



ГАЗОДИНАМІКА

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

7. Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти

Другий (магістерський)

Галузь знань	10 — Природничі науки
Спеціальність	105 — Прикладна фізика та наноматеріали
Освітня програма	Прикладна фізика
Статус дисципліни	Вибіркова
Форма навчання	очна(денна)/дистанційна/змішана
Рік підготовки, семестр	5 курс, весняний семестр
Обсяг дисципліни	4 кредити (120 годин)
Семестровий контроль/ контрольні заходи	Екзамен
Розклад занять	Лекції 36 годин, 1 модульна контр. робота, 1 домашня контр. робота
Мова викладання	Українська/Англійська/
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: канд. наук, професор, Турик Володимир Миколайович , Turick46@gmail.com
Розміщення курсу	https://campus.kpi.ua

8. Програма навчальної дисципліни

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

Газодинаміка — це розділ механіки, що вивчає рух легкорухомого матеріального середовища (газ, пара, багатокомпонентні та багатофазні суміші) за умов, коли на властивості руху впливає стисливість речовини. Її прояв та вплив на кількісні і якісні характеристики течії залежать не тільки від виду середовища, а в першу чергу від швидкості його руху. При цьому якими малими не були б відносні зміни густини середовища, навіть невеликі прояви стисливості можуть обумовлювати існування явищ поширення по середовищу як слабких акустичних збурень, так і сильного збурення тиску, наприклад від вибуху. В газодинаміці теоретичне вивчення руху реальних середовищ і фізичних явищ в них у більшості випадків базується на моделі матеріального континуума. Малі рухомі індивідуальні або субстанціальні (тобто які складаються з однієї і тої самої речовини) об'єми (частинки) середовища розглядаються як термодинамічні системи, стан яких характеризується скінченною кількістю визначальних параметрів. В макроскопічно неоднорідних стисливих середовищах властивості та співвідношення між структурними елементами в частинці можуть при її русі змінюватися. Тоді визначають параметри для кожного виду структурних елементів, вводячи тим самим декілька континуумів, що заповнюють певну область простору з рухомим середовищем. Оволодіння основними положеннями газодинаміки є необхідною передумовою професійної діяльності фахівців в галузі прикладної фізики, зокрема фізики енергетичних систем, а також в галузі новітніх нанотехнологій. **Метою** викладання дисципліни «Газодинаміка» є формування у студентів здатності: ставити,

аналізувати та розв'язувати задачі визначення просторово-часових полів параметрів газів, які рухаються з високими швидкостями при заданих початкових і межових умовах; проводити аналітичне, чисельне або експериментальне визначення цих параметрів, що є ключовою частиною розрахунків і проектування раціональних елементів і конструкцій енергетичних систем, об'єктів нової техніки, а також лабораторних установок для фізичних досліджень; проводити дослідження фізичних, газодинамічних процесів в об'єктах енергетичних систем, включаючи експериментальні термоядерні установки, новітні джерела енергії, МГД-машини, теплові насоси, енергетичні та технологічні плазмотрони тощо, без чого неможливе їх проектування та експлуатація. **Предмет** вивчення дисципліни: термодинамічні та акустичні характеристики газодинамічних процесів; закони збереження мас, кількості руху, моменту імпульсу та енергії, в тому числі для багатокомпонентних хімічно реагуючих газових сумішей; вплив стисливості газу на параметри течії; одновимірні хвильові рівняння малих збурень; одновимірна теорія сопла Лавалю; одновимірна течія газу с тертям; загальна умова обернення дії; характеристичні рівняння для ізоентропійної течії, інваріанти Рімана; прямі та косі стрибки ущільнення; плоска та вісесиметрична течії стисливого газу; основні рівняння плоских потенціальних до- та надзвукових потоків; дозвукове та надзвукове обтікання тонкого профілю; взаємодія стрибків ущільнення з примежовим шаром; чисельне та фізичне моделювання до- та надзвукових течій газу. Знання закономірностей руху газів при високих до- і надзвукових швидкостях, їх взаємодії з обтічними тілами, а також вміння самостійно формулювати, аналізувати та розв'язувати задачі газової динаміки дозволять студентам набути таких **компетентностей** (відповідно до ЗК1–10, ФК1–10 Освітньої програми): застосування прийомів та методів газової динаміки щодо розрахунків, аналізу роботи та оптимізації елементів і конструкцій енергетичних установок, машин, споруд, обладнання для фізичних досліджень, в тому числі в галузі новітніх нанотехнологій.

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

Дисципліна «Газодинаміка» передбачає попереднє засвоєння матеріалу математичного аналізу, алгебри та геометрії, теорії диференціальних рівнянь, загальної фізики, тензорного аналізу, фізики суцільних середовищ, теорії теплообміну, основ конвективного теплообміну. Курс забезпечує теоретичну та практичну підготовку для розширеного вивчення дисциплін з моделювання фізичних процесів, теорії конвективного теплообміну, теорії горіння та інших, які визначають робочі процеси енергетичних машин, апаратів та систем використання новітніх джерел енергії.

3. Зміст навчальної дисципліни

Розділ 1. Вступ до курсу газодинаміки.

Тема 1.1. Основні поняття, методи й моделі газодинаміки. Місце газодинаміки у фізиці енергетичних систем та у розвитку інших областей науки і техніки.

Тема 1.2. Термодинамічні та акустичні характеристики газодинамічних процесів.

Розділ 2. Фундаментальні рівняння газодинаміки.

Тема 2.1. Загальний підхід до опису руху газу за методом Лагранжа та перехід до змінних Ейлера. Закон збереження маси.

Тема 2.2. Закон кількості руху. Рівняння Ейлера, Нав'є-Стокса для стисливого газу та можливості їх інтегрування.

Тема 2.3. Закони моменту імпульсу та енергії. Зв'язок із законами термодинаміки.

Тема 2.4. Закони збереження для багатокомпонентних хімічно реагуючих газових сумішей. Рівняння виробництва ентропії.

Розділ 3. Пружні та нелінійні хвилі в газі.

Тема 3.1. Вплив стисливості середовища на параметри течії за тиском і за густиною.

Тема 3.2. Загальна характеристика збурень в газі. Розповсюдження малих збурень в газі, що покоїться. Системи плоских (простих) хвиль та їх математичний опис.

Тема 3.3. Розповсюдження малих збурень в газорідній суміші.

Тема 3.4. Розповсюдження малих збурень в однорідному потоці газу. Конус Маха. Поняття про нелінійні хвилі.

Тема 3.5. Розповсюдження збурень скінченної інтенсивності. Ударні хвилі (стрибки ущільнення): загальна характеристика.

Розділ 4. Одновимірна течія газу.

Тема 4.1. Нестационарний та стаціонарний потоки термічно ідеального газу. Інваріанти Рімана. Метод характеристик.

Тема 4.2. Течія з розривами. Теорія прямого стаціонарного стрибка ущільнення. Ударна адиабата Гюгонію.

Тема 4.3. Косі стрибки ущільнення.

Тема 4.4. Течія газу через сопло Лавалю при розрахунковому та не- розрахунковому режимах. Вплив в'язкості на характер течії в каналі змінного перерізу.

Тема 4.5. Течія газу в до- та надзвукових дифузорах.

Розділ 5. Потенціальні баротропні дозвукові та надзвукові течії газу.

Тема 5.1. Загальне рівняння для потенціалу швидкостей потоку газу. Обтікання тонкого малозігнутого тіла: основні формули лінійної теорії руху газу. Лінеаризація рівняння для потенціалу швидкостей.

Тема 5.2. Дозвуковий рух газу при малих збуреннях. Перерахунок швидкості та тиску від нестисливої рідини на стисливу (правило Прандтля-Глауерта).

Тема 5.3. Надзвуковий рух газу при малих збуреннях. Загальний інтеграл рівняння для потенціалу швидкостей плоского руху газу. Характеристики надзвукового руху (хвилі Маха). Формула Аккерета. Хвильовий опір.

Розділ 6. Взаємодія стрибків ущільнення з примежовим шаром.

Тема 6.1. Взаємодія стрибків ущільнення з примежовим шаром.

Розділ 7. Принципи моделювання течій в газодинаміці.

Тема 7.1. Види моделювання. Чисельні методи розв'язку рівнянь газової динаміки: загальна характеристика. Фізичне моделювання до- та надзвукових течій газу.

10. 4. Навчальні матеріали та ресурси

базова (підручники, навчальні посібники) література

1. **Теодор фон Карман.** Аэродинамика. Избранные темы в их историческом развитии; пер. с англ. Е. Богатырёвой под ред. д.ф.-м.н. А. В. Борисова. Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 208 с.
2. **Людвиг Прандтль.** Гидроаэромеханика; пер. со 2-го нем изд. Г. А. Вольперта. Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. 576 с.
3. **Лойцянский Л. Г.** Механика жидкости и газа. Москва: Наука, 1987. 840 с.
4. **Седов Л. И.** Механика сплошной среды. Т. 1, 2. Москва: Наука, 1973. 536 с.; 584 с.
5. **Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В.** Теоретическая гидромеханика. Часть II. Москва: Физматгиз, 1963. 728 с.
6. **Абрамович Г. Н.** Прикладная газовая динамика. В 2 ч. Москва: Наука, 1991. 600 с.; 304 с.
7. **Черный Г. Г.** Газовая динамика. Москва: Наука, 1988. 424 с.
8. **Черный И. А.** Основы газовой динамики. Москва: Гостоптехиздат, 1961. 200 с.
9. **Фабрикант Н. Я.** Аэродинамика. Москва: Наука, 1964. 816 с.
10. **Стулов В. П.** Лекции по газовой динамике. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 192 с.
11. **Валландер С. В.** Лекции по гидроаэромеханике. Ленинград: Изд-во Ленингр. ун-та, 1978. 296 с.
12. **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.** Теоретическая физика. Т.6. Гидродинамика. Москва: 1988.

736 с.

13. **Овсянников Л. В.** Лекции по основам газовой динамики. Москва: Наука, 1981. 368 с.
14. **Черняк В. Г., Суетин П. Е.** Механика сплошных сред. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 352 с.
15. **Повх И. Л.** Техническая гидромеханика. Ленинград: Машиностроение, 1976. 504 с.
16. **Борисенко А. И.** Газовая динамика двигателей. Москва: Оборонгиз, 1962. 794 с.
17. **Мхитарян А. М., Ушаков В. В., Баскакова А. Г., Трубенко В. Д.** Аэрогидромеханика; под общ. ред. А.М. Мхитаряна. Москва: Машиностроение, 1984. 352 с.
18. **Кудинов А. А.** Техническая гидромеханика. Москва: Машиностроение, 2008. 368 с.
19. **Дейли Дж., Харлеман Д.** Механика жидкости; пер. с англ. под ред. чл.-корр. АН СССР О. Ф. Васильева. Москва: Энергия, 1971. 480 с.
20. **Дейч М. Е.** Техническая газодинамика. Москва: Энергия, 1974. 589 с.
21. **Сергель О. С.** Прикладная гидрогазодинамика. Москва: Машиностроение, 1981. 374 с.
22. **Гинзбург И. П.** Аэрогазодинамика (краткий курс). Москва: Высшая школа, 1968. 404 с.
23. **Єфремов І. І., Турик В. М.** Основи механіки рідини та газу. Київ: НМК ВО, 1990. 84 с.
24. **Пирумов У. Г., Росляков Г. С.** Газовая динамика сопел. Москва.: Наука, 1990. 368 с.
25. **Самойлович Г. С., Нитусов В. В.** Сборник задач по гидроаэромеханике. – Москва: Машиностроение, 1986. 150 с.
26. **Грабовский А. М., Иванов К. Ф., Дунчевский Г. Н.** Гидромеханика и газовая динамика. Сборник задач. Киев: Вища школа, 1987. 64 с.
27. **Давидсон В. Е.** Основы газовой динамики в задачах. Москва: Высшая школа, 1965. 208 с. 28.
- Приходько А. А.** Компьютерные технологии в аэрогидродинамике и тепломассообмене. Киев: НАУКОВА ДУМКА, 2003. 380 с.
29. **Юн А. А.** Моделирование турбулентных течений. Москва: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. 352 с.
30. **Аникеев А. А., Молчанов А. М., Янышев Д. С.** Основы вычислительного теплообмена и гидродинамики. Москва: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. 352 с.
31. **Авраменко А. А., Басок Б.И., Дмитренко Н.П. и др.** Ренормализационно групповой анализ турбулентности: монография. Киев: Институт технической теплофизики НАНУ, 2013. 300 с.
32. **Дешко В.І., В.О. Виноградов-Салтиков, В.Г.Федоров.** Гідрогазодинаміка. – К.: НТУУ КПІ, 2014. — 416 с. <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/7785>.
33. **Альтман Е.І., Бошкова І.Л.** Гідрогазодинаміка. – Одеса: Бондаренко М.О., 2019. — 188 с. <http://card-file.onaft.edu.ua/handle/123456789/8951>.

додаткова (монографії, статті, документи, електронні ресурси) література

1. **Шлихтинг Г.** Возникновение турбулентности: монография; пер. с нем. Г. А. Вольперта; под ред. Л. Г. Лойцянского. Москва: Изд-во иностр. лит., 1962. 204 с.
2. **Аржаников Н. С., Садекова Г. С.** Аэродинамика летательных аппаратов. Москва: Высшая школа, 1983. 359 с.
3. **Тимошенко В. И.** Газовая динамика высокотемпературных технологических процессов. Днепропетровск: Институт технической механики НАНУ и НКАУ, 2003. 460 с.
4. **Тимошенко В. И., Лиманский А. В.** Технология решения на ЭВМ задач газовой динамики. Киев: НАУКОВА ДУМКА, 1985. 232 с.
5. **Беляев Н. М., Хрущ В. К.** Численный расчет свехзвуковых течений газа. Киев: Вища школа, 1984. 224 с.
6. **Роуч П.** Вычислительная гидродинамика. Москва: Мир, 1968. 556 с.

7. **Бонд Дж., Уотсон К., Уэлч Дж.** Физическая теория газовой динамики; пер. с англ. под ред. Г. А. Тирского. Москва: Мир, 1968. 556 с.
11. 8. **Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П.** Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. Москва: Наука, 1966. 688 с.
9. **Мельников А.П.** Аэродинамика больших скоростей. Москва: Воениздат, 1961. 424 с.
10. **Липман Г.В., Рошко А.** Элементы газовой динамики; пер с англ. В. П. Шидловского под ред Э. И. Григолюка. Москва: ИЛ, 1960. 519 с.
11. **Зауер Р.** Течения сжимаемой жидкости; пер. с франц. под ред А. А. Померанцева. Москва: ИЛ, 1954. 312 с.
12. **Бай Ши-И.** Введение в теорию течения сжимаемой жидкости; пер. с англ. под ред. Н. И. Ющенковой. Москва: ИЛ, 1962. 411 с.
13. **Гудерлей К. Г.** Теория околосвуковых течений; пер. с нем. Г. А. Вольперта под ред. Л. В. Овсянникова. Москва: ИЛ, 1960. 422 с.
14. **Теодор фон Карман.** Сверхзвуковая аэродинамика. Принципы и приложения; пер. с англ. и редакция Н. А. Талицких. Москва: ИЛ, 1948. 100 с.
15. **Вулис Л. А.** Термодинамика газовых потоков. Москва: Госэнергоиздат, 1950. 304 с.
16. **Дулов В. Г., Лукьянов Г. А.** Газодинамика процессов истечения. Новосибирск: Наука, 1984. 235 с.
17. **Дейч М. Е, Филиппов Г. А.** Газодинамика двухфазных сред. Москва: Энергия, 1968. 424 с.
18. **Нигматулин Р. Н.** Динамика многофазных сред. В 2 ч. Москва: Наука, 1987. 464 с.; 336 с.
19. **Основы прикладной аэрогазодинамики.** В 2 кн. / Под ред. Н. Ф. Краснова. Москва: Высшая школа, 1990. 336 с.; 1991. 358 с.
20. **Белова А. В., Буравцев А. И., Ковалев М. А., Матвеев С. К. и др.** Лабораторный практикум по аэрогазодинамике. Ленинград: Изд. ЛГУ, 1980. 288 с.
21. **Путята В. Й., Сідляр М. М.** Гідроаеромеханіка. Київ: Видавництво Київського університету, 1963. 480 с.
22. **Мартынов А. К.** Прикладная аэродинамика. Москва: Машиностроение, 1972. 448 с.
23. **Белоцерковский О. М.** Численное моделирование в механике сплошных сред. Москва: Физматлит, 1994. 448 с.
24. **Горлин С.М.** Экспериментальная аэромеханика. Москва: «Высшая школа», 1970. 423 с.
25. **Поуп А., Гойн К.** Аэродинамические трубы больших скоростей; пер. с англ. под ред Н. Н. Широкова. Москва: Мир, 1968. 504 с.
26. Методичні вказівки до індивідуальних занять із дисциплін «Газова динаміка» для студ. спец. «Енергетичне машинобудування» / М.В. Клінкевич, А.В. Скорик. – Суми. СумДУ, 2017. — 44 с.

електронні ресурси

1. znaimo.com.ua>Фізика_суцільних_середовищ
2. [stat.phys.spbu.ru](http://stat.phys.spbu.ru/Courses/12.html)>Courses/12.html
3. [physlg.net](http://physlg.net/to_Students...Continuumphysics.aspx)>to Students...Continuumphysics.aspx
4. <http://www.skif.biz/files/b46f4a.pdf>

рекомендації та роз'яснення

- Всі базові літературні джерела є в бібліотеці КПП та в методичному кабінеті кафедри, додаткові джерела спрямовані на поглиблене ознайомлення з окремими розділами;
- Жодне джерело, як і всі перелічені літературні джерела разом, не є достатніми для опанування дисципліни без конспекту лекцій, який побудовано за певною методикою, що враховує специфіку і об'єм лекційних занять відповідно до освітньої програми.

- Базові джерела містять теоретичні матеріали та приклади за темами дисципліни, що можна використовувати разом з матеріалами лекцій, але тільки під час лекцій пропонується їх інтегральний зв'язок з сучасними проблемами аеродинаміки високих швидкостей, з прикладами і методиками практичної реалізації, чого не можна отримати з жодного літературного джерела;

12. Навчальний контент

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

Методика опанування кожної теми складається з таких компонентів: теоретичні відомості за темою, методики їх застосування, приклади застосування методик, самостійне виконання модульної контрольної роботи (МКР) та домашньої контрольної роботи (ДКР).

ЛЕКЦІЙНІ ЗАНЯТТЯ

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичного забезпечення, посилання на літературу та завдання на СРС)
1	<p><u>Розділ 1. Вступ до курсу газодинаміки.</u></p> <p>Тема 1.1. Основні поняття, методи й моделі газодинаміки. Місце газодинаміки у фізиці енергетичних систем та у розвитку інших областей науки і техніки</p> <p>Предмет, історія розвитку та місце дисципліни «Газодинаміка» при підготовці фахівців в галузі фізико-технічних проблем енергетики, у тому числі нетрадиційних методів отримання та використання енергії, енергомашинобудування, теплофізики. Структура курсу та особливості його студіювання.</p>
Література:	<p>[2] Розділ 4: с. 348, 349; [3] Вступ: с. 9–11; [4] Т.1, Вступ: с. 9–15; [6] Передумови: с. 8–10; [7] Передумова: с. 5–10; [8] Вступ: с. 5–6; [10] Передумова: с.6; [13] Передумова: с.6–11; [14] Розділ 1: с. 8–10; розділ 10: с.250; [16] Вступ: с.5–7; [21] Вступ: с. 4–6.</p> <p>Допоміжна література: [7–15], [21] Розділ 1: §§1, 2, с. 4–11.</p>
Завдання на СРС:	Повторення матеріалу загальної фізики, термодинаміки і фізики суцільних середовищ
1	<p>Тема 1.2. Термодинамічні та акустичні характеристики газодинамічних процесів. Основні фізичні властивості газів: гіпотеза суцільності, число Кнудсена; стисливість; масштаби внутрішньої структури макроскопічно однорідних та неоднорідних середовищ, континуальний опис середовища. «Частинка» як термодинамічна система. Рівноважні та нерівноважні, оборотні та необоротні термодинамічні процеси, релаксація. Основні термодинамічні закони та рівняння. Швидкість звуку та акустичний імпеданс.</p>
Література:	<p>[7] Розділ 1: §1, с. 10–30; [8] Розділ 1: §§1, 2, с.7–16; [10] Лекція 1. Вступ: с. 7–11; [13] Розділ 1: §2; [14]: Розділ 4: 4.12, 4.13, с. 67–72; Розділ 10: 10.1–10.3; [16] Вступ: с.7–20.</p> <p>Допоміжна література: [2], [7–15], [21] Розділ 1: §§3, 4, с. 11–26.</p>
Завдання на СРС:	Засвоїти теоретичний матеріал, прослуханий на лекціях. Звернути особливу увагу на поняття суцільності та сильної розрідженості газів, а також на основні поняття і співвідношення термодинаміки та акустичні параметри.
2	<p><u>Розділ 2. Фундаментальні рівняння газодинаміки.</u></p> <p>Тема 2.1. Загальний підхід до опису руху газу за методом Лагранжа та перехід</p>

	до змінних Ейлера. Закон збереження маси. Системи відліку. Підходи Лагранжа й Ейлера опису руху газу, їх взаємозв'язок. Похідна за часом від інтеграла від деякої функції по об'єму, що залежить від часу. Закон збереження маси: загально-інтегральна форма; рівняння нерозривності в змінних Ейлера та Лагранжа.
Література:	[3] Розділ 3, §18; [4], Т.1, Розділ 2, §§1–3, с. 22–47, Розділ 3: §1; с. 122–124. [6], Ч.1. Розділ 1: §1; розділ 2: §§1, 2; [7] Розділ 1: §2, с. 30–38; [8] Розділ 2: §§1, 2, с. 17–21; [10] Лекція 2: с. 15–17; [11] Розділ 1: §§ 1–4, с. 9–14; §§ 14–15, с. 34–38; Розділ 2: §§ 1–4. с.39–48; [13] Розділ 1: §§1–3, с. 13–29; ; [14] Розділ 4: 4.1, 4.2, 4.3, с. 44–49; [16] Розділ 2: 2.1. Допоміжна література: [21] Розділ 2: §§1–3 с. 38–43; §§6–9 с. 47–53.
Завдання на СРС:	Засвоїти теоретичний матеріал, прослуханий на лекціях. Звернути особливу увагу на диференціювання інтеграла по рухомому об'єму, що змінюється за часом.
2	Тема 2.2. Закон кількості руху. Рівняння Ейлера, Нав'є-Стокса для стисливого газу та можливості їх інтегрування. Закон кількості руху: головні вектори масових і поверхневих сил; інтегральна форма закону кількості руху; формула Коші; тензор напружень; основні властивості напружень; рівняння динаміки суцільного середовища «в напруженнях». Рівняння руху ідеальної рідини (газу) Л. Ейлера та в'язкої рідини Нав'є-Стокса. Форма Громеки-Лемба запису рівнянь руху.
Література:	[3] Розділ 4: §21; Розділ 5: §29; Розділ 10: §§ 84 – 86; Розділ 15: §141; [4] Т.1, Розділ 3: §2; розділ 4: §§2, 3; [4], Т.2, Розділ 8: §2; [6], Ч.1, Розділ 1: §5; розділ 2: §§3 –5; [7] Розділ 1: §§2, 3, с.30–55; §8, с. 142–148; [8] Розділ 2: § 3; [10] Лекція 2: с. 17–18; [11] Розділ 3: §§ 1 – 5; Розділ 7: § 1; Розділ 8: §§1, 2; Розділ 10: §5; [13] Розділ 1: § 3; [14] Розділ 4: 4.4; Розділ 5: 5.1; Розділ 6: 6.1–6.5; [16] Розділ 2: 2.2. Допоміжна література: [21] Розділ 2: §§1 – 14; Розділ 3: §§1 – 8, с. 69–86.
Завдання на СРС:	Порівняти диференціальні рівняння Ейлера, Нав'є-Стокса та Громеки-Лемба з точки зору можливостей інтегрування та практичного застосування.
3	Тема 2.3. Закони моменту імпульсу та енергії. Зв'язок із законами термодинаміки. Інтегральна та диференціальна форми запису закону моменту кількості руху. Внутрішня та повна енергії. Потужність зовнішніх сил. Вектор теплового потоку. Інтегральна та диференціальна форми запису рівняння енергії газу. Дисипативна функція. Рівняння термодинамічного закону збереження енергії, у тому числі відносно ентропії.
Література:	[3] Розділ 5: §31; розділ 15, §141; [4], Т.1, Розділ 3: §§3, 4; Розділ 5: §§ 1–11; [4], Т.2, Розділ 8: §§5, 15; [6], Ч.1, Розділ 1: §§2,4,6,7; розділ 2: §§6, 13; [7] Розділ 1: §§2, 3; [8] Розділ 2: §§4 – 7; [10] Лекція 2: с. 18–21; [11] Розділ 4: §§ 1, 2, с.57–62; Розділ 5: §§ 1 – 6, с.63–69; [14] Розділ 4: 4.5 – 4.11; [16] Розділ 2: 2.3 – 2.4; розділ 9: 9.1. Допоміжна література: [21] Розділ 3: §§9 – 13, с.86–99.
Завдання на СРС:	На підставі закону збереження моменту імпульсу рідини (газу) довести симетрію тензора напружень.

4	Тема 2.4. Закони збереження для багатокомпонентних хімічно реагуючих газових сумішей. Рівняння виробництва ентропії.
Література:	[4], Т.1, Розділ 5: §§ 9–11, с.266–297; [10] Лекція 2: с. 15–21. Допоміжна література: [7–15], [21].
Завдання на СРС:	Засвоїти теоретичний матеріал, прослуханий на лекції. Звернути особливу увагу на різні форми рівняння енергії та складові потоку переносу ентропії.
5	<u>Розділ 3. Пружні та нелінійні хвилі в газі.</u> Тема 3.1. Вплив стисливості середовища на параметри течії. Вплив стисливості «за тиском» і «за густиною». Приклади розрахунків.
Література:	[2], Розділ 4: §1, 2, с.348-363; [3] Розділ 5: §§ 32–33; [8] Розділ 3: § 1; [10] Лекція 1, с. 7–9; [14] Розділ 5: 5.4, с. 91–94; [16] Вступ: с.16–20; [17] Розділ 1: § 1.8, с.22–25.
Завдання на СРС:	Задачі з оцінки впливу стисливості газу на параметри течії.
6	Тема 3.2. Загальна характеристика збурень в газі. Розповсюдження малих збурень в газі, що покоїться. Системи плоских (простих) хвиль та їх математичний опис. Лінеаризована система диференціальних рівнянь розповсюдження малих збурень в газі, що є в стані спокою, та зведення її до однотипного рівняння гіперболічного типу відносно елементів (швидкості, густини й тиску) збуреного руху. Геометричне трактування отриманих одновимірних хвильових рівнянь.
Література:	[1] Розділ 4: с.108-114; [2] Розділ 4: §9, с.386-389; [3] Розділ 5: §32, с. 101-105; Розділ 8, §52, с. 214–218; [8] Розділ 8: §§1 – 3; [10] Лекція 1. Вступ: с.9-12; [14] Розділ 4: 4.13, с.69 – 72; Розділ 10: 10.1; [15] Розділ 6: §7, с.149-150, Розділ 8: §1, 183-186; [16] Розділ 5: 5.1 – 5.2, 5.8; [17] розділ 7: § 7.1, с. 81. Допоміжна література: [2] Розділ 6.
Завдання на СРС:	Особливу увагу звернути на принципову відмінність фізичного змісту збурень і хвиль скінченної інтенсивності та збурень нескінченної інтенсивності та ударні хвилі. Математично та фізично обґрунтувати існування сімей характеристик хвильових рівнянь щодо простих хвиль.
7	Тема 3.3. Розповсюдження малих збурень в газорідній суміші. Механізм розповсюдження збурень в двофазному середовищі. Формули Лапласа і Релея. Дисперсія звуку в двофазних середовищах та її причини. Вплив амплітуди збурень. Поняття про термодинамічний, акустичний та газодинамічний підходи при теоретичному вивченні явищ розповсюдження малих збурень. Барботажа та параметри газорідній суміші. Баротропність розповсюдження малих збурень. Формула Вуда та її спрощення .
Література:	[3-Лойц.] Розділ 5: §§ 32, с. 105-106. Допоміжна література: [17] Розділ 4: 4.1 – 4.5.
Завдання на СРС:	Теоретичні методи розрахунку швидкості малих збурень. Основні рівняння звукового поля двофазних середовищ. Аналіз хвильового рівняння і розрахунок швидкості звуку. Порівняння експериментальних даних з результатами розрахунків.
7	Тема 3.4. Розповсюдження малих збурень в однорідному потоці газу. Конус Маха. Поняття про нелінійні хвилі. Дозвукове, звукове та надзвукове обтікання

	точкового джерела збурення. Утворення характеристичного конуса. «Зона мовчання». Характеристичні поверхні як допомога в розумінні закономірності утворення ударних хвиль. Нелінійні хвилі. Утворення характеристик при надзвуковому обтіканні стінки з нерівностями поверхні, що спричиняють збурення тиску. Відбиття хвиль тиску від шорстких стінок при течії газу між ним. Обтікання тонкого тіла із загостреною передньою кромкою.
Література:	[1] Розділ 4, с. 108-114; [2] Розділ 4: §§1, 2, с. 353, 354, 370, рис. 223; [8] Розділ 4: §1; [9] Розділ 5: §§12, 13; [10] Лекція 1: с. 9–11; [14] Розділ 10: 10.1 – 10.3; 10.5.1; [17] Розділ 7: § 7.1, с.81 – 83; [19] Розділ 14: 14-3.1, с. 351 – 355; [21] Розділ 11: 11.7; [22] Розділ 2: §§6, 7. Допоміжна література: [7–15], [21].
Завдання на СРС:	Геометричний аналіз до- та надзвукового обтікання точкового джерела збурення. Визначення кута збурення та його зв'язок з числом Маха-Маієвського. Утворення пакету хвиль при великих збуреннях потоку при надзвуковому обтіканні тіла скінченних розмірів (наприклад, сфери).
8	Тема 3.5. Розповсюдження збурень скінченної інтенсивності. Ударні хвилі (стрибки ущільнення): загальна характеристика. Фізичний механізм утворення ударних хвиль. Швидкість розповсюдження хвилі стиснення та порівняння її із швидкістю звуку. Надзвукове обтікання джерела, що посилає сильні ударні хвилі, плоскої перешкоди, дозвукового профілю. Особливості нагріву затуплених тіл при надзвуковому обтіканні.
Література:	[1] Розділ 4, с. 108-114; 122-137 [2] Розділ 4: §§2, 3, с.349–363; [4] Т.1, Розділ 7: §6, с.412 – 414; [6] Ч.1, Розділ 3: §1, с. 114-126; [8] Розділ 4: §1, с. 65–66; [10] Лекція 1: с. 9–11; [14] Розділ 10: с. 265–267. Допоміжна література: [19] Кн. 2, Розділ 9: §9.4, с. 24 – 51.
Завдання на СРС:	Збурення скінченної та нескінченної інтенсивності, виникнення стрибка ущільнення.. Виведення співвідношень на розриві («умов на ударній хвилі») як граничних умов для одновимірної течії.
9	<u>Розділ 4. Одновимірна течія газу.</u> Тема 4.1. Нестационарний та стаціонарний потоки термічно ідеального газу. Інваріанти Рімана. Метод характеристик. Ізоентропійна течія. Характеристики нелінеаризованої системи рівнянь і метод характеристик. Характеристики як лінії можливого розповсюдження збурень. Інваріанти і хвилі Рімана. Випадок термічно ідеального газу з постійною теплоємністю. Течія типу простої хвилі. Перекидання (рос. «опрокидывание») риманівської хвилі стиснення. Неминучість утворення в трубі ударних хвиль – стрибків ущільнення та неможливість ударних хвиль – стрибків розрідження. Стаціонарні ізотермічна та адіабатна течії термічно ідеального газу. Інтеграл Бернуллі для баротропного руху газу та його частинні випадки. Формула Бернуллі–Сен-Венана. «Ізоентропійні формули». Формули витікання Сен-Венана і Вантцеля. Газодинамічне «замикання» вихідного перерізу сопла, що звужується. Теплове «замикання» каналу з рухомим газом. Формула Гюгонію. Закон обернення дії в газодинаміці: способи отримання надзвукових швидкостей.
Література:	[2] Розділ 4 §§2–4, 6, с. 355-366; [3] Розділи 5, 6: §§33–35, с. 106–111; Розділ 6: §§43, 44, с.144-151; Розділ 8: §§65–68, с.256–276; [4], Т.2,

	Розділ 8: §§17, 18; [6] Ч.1, Розділ 1: §§2–4, с.13–36; [7] Розділ 2: §§1–18; [8] Розділ 8: §§2, 3; [9] Розділ 2: §§10–13; [10] Лекції 8, 9: с.57–73; Лекція 13: с. 102–112; [15] Розділ 6: §§ 2–5, с.130–143; [16] Вступ: с.18; Розділ 2: §2.7, с. 100–118; Розділ 4: с. 205–222; [18] Розділ 10: 10.5; [19] Розділ 14: с. 350–363 [22] Розділ 2: §§7, 8. Допоміжна література: [2] Розділ 6; [10–15], [21].
Завдання на СРС:	Приділити увагу автомодельним (центрованим) хвилям Рімана та можливостям практичного застосування особливостей розв’язків Рімана для конструювання розв’язків ряду задач. Повторити виведення всіх термогазодинамічних співвідношень для ізоентропійних процесів в газових течіях. Уявити фізичний механізм газодинамічного «замикання» вихідного перерізу сопла, що звукується, при витіканні газу.
10	Тема 4.2. Течія з розривами. Теорія прямого стаціонарного стрибка ущільнення. Ударна адіабата. Застосування рівнянь енергії, імпульсів та збереження маси для елемента потоку в теплоізольованій трубі в межах контрольного об’єму, що охоплює стаціонарний розрив в розподілах параметрів течії. Формула Ренкіна-Гюгоніо для прямого стрибка ущільнення. Графічне порівняння ударної адіабати з ідеальною адіабатою Пуассона. Зміна ентропії при ударному стисненні. Доведення неможливості утворення ударних хвиль розрідження в енергоізольованій системі.
Література:	[1] Розділ 4, с. 122–146; [2] Розділ 4: §5; [4], Т. 1, Розділ 7: §§4, 6; [6], Ч. 1, Розділ 1, §§1–7; Розділ 3, §1; [7] Розділ 1: §§4, с. 70–89; [8] Розділ 4: §2–4; [9] Розділ 5: §§14 – 21; [10] Лекції 10–12, с. 74–101; Лекція 20, с. 153 – 163; [14] Розділ 10: 10.5–10.7; [17] Розділ 7: §§7.2–7.4, с. 83–94; [18] Розділ 10: §§10.7–10.9, с. 321–329; [19] Розділ 14: 14-3.3, с. 363–370; [22] Розділ 3: §§1, 2; [23] Розділ 9: §§9.8, с.80–81. Допоміжна література: [2] Розділ 5, §§5.1–5.4, с. 81–91; [7–15, 20, 21].
Завдання на СРС:	Довести справедливість формули Прандтля щодо добутку швидкостей газу до і після стрибка.
11	Тема 4.3. Косі стрибки ущільнення. Ударна поляра. Газодинамічні співвідношення.
Література:	[1] Розділ 4, с. 122–146; [2] Розділ 4: §§7–11; [6], Ч. 1, Розділ 3, §§2, 3, с. 126–142; [8] Розділ 4: §§5–7; [10] Лекції 20, 21, с. 153–163; [14] Розділ 10: 10.8–10.10; [17] Розділ 7: §§7.5, с. 94, 95; [19] Розділ 14: 14-3.3, с. 370–372. Допоміжна література: [2] Розділ 5: §§5.5–5.7, с. 91–98; [8–14, 21].
Завдання на СРС:	Механізми та розрахунок утворення косих стрибків ущільнення. Принцип побудови сім’ї ударних поляр.
12	Тема 4.4. Течія газу через сопло Лавалю при розрахунковому та нерозрахунковому режимах. Вплив в’язкості на характер течії в каналі змінного перерізу. Отримання формули сопла Лавалю без урахування в’язкості газу. Розрахунок тиску в струмені на зрізі сопла. Аналіз режимів роботи сопла Лавалю за відсутністю та за наявністю в’язкості газу.
Література:	[2] Розділ 4: §§ 3,5; с. 358–363, 369–373; [6], Ч. 1, Розділ 4, §§1,2, с. 143–155; [10] Лекція 14, с. 109–115; [14] Розділ 10: 10.3.1–10.4, с. 255–259;

	10.10.4–10.10.5, с. 287–289; [15] Розділ 6: §§ 5,6; с. 139–148.
13	Тема 4.5. Течія газу в до- та надзвукових дифузорах. Характер течії та розрахунок параметрів.
Література:	іл 6: § 41, с. 137–142; [6], Ч. 1, Розділ 1, с. 42–43; Розділ 8, §§ 3,4, с. 452–491.
Завдання на СРС:	Звернути особливу увагу на відмінність робочих процесів до- та надзвукових дифузорів.
14	<u>Розділ 5. Потенціальні баротропні дозвукові та надзвукові течії газу.</u> Тема 5.1. Загальне рівняння для потенціалу швидкостей потоку газу. Обтікання тонкого малозігнутого тіла: основні формули лінійної теорії руху газу. Лінеаризація рівняння для потенціалу швидкостей для до- та надзвукових потоків.
Література:	[1] Розділ 4: с.108–122; [2] Розділ 4: §9: с.386–396; [3] Розділ 8: § 58, с.214–218; [9] Розділ 5: §10: с.401–403; §25: с.464–466; §26: с.466–468; [15] Розділ 8: §1, с.183–186; [16] Розділ 5: §§5.1, 5.2, с.265–271. Допоміжна література: [11] Розділ 2: §8, с.45–50.
Завдання на СРС:	Пригадати теорію потенціальної течії нестисливої рідини з курсу «Фізика суцільного середовища». Звернути увагу на принципово різні типи диференціальних рівнянь процесів розповсюдження збурень при до- та надзвукових швидкостях газу.
15	Тема 5.2. Дозвуковий рух газу при малих збуреннях. Перерахунок швидкості та тиску від нестисливої рідини на стисливу (правило Прандтля-Глауерта).
Література:	[1] Розділ 4: с.114–122; [2] Розділ 4: §§9, 10: с.386–399; [3] Розділ 8: § 59, с.218–220; [6], Ч. 2, Розділ 10, §6, с. 30–40; [9] Розділ 5: §27: с.468–473; [15] Розділ 8: §2, с.186–189; [16] Розділ 5: §5.4, с.278–285. Допоміжна література: [11] Розділ 2: §9, с. 50–61.
Завдання на СРС:	З'ясувати принцип перерахунку коефіцієнтів тиску за умов обтікання тіл нестисливим газом на випадок обтікання тих саме тіл стисливим газом.
16	Тема 5.3. Надзвуковий рух газу при малих збуреннях. Загальний інтеграл рівняння для потенціалу швидкостей плоского руху газу. Характеристики надзвукового руху (хвилі Маха). Формула Аккерета. Хвильовий опір при надзвуковому обтіканні профілю.
Література:	[1] Розділ 4: с.114–122; [2] Розділ 4: §§11, 12: с.399–411; [3] Розділ 8: §60: с.221–235; [9] Розділ 5: §§28–30: с. 473–490; [16] Розділ 5: §§5.5, 5.6, с.285–294. Допоміжна література: [11] Розділ 2: §10, с. 61–76.
Завдання на СРС:	Уявити фізичний зміст хвильового опору.
17	<u>Розділ 6. Взаємодія стрибків ущільнення з примежовим шаром.</u> Тема 6.1. Взаємодія стрибків ущільнення з примежовим шаром. Порушення припущень, базових для теорії примежового шару, в зоні виникнення стрибка ущільнення. Відмінність стрибків ущільнення при ламінарному та турбулентному примежових шарах. Особливості дифузії розподілу тиску в ламінарному та турбулентному примежових шарах вздовж обтічної стінки. Вплив відриву примежових шарів на подолання градієнтів тиску, пов'язаних з

	сильними стрибками ущільнення. Вплив інтенсивності косих стрибків ущільнення на їх відбиття від плоскої стінки та відрив примежового шару.
Література:	[1] Розділ 4: с. 129-144; [6], Ч. 1, Розділ 6, §6, с. 338-348. Допоміжна література: [1] Розділ 13: §5, с.339-348; [22] Розділ 7: §§1–4, с. 203–221.
Завдання на СРС:	Механізм зростання втрат енергії при появі стрибків ущільнення та їх взаємодії з примежовими шарами при білязвукових та надзвукових режимах обтікання поверхонь.
18	<u>Розділ 7. Принципи моделювання течій в газодинаміці</u> Тема 7.1. Види моделювання. Чисельні методи розв'язку рівнянь газової динаміки: загальна характеристика. Фізичне моделювання до- та надзвукових течій газу: принципи та технічні засоби досліджень.
Література:	[28] Розділи 1–6: с.11–340; [29] Розділи 1–4: с. 17–325; [30] Розділи 1–7: с. 5–149. Допоміжна література: [3] Розділи 1–7: с.13–355; [4] с.14–20; 49–62; 179–218; [6] Розділи 1–7: с. 5–536; [20] Розділи 2, 3: с.52–128; [23] Розділи 1–4: с.5–286; [24] Розділ 4: с.80–110; Розділ 7: с. 189– 293; [25] Розділ 1–5: с.11– 216; Розділ 12: с.474–494.
Завдання на СРС:	Застосувати один з відомих програмних пакетів для моделювання надзвукової течії згідно із завданням. Призначення та конструкції аеродинамічних труб великих швидкостей.

14.

15. 6. Самостійна робота студента/аспіранта

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 домашньої контрольної роботи.

Приклади контрольних завдань для модульної контрольної роботи

Варіант 1. Отримати та проаналізувати інтегральні та диференціальні рівняння збереження імпульсу, моменту імпульсу, енергії та переносу тепла (**вибірково**). Навести та пояснити функцію дисипації енергії.

Варіант 2. Вивести диференціальні рівняння руху нев'язкої рідини; початкові та крайові умови. Замикання системи ДРЧП. Пояснити можливості застосування при математичному моделюванні течії рідин і газів.

Варіант 3. Отримати та проаналізувати **один з 4-х інтегралів** рівнянь руху нев'язкої рідини.

Варіант 4. Отримати лінеаризовані гіперболічні рівняння та загальні розв'язки їх для розповсюдження малих збурень в газі.

Варіант 5. Вивести формулу Вуда для швидкості розповсюдження малих збурень в газорідинному середовищі.

Варіант 6. В чому полягає графоаналітичний метод інтегрування хвильових рівнянь одновимірного руху та перехід до розповсюдження в ідеальному газі збурень скінченої інтенсивності?

Варіант 7. Записати основні рівняння газової динаміки. **Або – вибірково** – вивести та проаналізувати формули Сен-Венана та Вантцеля ізоентропійного витікання газу.

Варіант 8. Описати принцип побудови сопла Лавала (загальну схему розрахунку та аналіз принципу роботи).

Варіант 9. Навести рівняння, що пояснюють фізичні причини та дають кількісні характеристики аеродинамічного нагріву тіл.

Варіант 10. Газогідравлічна аналогія розповсюдження збурень і хвиль скінченої інтенсивності.

Варіант 11. В чому полягають ідея, результати та переваги застосування потенціальної моделі баротропного дозвукового руху ідеального газу при малих збуреннях?

Варіант 12. В чому полягають ідея та результати застосування потенціальної моделі баротропного надзвукового руху ідеального газу при малих збуреннях?

Варіант 13. Фізичний зміст хвильового опору при надзвуковому обтіканні профілю.

Варіант 14. Дати характеристику взаємодії стрибків ущільнення з примежовим шаром.

Варіант 15. Дати загальну характеристику відомих Вам чисельних методів розв'язку рівнянь газової динаміки.

Варіант 16. Фізичне моделювання до- та надзвукових потоків. Види аеродинамічних труб.

Приклади контрольних завдань для домашньої контрольної роботи

1. При яких швидкостях руху повітря з точністю до 2 % можна нехтувати зміною його густини?

Швидкість звуку у повітрі прийняти $a = 340 \frac{M}{c}$.

2. До якої температури нагрівається лобова частина труби, що обтікається надзвуковим потоком повітря температурою $t = 300^0$, якщо поодаль від труби кут Маха складає:

а) 30^0 ; б) 28^0 ; в) 25^0 ; г) 22^0 ; д) 20^0 ; е) 18^0 .

3. З великого резервуара витікає повітря через сопло, що звужується (вихідним діаметром $d_1=0,04$ м). Умови на вході до сопла: $p_0=1,18$ МПа, $t_0=1400^0$, $v_0= 0$ м/с. Витікання повітря здійснюється у камеру з постійним тиском $p_{з\text{овн}}=98100$ Па. Визначити масову витрату, швидкість та параметри повітря у вихідному зрізі сопла, прийнявши показник адіабати Пуассона $k=1,4$.

Відповідь: $p=0,622$ МПа; $T=1394,2$ К; $\rho=1,556$ кг/м³; $v=748$ м/с; $\dot{m}=1,462$ кг/с.

4. З великого резервуара здійснюється витікання повітря через сопло Лаваля без стрибків ущільнення всередині сопла в камеру з постійним тиском $p_{з\text{овн}}=98100$ Па. Визначити діаметр d_2 вихідного перерізу сопла та параметри повітря на виході з нього. Умови витікання повітря: $p_0=1,18$ МПа, $t_0=1400^0$, $v_0= 0$ м/с; діаметр звуженої частини сопла $d_1=0,04$ м.

Відповідь: $v_2=1306,4$ м/с; $T_2=822,6$ К; $a_2=574,6$ м/с; $M_2=2,274$; $\rho_2 = 0,4158$ кг/м³; $d_2=51,88$ мм;

$\dot{m}=1,462$ кг/с.

5. Вибрати форму каналу для отримання швидкості витікання біля 1500 м/с, якщо відомі параметри гальмування потоку $T_0=1800$ К, $p_0=24,35 \cdot 10^5$ Па, а зовнішній тиск середовища, куди витікає газ, $p_{з\text{овн}}=1,045 \cdot 10^5$ Па. Масова витрата газу $\dot{m}=75$ кг/с, швидкість потоку на вході $v_1=180$ м/с; газ — продукти згоряння ($k=1,33$; $R=288,4$ Дж/(кг·К)).

6. Розрахувати сопло, що звужується, для потоку повітря з параметрами на вході: температура $t_1=352^0$ С, тиск $p_1= 5,06 \cdot 10^5$ Па та швидкість $v_1=120$ м/с. Визначити масову витрату повітря, що витікає в атмосферу, яка має тиск $p_{з\text{овн}}=1,013 \cdot 10^5$ Па, якщо діаметр сопла на виході дорівнює 20 мм.

7. Як зміниться витрата і параметри газу, якщо тиск на вході до сопла за умов попередньої задачі знизиться до $p_1= 1,845 \cdot 10^5$ Па?

8. Як зміниться витрата і параметри газу, якщо тиск на вході до сопла за умов попередньої задачі знизиться до $p_1= 1,424 \cdot 10^5$ Па?

9. Як зміниться витрата, швидкість і параметри газу на виході з сопла у попередній задачі, якщо тиск зовнішнього середовища знизиться до $p_{з\text{овн}}= 1,845 \cdot 10^5$ Па?

10. Розрахувати параметри круглого дифузора з діаметром на вході 150 мм, із ступенем розкриття

$S_2/S_1=2,5$ та кутом розхилу $\alpha = 10^0$. Через дифузор протікає газ ($k=1,4$; $R=287,4$ Дж/(кг·К)) з тиском на вході $p_1=1,52 \cdot 10^5$ Па, температурою $t_1=127^0$ С та числом Маха $M_1=0,408$. Визначити початкову швидкість та масову витрату газу, а також параметри на виході та втрати повного тиску.

11. Визначити, при якому значенні числа Маха M_∞ потоку, що набігає, настає хвильова криза на поперечному потенціальному обтіканні колового циліндра потоком повітря температурою $t_\infty = 100^\circ C$ та вирахувати температуру, до якої нагрівається циліндр у передній критичній точці. Вважати, що розподіл швидкості є аналогічним розподілу її у нестисливій рідині.

12. Потік повітря рухається з надзвуковою швидкістю v_∞ та набігає на ртутний термометр, показ якого становить $t' = 150^\circ C$. Коефіцієнт неповноти гальмування чутливої частини термометра складає $\beta' = 0,8$. Визначити справжню температуру потоку, що набігає, а також швидкість потоку повітря при таких кутах Маха α :

а) 25° ; б) 27° ; в) 30° ; г) 32° ; д) 35° ; е) 40° .

13. При витіканні кисню з великої ємності термометр, який встановлено у деякій точці одного з перерізів струменя, показує температуру $t' = 200^\circ C$. Кут Маха у тій самій точці складає $\alpha = 45^\circ$.

Температура кисню всередині ємності $t_0 = 250^\circ C$. Розрахувати коефіцієнт неповноти гальмування в чутливій частині термометра, швидкість та справжню температуру газового струменя в даній точці.

14. Визначити, у скільки разів максимальна швидкість повітря біля поверхні обтічного тіла перевищує швидкість потоку, що набігає, якщо в момент настання хвильової кризи швидкість потоку, що набігає, становить $v_\infty = 200 \text{ м/с}$, а температура у передній критичній точці тіла t_0, C дорівнює: а) 160° ; б) 180° ; в) 190° ; г) 200° ; д) 210° ; е) 220° .

15. На вході до сопла Лавалю повітря має температуру T_1 , тиск p_1 та швидкість v_1 . Тиск зовнішнього середовища $p_{\text{зовн}}$. Масова витрата повітря через сопло дорівнює Q_m . Завдання:

а) знайти параметри та швидкості повітря в мінімальному та вихідному перерізах сопла, а також діаметри мінімального, вихідного та вхідного перерізів сопла;

б) зробити креслення сопла Лавалю в масштабі, знайти залежності швидкості течії та місцевої швидкості звуку від координати x та надати криві $v=f(x)$ та $a=f_1(x)$ під соплом.

Необхідні дані див. в Табл. 1.

16. Сопло Лавалю має діаметри: вхідного перерізу d_1 , мінімального d_{min} та вихідного d_2 . Через сопло необхідно пропустити масову витрату повітря Q_m . Потрібно:

а) визначити початковий тиск p_1 , необхідний для отримання заданої витрати повітря, а також початкову швидкість v_1 ;

б) знайти параметри повітря та швидкості в мінімальному та вихідному перерізах сопла;

в) відповісти на запитання, чи буде вибране сопло працювати на розрахунковому режимі, якщо зовнішній тиск становитиме $p_{\text{зовн}} = 0,1 \text{ МПа}$;

г) накреслити сопло в масштабі, розрахувати та зобразити під соплом криві зміни коефіцієнтів $\lambda = v/a_*$ та $M = v/a$. Необхідні дані див. в Табл. 1.

Таблиця 1.

№ задачі	Назва параметра	Номери варіантів задач									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
16	T_1, K	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800
	$p_1, \text{ МПа}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$v_1, \text{ м/с}$	300	330	360	400	420	450	470	500	530	560
	$p_{\text{зовн}}, \text{ МПа}$	0,04	0,045	0,05	0,055	0,06	0,065	0,07	0,075	0,08	0,085
	$Q_m, \text{ кг/с}$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
17	$d_1, \text{ см}$	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	$d_{\text{min}}, \text{ см}$	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5
	$d_2, \text{ см}$	4,2	5	5,6	6,3	7	7,7	8,4	9,1	9,8	10,5
	$Q_m, \text{ кг/с}$	10	12	15	18	20	22	24	26	28	30
	T_1, K	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500

17. Температура повітря у форкамері надзвукової аеродинамічної труби $T_0=288$ К. Потік на зрізі сопла труби має швидкість $v_1=530$ м/с та обтікає певну перешкоду з утворенням прямого стрибка ущільнення. Знайти швидкість v_2 повітря після стрибка ущільнення.

18. Інтерферометр показує зростання густини на прямому стрибку в 2 рази. Знайти зростання ентропії та зміну кінетичної енергії одиниці об'єму газу на стрибку ущільнення.

16. Політика та контроль

17. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Система вимог, які викладач ставить перед студентом/аспірантом:

- обов'язкове відвідування лекцій та готовність відповідей при фронтальному 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;
- захист індивідуальних завдань (ДКР) здійснюється в указаний викладачем термін;
- заохочувальні бали надаються у відповідності до «системи оцінювання результатів», штрафні бали є засобом протидії плагіату та несамотійному виконанню робіт;
- політика дедлайнів та перескладань полягає в виконанні всіх поточних робіт — ДКР та модульних контрольних робіт (МКР) 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 експериментального обладнання в галузі прикладної фізики та розширення сфер застосування отриманих знань, умінь і досвіду.
- за бажанням студентів, допускається вивчення матеріалу за допомогою англomовних онлайн-курсів за тематикою, яка відповідає тематиці конкретних занять.

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

Види контролю знань студентів з дисципліни «Газодинаміка»:

- відповіді при фронтальному опитуванні на лекціях;
- виконання МКР;
- виконання ДКР;
- відповідь на екзамені – максимально 40 балів.

Рейтинг студента з дисципліни «Газодинаміка» складається з балів, які він отримує за:

1) 5 відповідей в середньому кожного студента при фронтальних опитуваннях на 16 лекціях (із загальної кількості лекцій 18 вилучено Лекцію № 1 та лекцію, на якій виконується МКР протягом 1 академ. години); на одній лекції є можливість опитування приблизно 3 студентів; при середній чисельності студентів в групі 10 осіб і 16 лекціях отримуємо: $16 \cdot 3 / 10 \approx 5$ відп.;

- 2) виконання модульної контрольної роботи (МКР);
- 3) виконання та захист домашньої контрольної роботи (ДКР);
- 4) відповідь на екзамені.

Система рейтингових (вагових) балів та критерії оцінювання

8.1. Фронтальне опитування на лекційних заняттях

Ваговий бал — 2. Максимальна кількість балів студента на всіх лекційних заняттях дорівнює $r_1 = 2 \times 5 = 10$ балів.

Критерії оцінювання:

2 бали — повна і правильна відповідь; **1 бал** — неповна відповідь; **0** — відсутня або неправильна відповідь.

8.2. Модульна контрольна робота (МКР), табл. 2

Максимальна кількість балів за правильно виконану МКР: $r_2 = 25$ балів.

Рейтингові бали за модульну контрольну роботу

Таблиця 2

Бали	Критерій оцінювання
25	Зауважень до результату немає, є чіткі відповіді на всі запитання
20	Зауважень до ходу розв'язання немає, але є неточності і помилки в розрахунках
15	Завдання виконане не повністю
10	Неповне виконання завдання при 5-хвилинному подовженні часового регламенту
0	Завдання повністю не виконане

8.3. Домашня контрольна робота (ДКР), табл. 3

Максимальна кількість балів за правильно виконану МКР: $r_3 = 25$ балів.

Рейтингові бали домашню контрольну роботу

Таблиця 3

Бали	Критерій оцінювання
25	Зауважень до результату немає, є чіткі відповіді на всі запитання
20	Зауважень до ходу розв'язання немає, але є неточності і помилки в розрахунках
15	Завдання виконане не повністю
10	Неповне та несвоєчасне виконання завдання
0	Завдання повністю не виконане

Максимальна кількість штрафних балів мінус 5 балів, або заохочувальних +5 балів. Бали додаються за оригінальні рішення та активність роботи на лекціях. Бали втрачаються за некоректне надання відповідей та запозичення чужих рішень.

Поточний контроль: експрес-опитування, опитування за темою заняття, МКР, ДКР.

Календарний контроль: провадиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу і враховує суму поточні балів кожного студента.

8.4. Критерії оцінювання екзамену

Екзамен складається з двох теоретичних питань (вага кожного питання 15 балів) та практичного завдання (10 балів). Максимальна кількість балів екзамену становить $15+15+10 = 40$ балів.

8.5. Розрахунок шкали рейтингу з дисципліни (r_d):

Сума вагових балів контрольних заходів протягом семестру складає: $R_c = \sum_i r_i$, де r - рейтингові або вагові бали за кожний вид робіт з дисципліни;

$R_c = 10 + 25 + 25 = 60$ балів.

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

Таким чином, рейтингова шкала з дисципліни складає $R_D = R_c + R_E = 60 + 40 = 100$ балів.

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою:

Кількість балів, R_D	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.

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>).

19. 9. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)

Приклад екзаменаційного білета

1. Отримати рівняння кількості руху газу, виходячи з методу Лагранжа.
2. Вивести та проаналізувати інтеграл Бернуллі–Сен-Венана для елементарної струминки газу при адіабатній течії.
3. Охарактеризувати режими «перерозширення» та «недорозширення» роботи сопла Лавалю.

Робочу програму навчальної дисципліни «Газодинаміка» (силабус):

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

Ухвалено кафедрою прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки (протокол № 3 від 04.09.2020)

Затверджено Вченою радою ФТІ (протокол № 7/1 від 07.09.2020)