



# Освітній компонент ф-каталогу. Моделювання стану суцільного середовища

## Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

### Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	Третій (освітньо-науковий)
Галузь знань	13 Механічна інженерія
Спеціальність	131 Прикладна механіка
Освітня програма	ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА (APPLIED MECHANICS)
Статус дисципліни	Вибіркова
Форма навчання	очна(денна)
Рік підготовки, семестр	2 курс, весняний семестр
Обсяг дисципліни	5 кредитів/ 150 год / 54 год лекцій/ 96 год самостійна робота
Семестровий контроль/ контрольні заходи	Екзамен
Розклад занять	I тиждень – четвер, 3,4 пари; II тиждень – четвер, 3 пара
Мова викладання	Українська
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: <a href="https://cpsm.kpi.ua/karvatskij-anton-yanovich.html">https://cpsm.kpi.ua/karvatskij-anton-yanovich.html</a> Практичні: – Лабораторні: –
Розміщення курсу	Посилання на дистанційний ресурс Google classroom, <a href="https://campus.kpi.ua/tutor/index.php?mode=mob&amp;show&amp;irid=250514">https://campus.kpi.ua/tutor/index.php?mode=mob&amp;show&amp;irid=250514</a> <a href="https://campus.kpi.ua/tutor/index.php?mode=mob&amp;show&amp;file=fyqhmlxglrri-dkcmrpre">https://campus.kpi.ua/tutor/index.php?mode=mob&amp;show&amp;file=fyqhmlxglrri-dkcmrpre</a>

### Програма навчальної дисципліни

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

Наразі важко собі уявити дисертацію з технічних наук, у якій не було розділу присвяченого числовому аналізу фізичних полів промислового обладнання в наближенні суцільного середовища. Саме тому аспірантам спеціальності Прикладна механіка необхідно володіти навиками моделювання стану суцільного середовища з використанням сучасних CAD-CAE-систем, що потрібно для розробки нового і модернізації діючого промислового обладнання і зокрема, матеріалів і тари для пакування і пакувальної техніки.

Предметом навчальної дисципліни «Освітній компонент Ф-каталогу. Моделювання стану суцільного середовища» є моделювання напружено-деформованого стану твердих, рідких та газоподібних тіл при їх взаємодії між собою та фізичними полями різної фізичної природи – гравітаційними, тепловими, електромагнітними, променевими тощо.

Вивчення дисципліни дає можливість аспірантам проводити теоретичні дослідження процесів та обладнання з використанням сучасних CAD-CAE-систем.

Метою дисципліни є сформувати та розвинути такі компетентності (здатності) здобувачів PhD:

**1.1 Інтегральну:** Здатність розв'язувати комплексні проблеми в галузі прикладної механіки, у тому числі дослідницько-інноваційної діяльності, що передбачає глибоке переосмислення наявних та створення нових цілісних знань та/або професійної практики.

**1.2. Загальні:**

- ЗК 1 Вміння виявляти та вирішувати проблеми.
- ЗК 2 Здатність приймати обґрунтовані рішення.
- ЗК 3 Здатність генерувати нові ідеї (креативність).
- ЗК 4 Здатність розробляти та управляти проектами.
- 

**1.3. Фахові:**

- ФК 1 Здатність критичного аналізу, оцінки і синтезу нових та складних ідей в процесі досліджень механічних конструкцій, машин, матеріалів і виробничих процесів машинобудування на основі новітніх знань в галузі механіки та суміжних предметних галузей.
- ФК 4 Здатність критичного осмислення проблем у навчанні, професійній і дослідницькій діяльності на рівні новітніх досягнень інженерних наук та на межі предметних галузей.
- ФК 5 Здатність поставити задачу і визначити шляхи вирішення проблеми засобами прикладної механіки та суміжних предметних галузей, знання методів пошуку оптимального рішення за умов неповної інформації та суперечливих вимог.

**1.4. Програмні результатами навчання:**

- РН 1 Знати загальну теорію і методики проведення наукових досліджень та вміти їх практично застосовувати для досліджень об'єктів в галузі механічної інженерії.
- РН 2 Виконувати науковий пошук і на основі аналізу його результатів визначати шляхи вирішення поставлених задач.
- РН 8 Навички використання сучасних комп'ютерних засобів та інформаційних технологій у науковій діяльності, зокрема при виконанні експериментальних досліджень.

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

**Пререквізити:** дисципліна базується на вивченні таких кредитних модулів: Методи проектування і розрахунку машин і конструкцій, Надійність машин і конструкцій.

**Постреквізити:** Моделювання технічних об'єктів і систем, Перспективні напрями розвитку енерго- та ресурсоефективних процесів, обладнання та технологій.

**3. Зміст навчальної дисципліни**

**Розділ 1. Основи механіки суцільних середовищ**

- Тема 1.1. Основи тензорного числення
- Тема 1.2. Напружений стан
- Тема 1.3. Деформований стан
- Тема 1.4. Рух і течія
- Тема 1.5. Закони механіки суцільного середовища
- Тема 1.6. Лінійна теорія пружності
- Тема 1.7. Механіка рідин та газів
- Тема 1.8. Теорія пластичності
- Тема 1.9. Лінійна в'язкопружність
- Тема 1.10. Турбулентний рух суцільного середовища

**Розділ 2. Прикладні нелінійні задачі механіки суцільних середовищ**

- Тема 2.1. Математичне формулювання нелінійних задач механіки суцільних середовищ (МСС)
- Тема 2.2. Числові методики розв'язання нелінійних задач МСС на базі методу скінченних елементів

Тема 2.3. Числові методи розв'язання нелінійних задач тепло-гідродинамічного стану ньютонівських та неньютонівських рідин на базі методу скінчених об'ємів

Тема 2.4. Програмна реалізація числових методик розв'язання нелінійних задач МСС

#### 4. Навчальні матеріали та ресурси

##### Базова література

1. Карвацький А. Я. *Механіка суцільних середовищ: навч. посіб.* Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. 292 с. Гриф – рекомендовано Вченою радою НТУУ «КПІ» (Протокол № 11 від 07.11.2016 р.) <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/18094>
2. Карвацький А.Я. *Метод скінчених елементів у задачах механіки суцільних середовищ. Програмна реалізація та візуалізація результатів [Текст]: навч. посіб.* Київ : НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка», 2015. 392 с. Гриф надано Вченою радою НТУУ «КПІ» (Протокол № 4 від 12.05.2015 р.) <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/11636>
3. *Механіка суцільних середовищ. Теоретичні основи навчальної дисципліни [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізації «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання пакування», «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання виробництва полімерних і будівельних матеріалів і виробів» / А. Я. Карвацький.* Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 290 с. Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 10 від 21.06.2018 р.) <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/23917>
4. Карвацький А.Я. *Моделювання енергозберігаючих регламентів промислового обладнання : навч. посіб.* Київ : НТУУ «КПІ», 2014. 234 с. Гриф надано Міністерством освіти і науки України (Лист № 1/11-2299 від 11.02.2014 р.) <https://cpsm.kpi.ua/publikatsiji/knigi/956-modelyuvannya-energozberigayuchikh-reglamentiv-promislovogo-obladnannya.html>
5. Карвацький А. Я. *Нелінійні задачі механіки суцільних середовищ. Комп'ютерний практикум з навчальної дисципліни [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізації «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання виробництва полімерних і будівельних матеріалів і виробів».* КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,480 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 158 с. <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/27528>
6. *Моделювання статистики і динаміки сипких матеріалів у LIGGGHTS [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня магістра за спеціальностями 131 Прикладна механіка, 133 Галузеве машинобудування / А. Я. Карвацький, І. О. Мікульонюк, В. М. Витвицький ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 4,16 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 76 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/45613>*

##### Додаткова література

1. Карвацький А. Я. *Механіка суцільних середовищ. Розв'язання задач : навч. посіб.* Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 391 с. Гриф надано Вченою радою НТУУ «КПІ» (Протокол № 5 від 11.04.2016 р.) <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/15428>
2. Mase G. E. *Theory and Problems of Continuum Mechanics.* New York : McGraw-Hill Book Company. 1970. 230 p. URL : <https://www.twirpx.com/file/897819/>
3. *Механіка суцільних середовищ – 1. Механіка суцільних середовищ в інженерних розрахунках: Текст лекцій для студентів спеціальностей 7.05050315, 8.05050315 – «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів» / Уклад.: О.С. Сахаров, А. Я. Карвацький* Київ : НТУУ «КПІ», 2013. 231 с. (Свідоцтво про електронну публікацію ІХФ № X 10/13-88). Електронні текстові дані (1 файл: 1,55 Мбайт). Київ : НТУУ «КПІ», 2013. – 231 с. <https://cpsm.kpi.ua/Doc/MSS-1.pdf>
4. *Механіка суцільних середовищ – 2. Нелінійні задачі механіки суцільних середовищ. Конспект лекцій з навчальної дисципліни [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізації «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання виробництва полімерних і будівельних матеріалів і виробів».* Київ: КПІ

ім. Ігоря Сікорського, 2018. 94 с. Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 10 від 21.06.2018 р.) <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/23918>

5. Zienkiewicz, O., Taylor, R., Fox, D.: *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics*. 7th edn. Elsevier Ltd., Oxford (2014).

6. Segerlind Larry J. *Applied Finite Element Analysis* ; sec. edit. New York : John Wiley & Sons, Inc., 1984. 393 p. URL : <https://www.scribd.com/doc/241729488/Applied-Finite-Element-Analysis-Larry-J-Segerlind-pdf>

7. Poinso T., Veynante D. *Theoretical and numerical combustion*. 2nd ed. Philadelphia : Edwards, 2005. 522 p.

8. Thompson, M. *ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis*. 1st ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017. 462 p.

### Інформаційні ресурси в Інтернеті

1. DSpace НТБ КПІ ім. Ігоря Сікорського, <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/18094>, <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/11636>, <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/23917>, <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/15428>
2. Website кафедри ХПСМ, <http://cpsm.kpi.ua/mr.html>
3. Кампус КПІ ім. Ігоря Сікорського, <http://login.kpi.ua/>
4. Платформа дистанційного навчання «Сікорський», <https://sikorsky-distance.kpi.ua/>

## Навчальний контент

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

#### Лекційні заняття

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (посилання на літературу та завдання на СРС)
1	<p><b>Тема 1.1. Основи тензорного числення</b></p> <p>Лекція 1, 2. Тензори. Ранг тензора. Фізичні закони. Вектори і скаляри. Системи координат. Базисні вектори. Трієдр одиничних векторів. Дії над векторами. Діади і діадики. Індексні позначення. Інтервал зміни індексів і погодження про підсумовування. Погодження про підсумовування у символічних позначеннях. Перетворення координат. Загальне поняття тензора. Метричний тензор. Декартові тензори. – 4 год.</p> <p>Завдання на СРС. Декартові тензори. Закони перетворення декартових тензорів. Дельта Кронекера. Умови ортогональності. Дії над тензорами. Симетрія діадики, матриць і тензорів. Головні значення і головні напрямки симетричних тензорів другого рангу. Тензорні поля. Диференціювання тензорів. Криволінійні інтеграли. Теорема Стокса. Теорема Гауса-Остроградського. Література: [1]: розділ 1, § 1.1–1.23, с. 11–52, [Д1]: додаток А, § А.1, с. 319–335; електронний конспект лекцій.</p>
2	<p><b>Тема 1.2. Напружений стан</b></p> <p>Лекція 3, 4. Поняття суцільного середовища. Однорідність. Ізотропність. Густина. Масові сили. Поверхневі сили. Принцип напруження Коші. Вектор напруження. Напружений стан в точці. Тензор напруження. Зв'язок між тензором напруження і вектором напруження. Рівновага сил і моментів. Симетрія тензора напруження. Закони перетворення тензора напруження. Поверхні напруження Коші. Головні напруження. Інваріанти тензора напруження. Еліпсоїд напружень. Максимальне і мінімальне дотичне напруження. Круги Мора для напруження. Плоский напружений стан. Девіатор та кульовий тензор напруження. – 4 год.</p> <p>Завдання на СРС. Теми 1.2, 1.3. Література: [1]: розділ 2, § 2.1–2.14, с. 53–78, розділ 3, § 3.1–3.16, с. 79–107; [Д1]: додаток А, § А.2, с. 335–344, § А.3, с. 344–361; електронний конспект лекцій.</p>

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (посилання на літературу та завдання на СРС)
3	<p><b>Тема 1.4. Рух і течія</b> Лекція 5, 6. Рух. Течія. Матеріальна похідна. Швидкість. Прискорення. Миттєве поле швидкості. Траєкторії. Лінії току. Усталений рух. Швидкість деформації. Завихреність. Прирошення деформації. Фізична інтерпретація тензорів швидкості деформації і завихреності. Матеріальні похідні від елемента об'єму, елемента поверхні і лінійного елемента. Матеріальні похідні від інтегралу по об'єму, інтегралу по поверхні і лінійного інтегралу. – 4 год. Завдання на СРС. Теми 1.4, 1.5. Література: [1]: розділ 4, § 4.1–4.7, с. 108–122, розділ 5, § 5.1–5.7, с. 123–134; [Д1]: додаток А, § А.4, с. 361–368, § А.5, с. 368–370; електронний конспект лекцій.</p>
4	<p><b>Тема 1.6. Лінійна теорія пружності</b> Лекція 7. Узагальнений закон Гука. Функція енергії деформації. Ізотропні та анізотропні середовища. Симетрія пружних властивостей. Ізотропне середовище. Пружні сталі. Постановка статичних і динамічних задач теорії пружності. Теорема про суперпозицію. Єдиність розв'язків. Принцип Сен-Венана. Плоскі задачі теорії пружності. Плоский напружений стан і плоска деформація. Функції напруження Ері. Двовимірні статичні задачі теорії пружності у полярних координатах. Гіперпружність. Гіпопружність. Лінійна термопружність. – 2 год. Завдання на СРС. Теми 1.6. Література: [1]: розділ 6, § 6.1–6.10, с. 136–154; [Д1]: додаток А, § А.6, с. 370–373; електронний конспект лекцій.</p>
5	<p><b>Тема 1.7. Механіка рідин та газів</b> Лекція 8, 9. Тиск рідини. Тензор в'язких напружень. Баротропна течія. Визначальні або фізичні рівняння. Стоксові рідини. Ньютонівські рідини. Основні рівняння ньютонівської рідини. Рівняння Нав'є-Стокса-Дюгема. Усталена течія. Гідростатика. Безвихрова течія. Ідеальна рідина. Рівняння Бернуллі. Циркуляція. Потенціальна течія. Плоска потенціальна течія. – 4 год. Завдання на СРС. Теми 1.7. Література: [1]: розділ 7, § 7.1–7.6, с. 155–165; [Д1]: додаток А, § А.7, с. 373–377; електронний конспект лекцій.</p>
6	<p><b>Тема 1.8. Теорія пластичності</b> Лекція 10, 11. Основні положення та визначення. Ідеалізовані діаграми пластичної поведінки. Умови пластичності. Критерії Треска та Мізеса. Простір напруження. П-площина. Поверхня плинності. Поведінка матеріалу за межею плинності. Ізотропне і кінематичне зміцнення. Співвідношення між напруженнями і деформаціями в пластичному стані. Теорія пластичного потенціалу. Еквівалентне напруження. Еквівалентне приращення пластичної деформації. Робота на пластичних деформаціях. Гіпотези зміцнення. Співвідношення інкрементарної теорії пластичності для середовища з ізотропним зміцненням. Деформаційна теорія пластичності. Задачі пружно-пластичності. – 4 год. Завдання на СРС. Теми 1.8, 1.9. Література: [1]: розділ 8, § 8.1–8.13, с. 172–198, розділ 9, § 9.1–9.8, с. 200–217; [Д1]: додаток А, § А.8, с. 377–379, § А.9, с. 380–383; електронний конспект лекцій.</p>
7	<p><b>Тема 1.10. Турбулентний рух суцільного середовища</b> Лекція 12, 13. Класичні моделі турбулентності для напружень Рейнольдса. Модель Прандтля, що побудована на алгебраїчному виразі. Модель Прандтля-Колмогорова з одним рівнянням. модель ізотропної турбулентності з двома скалярними рівняннями. Математичні моделі для числового моделювання турбулентних потоків. Моделі турбулентності RANS. Моделі турбулентності LES. Гібридні моделі турбулентності DES. – 4 год. Завдання на СРС. Теми 1.10. Література: [Д5]: лекц. 9, с. 80–86; [1]: розділ 11, § 11.1–11.4, с. 256–271; [4]: розділ 9, § 9.1–9.3, с. 198–218; електронний конспект лекцій.</p>
5	<p><b>Тема 2.1. Математичне формулювання нелінійних задач МСС</b> Лекція 14, 15. Нестационарна задача теплопровідності. Нестационарна задача електропровідності. Пружно-пластична задача з врахуванням ізотропного зміцнення.</p>



№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (посилання на літературу та завдання на СРС)
	Задача пружно-пластичної поведінки сипких матеріалів. Задачі тепло-гідродинамічного стану ньютонівської рідини під час ламінарного та турбулентного руху. Основні рівняння для неньютонівської рідини. Моделі дилатантних (комполітичних) речовин. Постановка задачі тепло-гідродинамічного стану рідини типу Bingham-Papanastasiou. – 4 год. Завдання на СРС. Основна система диференціальних рівнянь МСС. Початкові та Граничні умови. Література: [5]: розділ 3, § 3.1–3.3, с. 32–42, розділ 4, § 4.1–4.3, с. 44–53; [1]: розділ 7, § 7.7–7.8, с. 166–171; електронний конспект лекцій.
6	<b>Тема 2.2. Числові методи розв’язання нелінійних задач МСС на базі методу скінчених елементів</b> Лекція 16–19. Методи числового розв’язання задач теплопровідності, тепло-електропровідності, пружно-пластичної поведінки металів та сипких матеріалів. Алгоритм зворотного відображення. – 8 год. Завдання на СРС. Література: [5]: розділ 1, § 1.1–1.3, с. 9–19, розділ 2, § 2.1–2.3, с. 20–30, розділ 3, § 3.1–3.3, с. 32–42, розділ 4, § 4.1–4.3, с. 44–53; [4]: розділ 7, § 7.1–7.2, с. 178–184; електронний конспект лекцій.
7	<b>Тема 2.3. Числові методи розв’язання нелінійних задач тепло-гідродинамічного стану ньютонівських та неньютонівських рідин на базі методу скінчених об’ємів</b> Лекція 20–23. Числові методи розв’язання задач ламінарного і турбулентного руху ньютонівської нестисливої рідини. Алгоритм SIMPLE. Числові методи розв’язання задач ламінарного руху неньютонівських рідин. – 8 год. Завдання на СРС. Формулювання початкових та граничних умов. Література: [4]: розділ 5, § 5.1–5.2, с. 127–139, розділ 9, § 9.1–9.3, с. 198–218; електронний конспект лекцій.
8	<b>Тема 2.4. Програмна реалізація числових методик розв’язання нелінійних задач МСС</b> Лекція 24–27. Побудова геометрії розрахункової області та її дискретизація з використанням відкритої CAD-системи Gmsh. Програмна реалізація числових методик розв’язання нелінійних задач МСС в системі Mathcad. Проведення числових експериментів в системі Mathcad. Візуалізація результатів числового аналізу у відкритому графічному пакеті для інтерактивної візуалізації ParaView. – 8 год. Завдання на СРС. Література: [5]: розділ 1, § 1.1–1.3, с. 9–19, розділ 2, § 2.1–2.3, с. 20–30, розділ 3, § 3.1–3.3, с. 32–42, розділ 4, § 4.1–4.3, с. 44–53; електронний конспект лекцій.

### Практичні заняття

Робочим навчальним планом практичні заняття не передбачено.

### Лабораторні заняття (комп’ютерний практикум)

Робочим навчальним планом лабораторні заняття не передбачено.

### 6. Самостійна робота аспіранта

№ з/п	Назва теми, що виноситься на самостійне опрацювання	Кількість годин СРС
1	<b>Тема 1.1. Основи тензорного числення</b> Тензори. Ранг тензора. Фізичні закони. Вектори і скаляри. Системи координат. Базисні вектори. Трієдр одиничних векторів. Дії над векторами. Діади і діадики. Індексні позначення. Інтервал зміни індексів і погодження про підсумовування. Погодження про підсумовування у символічних позначеннях. Перетворення координат. Загальне поняття тензора. Метричний тензор. Декартові тензори. Література: [1]: розділ 1, § 1.1–1.23, с. 11–52, [Д1]: додаток А, § А.1, с. 319–335.	2

№ з/п	Назва теми, що виноситься на самостійне опрацювання	Кількість годин СРС
2	<b>Тема 1.2. Напружений стан</b> Поняття суцільного середовища. Однорідність. Ізотропність. Густина. Масові сили. Поверхневі сили. Принцип напруження Коші. Вектор напруження. Напружений стан в точці. Тензор напруження. Зв'язок між тензором напруження і вектором напруження. Рівновага сил і моментів. Симетрія тензора напруження. Закони перетворення тензора напруження. Поверхні напруження Коші. Головні напруження. Інваріанти тензора напруження. Еліпсоїд напружень. Максимальне і мінімальне дотичне напруження. Круги Мора для напруження. Плоский напружений стан. Девіатор та кульовий тензор напруження. Література: розділ 2, § 2.1–2.14, с. 53–78; [Д1]: додаток А, § А.2, с. 335–344.	4
3	<b>Тема 1.3. Деформований стан</b> Частинки і точки. Конфігурація суцільного середовища. Деформація і течія. Радіус-вектор. Вектор переміщення. Лагранжевий і ейлерів опис руху. Градієнти деформації. Градієнти переміщення. Тензори деформацій. Тензори скінченних деформацій. Теорія малих деформацій. Тензори нескінченно малих деформацій. Відносне переміщення. Тензор лінійного повороту. Вектор повороту. Геометричний зміст тензорів лінійних деформацій. Коефіцієнт довжини. Інтерпретація скінченних деформацій. Тензори коефіцієнтів довжини. Тензор повороту. Властивості перетворення тензорів деформацій. Головні деформації. Інваріанти деформації. Об'ємне розширення. Кульовий тензор і девіатор деформацій. Плоска деформація. Круги Мора для деформації. Рівняння сумісності для лінійних деформацій. Література: [1]: розділ 3, § 3.1–3.16, с. 79–107; [Д1]: додаток А, § А.3, с. 344–361.	2
4	<b>Тема 1.4. Рух і течія</b> Течія. Матеріальна похідна. Швидкість. Прискорення. Миттєве поле швидкості. Траєкторії. Лінії току. Усталений рух. Швидкість деформації. Завихреність. Прирошення деформації. Фізична інтерпретація тензорів швидкості деформації і завихреності. Матеріальні похідні від елемента об'єму, елемента поверхні і лінійного елемента. Матеріальні похідні від інтегралу по об'єму, інтегралу по поверхні і лінійного інтегралу. Література: [1]: розділ 4, § 4.1–4.7, с. 108–122; [Д1]: додаток А, § А.4, с. 361–368	4
5	<b>Тема 1.5. Закони механіки суцільного середовища</b> Закон збереження маси. Рівняння нерозривності. Теорема про зміну кількості руху. Рівняння руху. Рівняння рівноваги. Теорема про зміну моменту кількості руху. Закон збереження енергії. Перший закон термодинаміки. Рівняння енергії. Рівняння стану. Ентропія. Другий закон термодинаміки. Нерівність Клаузіуса-Дюгема. Дисипативна функція. Визначальні рівняння. Термомеханічний і механічний континууми. Література: Література: [1]: розділ 5, § 5.1–5.7, с. 123–134; [Д1]: додаток А, § А.5, с. 368–370.	4
6	<b>Тема 1.6. Лінійна теорія пружності</b> Узагальнений закон Гука. Функція енергії деформації. Ізотропні та анізотропні середовища. Симетрія пружних властивостей. Ізотропне середовище. Пружні сталі. Постановка статичних і динамічних задач теорії пружності. Теорема про суперпозицію. Єдиність розв'язків.	4

№ з/п	Назва теми, що виноситься на самостійне опрацювання	Кількість годин СРС
	Принцип Сен-Венана. Плоскі задачі теорії пружності. Плоский напружений стан і плоска деформація. Функції напруження Ері. Двовимірні статичні задачі теорії пружності у полярних координатах. Гіперпружність. Гіпопружність. Лінійна термопружність Література: [1]: розділ 6, § 6.1–6.10, с. 136–154; [Д1]: додаток А, § А.6, с. 370–373.	
7	<b>Тема 1.7. Механіка рідин та газів</b> Тиск рідини. Тензор в'язких напружень. Баротропна течія. Визначальні або фізичні рівняння. Стоксові рідини. Ньютонівські рідини. Основні рівняння ньютонівської рідини. Рівняння Нав'є-Стокса-Дюгема. Усталена течія. Гідростатика. Безвихрова течія. Ідеальна рідина. Рівняння Бернуллі. Циркуляція. Потенціальна течія. Плоска потенціальна течія. Література: [1]: розділ 7, § 7.1–7.6, с. 155–165; [Д1]: додаток А, § А.7, с. 373–377.	4
8	<b>Тема 1.8. Теорія пластичності</b> Основні положення та визначення. Ідеалізовані діаграми пластичної поведінки. Умови пластичності. Критерії Треска та Мізеса. Простір напруження. П-площина. Поверхня плинності. Поведінка матеріалу за межею плинності. Ізотропне і кінематичне зміцнення. Співвідношення між напруженнями і деформаціями в пластичному стані. Теорія пластичного потенціалу. Еквівалентне напруження. Еквівалентне прирощення пластичної деформації. Робота на пластичних деформаціях. Гіпотези зміцнення. Співвідношення інкрементарної теорії пластичності для середовища з ізотропним зміцненням. Деформаційна теорія пластичності. Задачі пружно-пластичності. Література: [1]: розділ 8, § 8.1–8.13, с. 172–198; [Д1]: додаток А, § А.8, с. 377–379.	2
9	<b>Тема 1.9. Лінійна в'язкопружність</b> В'язкопружна поведінка матеріалу. Найпростіші механічні моделі в'язкопружної поведінки. Узагальнені моделі. Лінійне диференціальне операторне рівняння. Повзучість і релаксація. Функції повзучості та релаксації. Інтеграли спадковості. Комплексні модулі та піддатливість. Тривимірна теорія лінійної в'язкопружності. Аналіз в'язкопружного напруженого стану. Принцип відповідності. Література: [1]: розділ 9, § 9.1–9.8, с. 200–217; [Д1]: додаток А, § А.9, с. 380–383.	4
10	<b>Тема 1.10. Турбулентний рух суцільного середовища</b> Класичні моделі турбулентності для напружень Рейнольдса. Модель Прандтля, що побудована на алгебраїчному виразі. Модель Прандтля-Колмогорова з одним рівнянням. модель ізотропної турбулентності з двома скалярними рівняннями. Математичні моделі для числового моделювання турбулентних потоків. Моделі турбулентності RANS. Моделі турбулентності LES. Гібридні моделі турбулентності DES. Література: [Д5]: лекц. 9, с. 80–86; [1]: розділ 11, § 11.1–11.4, с. 256–271; [4]: розділ 9, § 9.1–9.3, с. 198–218.	4
11	<b>Тема 2.1. Математичне формулювання нелінійних задач МСС</b> Розв'язання нелінійної задачі теплопровідності на прикладі нагрівання/охолодження циліндра методом скінченних елементів з використанням трикутних скінченних елементів в середовищах Gmsh, Mathcad і ParaView. Порівняння результатів з точними розв'язками та числовими розв'язками, отриманими за допомогою програмних продуктів ANSYS.	8



№ з/п	Назва теми, що виноситься на самостійне опрацювання	Кількість годин СРС
	Література: [5]: розділ 1, § 1.1–1.3, с. 9–19.	
12	<b>Тема 2.2. Числові методики розв’язання нелінійних задач МСС на базі методу скінченних елементів</b> Розв’язання нелінійної задачі тепло-електропровідності на прикладі нагрівання циліндричного провідника методом МСЕ з використанням трикутних скінченних елементів в середовищах Gmsh, Mathcad і ParaView. Розв’язання нелінійної задачі пружнопластичності на прикладі товстостінного циліндра під внутрішнім тиском методом МСЕ з використанням неявного алгоритму зворотного відображення в середовищах Gmsh, Mathcad і ParaView. Розв’язання нелінійної задачі пружнопластичності на прикладі конуса сипкого матеріалу методом МСЕ з використанням неявного алгоритму зворотного відображення в середовищах Gmsh, Mathcad і ParaView. Порівняння результатів з точними розв’язками та числовими розв’язками, отриманими за допомогою програмних продуктів ANSYS. Література: [5]: розділ 2, § 2.1–2.3, с. 20–30, розділ 3, § 3.1–3.3, с. 32–42, розділ 4, § 4.1–4.3, с. 44–53.	8
13	<b>Тема 2.3. Числові методики розв’язання нелінійних задач тепло-гідродинамічного стану ньютонівських та неньютонівських рідин на базі методу скінчених об’ємів</b> Розв’язання нелінійних задач ламінарного і турбулентного руху ньютонівської нестисливої рідини методом МСО з використанням алгоритму SIMPLE в середовищах OpenFOAM і ParaView. Порівняння результатів з числовими розв’язками, отриманими за допомогою програмних продуктів ANSYS. Література: [4]: розділ 5, § 5.1–5.2, с. 127–139, розділ 9, § 9.1–9.3, с. 198–218.	8
14	<b>Тема 2.4. Програмна реалізація числових методик розв’язання нелінійних задач МСС</b> Розв’язання нелінійних задач ламінарного руху неньютонівських рідин методом МСО з використанням OpenFOAM і ParaView. Порівняння результатів з числовими розв’язками, отриманими за допомогою програмних продуктів ANSYS. Література: [1]: розділ 7, § 7.7–7.8, с. 166–171.	8
Всього		54

### Контрольні роботи

Робочим навчальним планом контрольні роботи не передбачено.

### Політика та контроль

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

Порушення Кодексу академічної доброчесності Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» є серйозним порушенням, навіть якщо воно є ненавмисним. Кодекс доступний за посиланням: <https://kpi.ua/code.3>.

Зокрема, дотримання Кодексу академічної доброчесності означає, що вся робота на іспитах та заліках має виконуватися індивідуально. Під час виконання самостійної роботи здобувачі PhD можуть консультуватися з викладачами та з іншими здобувачами PhD, але повинні самостійно розв’язувати завдання, керуючись власними знаннями, уміннями та навичками. Посилання на всі ресурси та джерела (наприклад, у звітах, самостійних роботах чи презентаціях) повинні бути

чітко визначені та оформлені належним чином. У разі спільної роботи з іншими здобувачами PhD над виконанням індивідуальних завдань, викладач повинен зазначити ступінь їх участі в роботі.

Академічна доброчесність: Політика та принципи академічної доброчесності визначені у розділі 3 Кодексу. Норми етичної поведінки: Норми етичної поведінки студентів і працівників визначені у розділі 2.

Вимоги, які ставляться перед здобувачами PhD:

- відвідування лекційних та практичних занять є обов'язковою складовою вивчення матеріалу, викладач фіксує присутність на заняттях;
- викладач використовує Google classroom та ZOOM для викладання матеріалу поточної лекції, додаткових ресурсів, практичних занять та ін.;
- на лекції викладач користується власним презентаційним матеріалом; який по закінченні лекції викладає у Google classroom з відповідної дисципліни, де присутній потік здобувачів PhD;
- на лекції заборонено відволікати викладача від подання матеріалу здобувачами PhD, усі питання, уточнення тощо здобувачі ставлять в кінці лекції у відведений для цього час;
- виконання розрахункових робіт (комп'ютерних практикумів) відбувається у години Самостійної роботи та надсилається на електронну пошту викладача або телеграм;
- відповідно до «Кодексу честі» розрахункові роботи (комп'ютерні практикуми) та підготовку відповідей на теоретичні і практичні питання екзаменаційного білету здобувачі PhD виконують самостійно;
- заохочувальні бали виставляються за: активну участь на лекціях; підготовку наукових публікацій за темами дисципліни.

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

**Поточний контроль:**

експрес-опитування, розрахункові роботи (комп'ютерні практикуми).

**Календарний контроль:**

Метою його проведення є підвищення якості навчання здобувачів PhD та моніторинг виконання графіка освітнього процесу (виконання вимог силабусу).

Календарний рубіжний контроль проводиться два рази в семестр.

Перший контроль – 8-й тиждень, другий - 14-й тиждень.

**Семестровий контроль:** екзамен

**Рейтинг здобувача PhD з дисципліни** складається з балів, що отримуються за:

експрес-опитування на лекційних заняттях, виконання розрахункових робіт (комп'ютерних практикумів) у години Самостійної роботи здобувачів PhD.

**Система рейтингових балів та критерії оцінювання.**

Рейтингові бали  $r_k$ :

**а) 5 експрес-опитувань на лекціях:**

- повна відповідь 4 бали;
- неповна відповідь 2 бали;
- незадовільна відповідь 0 балів.

**в) 8 розрахункових робіт:**

- виконання завдань у повному обсязі 5 балів;
- виконання завдань у обсязі 80% 4 бали;
- виконання завдань у обсязі 60% 3 бали.

**Заохочувальні бали  $r_s$ .**

- додаткові заохочувальні бали +2 бали.

Значення  $R_c$  – стартової шкали PCO поточної успішності дорівнює сумі максимальних вагових балів:

$$R_c = \sum r_k = 4 \times 5 + 5 \times 8 = 20 + 40 = 60 \text{ балів.}$$

Умови допуску до семестрового контролю: семестровий рейтинг  $\geq 30$  балів.

Екзаменаційні бали  $R_E = 40$  балів:

- **задача**
  - правильний розв'язок 20 балів
  - розв'язок з арифметичними помилками до 16 балів
  - розв'язок з теоретичними помилками 12 балів і більше
- **кожне з двох теоретичних питань білету**
  - повна відповідь 10 балів
  - неповна відповідь 5-8 балів

Розмір  $R$ -шкали PCO з кредитного модуля формується як сума максимальних балів поточної успішності  $R_c$  та екзаменаційних балів  $R_E$ :

$$R = R_c + R_E = 60 + 40 = 100$$

Рейтингова оцінка здобувача з кредитного модуля формується як сума балів поточної успішності навчання – стартового рейтингу  $r_c = \sum r_k + \sum r_s$  (рейтингові бали та заохочувальні/штрафні бали) – та екзаменаційних балів  $r_E$ :

$$RD = \sum r_k + \sum r_s + \sum r_E$$

Атестація здобувача здійснюється за результатами поточного значення індивідуального рейтингу з дисципліни –  $R_c$ . Якщо значення  $R_c$  не менше 50% від максимально можливого рейтингу -  $R_c^A$  на час атестації (I ат. –  $R_c^A = 25$ , II ат. –  $R_c^A = 50$ ), здобувач PhD вважається задовільно атестованим.

Здобувачі, які набрали протягом семестру рейтинг з дисципліни  $R_c < 30$ , зобов'язані до початку екзаменаційної сесії підвищити його, інакше вони не допускаються до екзамену і мають академічну заборгованість. Здобувачі, що набрали протягом семестру необхідну кількість балів ( $R \geq 30$  балів) допускаються до складання екзамену.

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

**Процедура оскарження результатів контрольних заходів:**

Здобувачі мають можливість підняти будь-яке питання стосовно процедури контрольних заходів та очікувати, що воно буде розглянуто згідно з попередньо визначеними процедурами. Здобувачі мають право оскаржити результати контрольних заходів, але обов'язково аргументовано пояснивши, з якими зауваженнями не погоджуються.

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

*Перелік теоретичних питань, які виносяться на Поточний, Календарний та Семестровий контроль наведено в Camrus, Google classroom.*

***Дистанційне навчання:** Дистанційне навчання з даної навчальної дисципліни допускається за певною тематикою за умови погодження зі здобувачами PhD. У разі, якщо невелика кількість здобувачів PhD має бажання (або через форс-мажорні обставини) пройти онлайн-курс за певною тематикою, вивчення матеріалу у такій формі допускається, але здобувачі PhD повинні виконати всі завдання, передбачені силабусом навчальної дисципліни.*

***Виставлення оцінки зі іспит та оцінки за контрольні заходи** шляхом перенесення результатів проходження онлайн-курсу з даної дисципліни передбачено лише у разі форс-мажорних обставин здобувачів PhD.*

***Виконання** деяких тематичних завдань здійснюється під час самостійної роботи здобувачів PhD у дистанційному режимі (з можливістю консультування з викладачем через соціальні мережі, електронну пошту тощо).*

***Позааудиторні заняття:** Консультації (індивідуальні та групові) з даної навчальної дисципліни та самостійна робота здобувачів PhD можуть проводитись за попередньою згодою у науковій лабораторії, в науково-технічній бібліотеці університету та/або у домашніх умовах, відповідно. Навчальний матеріал, передбачений для засвоєння здобувачами PhD у процесі самостійної роботи, виноситься на підсумковий контроль разом з навчальним матеріалом, що вивчався при проведенні аудиторних навчальних занять.*

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

Складено професор, д.т.н., професор, Карвацький Антон Янович

Ухвалено кафедрою хімічного, полімерного і силікатного машинобудування (протокол № 10 від 17.05.2023 р.)

Погоджено Методичною комісією факультету<sup>1</sup> (протокол № 10 від 26.05.2023 р.)

---

<sup>1</sup> Методичною радою університету – для загальноуніверситетських дисциплін.