертифікатів, які підтверджують участь у науково-практичних і наукових конференціях за тематикою дисципліни.

## **Додаток 1**

### ***Загальна тематика завдань для модульної контрольної роботи***

- 1.** Визначення сил і моментів, що діють на плоскі й криволінійні поверхні кришок, люків, внутрішніх стінок резервуарів, що знаходяться під дією надлишкового тиску рідини в стані рівноваги (розділ 4, тема 4.1).
- 2.** Застосування методу Ейлера при розрахунках кінематичних характеристик потенціальних течій нестисливої рідини та течій з дискретними вихровими нитками (розділ 2, теми 2.1, 2.2; розділ 7, тема 7.1).
- 3.** Застосування методу конформних відображень в задачах плоского безвихрового обтікання різних контурів (розділ 7, теми 7.1, 7.2).
- 4.** Розрахунки динаміки нев'язкої нестисливої рідини (розділ 5, теми 5.1, 5.2, 5.3).
- 5.** Визначення гідродинамічних реакцій при русі тіл в нев'язкій рідині (розділ 5, теми 5.2, 5.3; розділ 7, теми 7.1, 7.2).
- 6.** Розрахунки кінематичних і динамічних характеристик течії в'язкої течії (розділ 2, теми 7.1, 7.2; розділ 3, тема 3.2; розділ 8, теми 8.1–8.4; розділ 9, теми 9.1, 9.2).
- 7.** Застосування теорії подібності й розмірності в задачах гідрогазодинаміки (розділ 8, тема 8.1).
- 8.** Внутрішні задачі гідромеханіки: гідравлічні розрахунки простих трубопроводів; спорожнення та заповнення ємкостей; гідравлічний удар (розділ 6, теми 6.1–6.3).
- 9.** Гідравлічні розрахунки складних трубопроводів (розділ 6, тема 6.1; розділ 8, тема 8.3).
- 10.** Розрахунки характеристик примежового шару та опору при зовнішньому обтіканні тіл, (розділ 9, теми 9.1, 9.2).
- 11.** Одновимірні ізоентропійні течії та застосування газодинамічних функцій при розв'язанні задач до- і надзвукових течій газу (розділ 10, теми 10.1, 10.2).
- 12.** Особливості вимірювання параметрів надзвукової течії за допомогою пневмометричних насадків (розділ 10, теми 10.1, 10.2).
- 13.** Розрахунки та побудова надзвукового геометричного сопла заданих параметрів (розділ 10, тема 10.1).
- 14.** Конструкції аеродинамічних труб до- і надзвукових швидкостей та розрахунки їх окремих елементів (розділ 8, тема 8.1; розділ 9, теми 9.1–9.3; розділ 10, теми 10.1, 10.2).

15. Аналітичне та графічне порівняння ударної адіабати з ідеальною адіабатою Пуассона. Зміна ентропії при ударному стисненні. Доведення неможливості утворення ударних хвиль розрідження в енергоізолюваній системі (розділ, теми 7.1–7.2).

## Додаток 2

### *Приклади задач для модульної контрольної роботи*

1. З'ясувати закономірність розподілу осьової швидкості  $u$  в круглій концентричній кільцевій горизонтальній трубі при ламінарній течії вздовж осі в'язкої рідини. Радіуси труб  $R_1$  і  $R_2$ .
2. Отримати закономірність розподілу швидкості в тонкому шарі в'язкої рідини поміж концентричними циліндрами, внутрішній з яких обертається з кутовою швидкістю  $\omega$ . Радіуси внутрішнього циліндра  $r_1$ , зовнішнього —  $r_2=r_1+h$ . Знайти момент сили тертя  $M_\tau$ , що діє на одиницю довжини циліндра. При розрахунках прийняти  $\omega=40 \text{ рад/с}$ ,  $r_1=50 \text{ мм}$ ,  $h=0,5 \text{ мм}$ , динамічна в'язкість рідини  $\mu=30 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ , її густина  $\rho=880 \text{ кг/м}^3$ .
3. Визначити закон розподілу швидкості  $u_x = u_x(y)$  та дотичного напруження  $\tau_{yx} = \tau(y)$  при стаціонарній ламінарній течії в'язкої рідини між двома паралельними нерухомими горизонтальними необмеженими площинами, які розташовані на відстані  $h$  одна від другої. Знайти співвідношення між середньою швидкістю  $v_c$  та падінням тиску на одиницю довжини в напрямку течії.
4. Плоска гладка пластина довжиною  $l=0,6 \text{ м}$  та шириною  $b=0,5 \text{ м}$  обтікає потік повітря зі швидкістю  $u_0=2; 4; 6; 8; 10; 12; 14; 16; 18; 20 \text{ м/с}$ . Параметри повітря: абсолютний тиск  $p=10^5 \text{ Па}$ , температура  $T=293 \text{ К}$ . Визначити силу тертя  $R_{\text{тр}}$ , що діє на обидві сторони пластини.
5. Плоска гладка пластина довжиною  $l=2 \text{ м}$  та шириною  $b=0,8 \text{ м}$  обтікає потік води зі швидкістю  $u_0 = 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5 \text{ м/с}$ . Температура води  $T=303 \text{ К}$ . Визначити силу тертя  $R_{\text{тр}}$ , що діє з однієї сторони пластини. Скористатися довідником для визначення густини при даній температурі.
6. Плоска пластина розміром  $L \times B=20 \times 2 \text{ м}$  буксирується в прісній воді (кінематична в'язкість  $\nu=1,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ) спочатку по одному, а потім по другому напрямку. Визначити опір тертя при русі вздовж довгої  $R_L$  та вздовж короткої  $R_B$  сторін пластини. Швидкості буксирування: 1)  $u_0=0,02 \text{ м/с}$ ; 2)  $u_0=0,2 \text{ м/с}$ ; 3)  $u_0=2 \text{ м/с}$ .
7. Краплинна рідина кінематичною в'язкістю  $\nu=3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$  стікає тонкою плівкою з похилої площини з кутом нахилу до горизонту  $\alpha = 30^\circ$ . Визначити товщину плівки  $h$ , та розподіл швидкості поперек плівки, якщо відома об'ємна витрата рідини (на одиницю ширини похилої площини)  $Q=0,007 \text{ м}^3/(\text{с}\cdot\text{м})$ .
8. По шару рідини товщиною  $b=0,5 \text{ мм}$  на похилій площині рухається паралельно їй від куту  $\alpha = 15^\circ$  до горизонталі пластинка з постійною швидкістю  $u_0=0,2 \text{ м/с}$ . Знайти закон розподілу швидкостей в шарі рідини та об'ємну витрату на одиницю ширини похилої площини, а також визначити дотичне напруження  $\tau_0$  на поверхні пластинки. Густина рідини  $\rho=900 \text{ кг/м}^3$ , динамічна в'язкість рідини  $\mu=0,2 \text{ Па}\cdot\text{с}$ . Масою пластинки нехтувати.
9. Пластинка масою  $m=0,8 \text{ кг}$  ковзає по напрямних вздовж похилого шару рідини, товщина якого  $b=0,5 \text{ мм}$ . Визначити динамічну в'язкість  $\mu$  рідини, якщо швидкість рівномірного руху пластинки  $u_0=0,5 \text{ м/с}$ , кут нахилу площини з шаром рідини до горизонту  $\alpha = 12^\circ$ , густина рідини  $\rho=900 \text{ кг/м}^3$ .

**10.** З великого відкритого резервуара А, у якому підтримується постійним рівень рідини, по трубопроводу, який включає дві послідовно з'єднаних труби довжинами  $l_1, l_2$ , внутрішніми діаметрами  $d_1, d_2$ , рідина (**варіанти:** масло трансформаторне, вода прісна, масло веретенне марки АУ, бензин авіаційний, керосин Т-1, керосин Т-2, гліцерин, масло турбінне, дизельне пальне, масло індустріальне 30), при температурі  $t=20^{\circ}\text{C}$  перетікає в нижче розташований відкритий резервуар Б під постійний рівень рідини. Абсолютна еквівалентна шорсткість труб  $k_e=0,1\text{ мм}$ . Різниця рівнів рідини в резервуарах складає  $H$ . Всередині першої труби більшого діаметру встановлено повністю відкриту засувку. З'єднання труб відповідає раптовому звуженню. Визначити об'ємну витрату рідини, що протікає по трубопроводу. Відповідно до варіантів, прийняти значення геометричних параметрів з таких діапазонів:  $H=(6,2-9,2)\text{ м}; l_1=(6,8-13,0)\text{ м}; l_2=(7,4-13,1)\text{ м}; d_1=(40-70)\text{ м}; d_2=(32-50)\text{ м}$ .

**11.** Знайти об'ємну витрату води  $Q$  в магістральному трубопроводі діаметром  $200\text{ мм}$ , якщо в паралельній байпасній вітці діаметром  $50\text{ мм}$  і довжиною  $7\text{ м}$  з двома колінами витратомір дає показ  $Q_2=5\text{ л/с}$ . Коефіцієнт втрат напору в витратомірі вважати рівним  $\zeta=1,5$ ; коефіцієнти гідравлічного тертя на двох вітках трубопроводу прийняти  $\lambda_1 \approx \lambda_2 = 0,025$ . Довжина основної ділянки трубопроводу (від «точки» розгалуження до «точки» злиття потоків) дорівнює  $L=5\text{ м}$ .

**12.** У баці з постійним рівнем рідини остання підігрівається до температури  $t^{\circ}\text{C}$  і самопливом по трубопроводу з матеріалу М довжиною  $l = 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60; 65; 70\text{ м}$  подається до технологічного устаткування. Геометричний напір у баці дорівнює  $H$ . Яким має бути діаметр трубопроводу, що забезпечує подачу рідини об'ємною витратою  $Q$  при манометричному тиску в кінці трубопроводу не нижче  $p_m = 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 23; 24\text{ кПа}$ . При розрахунках прийняти, що місцеві втрати напору складають 20% від втрат за довжиною.

**13.** Насос подає воду з колодязя, забезпечуючи витрату  $Q=20\text{ л/с}$ . Довжина всмоктувальної труби  $L=30\text{ м}$ , її внутрішній діаметр  $D=200\text{ мм}$ . До складу всмоктувальної труби входять: запобіжна сітка, зворотний всмоктувальний клапан, три коліна  $90^{\circ}$  та шиберна засувка. Визначити висоту  $H$  центра насоса над рівнем води в колодязі, якщо допустимий вакуумметричний напір на вході насоса складає  $H_{\text{вак}}=6\text{ м вод. ст.}$

**Вказівка.** Коефіцієнт місцевого опору вузла «запобіжна сітка—зворотний клапан» прийняти таким, як для приймального клапана насоса.

**14.** Визначити, у скільки разів найбільша швидкість повітря у поверхні обтічного тіла перевищує швидкість потоку, що набігає, якщо в момент настання хвильової кризи швидкість потоку, що набігає,  $v_{\infty} = 200\text{ м/с}$ , а температура гальмування  $t_0,^{\circ}\text{C}$  у передній критичній точці тіла (де швидкість повітря дорівнює нулю) складає (по варіантах): **160, 165, 170, 175, 180, 185, 190, 195, 200, 205<sup>0</sup> C**.

**Вказівка.** Для повітря прийняти газову сталу  $R = 287,14\text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ .

**15.** Визначити температуру потоку вуглекислого газу удалені від поверхні колового циліндра при обтікання потенціальним потоком, якщо при настанні хвильової кризи температура в передній критичній точці циліндра  $t_0\text{C}$  дорівнює: **220; 230; 240; 250; 260; 270; 280; 290; 300; 310<sup>0</sup> C**.

**Вказівки.**

1. Хвильова криза виникає тоді, коли **місцева** швидкість газового потоку досягає швидкості звуку.

2. Питома газова постійна вуглекислого газу  $R_{\text{CO}_2} = 188,9\text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ .

3. Пам'ятаємо, що при потенціальному обтіканні колового циліндра найбільша швидкість спостерігається на його поверхні в точках  $\vartheta = \pm \pi/2$  (найбільш віддалених від центра кола в площині, нормальній до вектора швидкості потоку, що набігає).

**16.** Газ ( $k = 1,25$ ) витікає з бака через сопло, що звужується. В баці підтримується постійний тиск  $p_0 = 1,8 \cdot 10^5\text{ Па}$ , швидкості повітря в ньому можна вважати нескінченно малими. Визначити тиск у



вихідному перерізі сопла для двох випадків тиску  $p_{зовн}$  в зовнішньому просторі за соплом:

$$1,2 \cdot 10^5 \text{ Па}; \quad 0,8 \cdot 10^5.$$

**Вказівка.** Пригадати аналіз формули Сен-Венана і Вантцеля з підрозділу «Витікання газу з великої ємності через отвори або сопла». Порівняти у двох випадках співвідношення  $p_{зовн}/p_0$  з критичним значенням величини

$$\beta_{кр} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}.$$

**17.** Визначити, при якому значенні числа Маха-Маієвського потоку, що набігає, настане хвильова криза при поперечному обтіканні колового циліндра потоком повітря температурою  $t_\infty = 100^\circ\text{C}$  та знайти температуру, до якої нагрівається циліндр в передній критичній точці.

**Вказівка.** Вважати, що розподіл швидкості аналогічний розподілу її в нестисливій рідині.

**18.** Знайти необхідну верхню границю вимірювань термометра для визначення температури газового потоку при максимальній швидкості  $v_\infty = 1000 \text{ м/с}$ , якщо при цій швидкості кут конуса збурень Маха  $\alpha = 30^\circ$ . Коефіцієнт неповноти гальмування чутливої частини термометра  $\beta' = 0,8; 0,85$ . Вид газу:  $\text{O}_2; \text{N}_2$ ; повітря;  $\text{CO}_2; \text{CO}$  (варіанти завдань передбачають різні сполучення даних щодо виду газу та  $\beta'$ ). Визначити також температуру газового потоку, що набігає,  $T_\infty$ .

### Додаток 3

#### *Приклади типових завдань для розрахункової роботи*

**1.** Розрахунок гідравлічної системи енергетичної установки. Включає: **а)** визначення сил і моментів, що діють на плоскі й криволінійні поверхні кришок, люків, внутрішніх стінок резервуарів, що знаходяться під дією надлишкового тиску; **б)** визначення сумарних втрат напору і тиску в проточному тракті гідравлічної системи, що включає різні види арматури та інших елементів місцевих опорів, з урахуванням неізотермічності течії в окремих ділянках трубопроводу; **в)** аналіз небезпеки виникнення гідравлічного удару в системі (розділи 1, 2; розділ 4, тема 4.1; розділ 6, теми 6.1, 6.2, 6.3; розділ 8, теми 8.1., 8.2).

**2.** Побудувати один з частинних випадків профілю крила (лопатки осьового компресора) Жуковського, застосувавши конформне перетворення площини комплексної змінної  $z = x+iy$  за допомогою формули перетворення Жуковського  $\zeta = B(z+1/z)$ , де  $B$  – дійсна змінна, яка визначається за заданим розміром профілю. В профіль крила перетворюється коло  $C$ , що проходить через точку з координатами  $x=1, y=0$ , з центром в точці  $x_1 = -0,1, y_1 = +0,1$ . Знайти підйомну силу  $R_y$  за умови швидкості плоскопаралельного потоку в нескінченності  $v_\infty = 100 \text{ м/с}$  при куті атаки  $\alpha = 5^\circ$ , густині рідини  $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$  і хорді профілю  $b = 1 \text{ м}$  (розділ 7, теми 7.1, 7.2).

**3.** На вході до сопла Лавалю повітря має температуру гальмування  $T_{01}$ , тиск гальмування  $p_{01}$ , статичний тиск  $p_1$ . Тиск оточуючого середовища  $p_n$ . Площа мінімального перерізу сопла  $S_{min}$ . Завдання: а) визначити параметри і швидкість повітря в мінімальному та вихідному перерізах сопла, а також масову витрату повітря через сопло; б) накреслити в масштабі сопло відповідно до отриманих рекомендацій, а також зобразити під соплом криві зміни тиску і температури повітря вздовж сопла (розділ 10, тема 10.1).

#### **Робочу програму навчальної дисципліни Гідрогазодинаміка (силабус):**

складено професором кафедри ПГМ, канд. технічних наук, доцентом Туриком Володимиром Миколайовичем

**Ухвалено** кафедрою прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки (протокол № 8 від 29.06.2022)

**Погоджено** Методичною комісією ТЕФ (протокол № 9 від 30.06.2022 р.)