



МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

1. Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Перший (бакалаврський)</i>
Галузь знань	<i>10 Природничі науки</i>
Спеціальність	<i>105 Прикладна фізика та наноматеріали</i>
Освітня програма	<i>Прикладна фізика</i>
Статус дисципліни	<i>Вибіркова</i>
Форма навчання	<i>очна(денна)</i>
Рік підготовки, семестр	<i>3 курс весняний семестр, 4 курс осінній семестр</i>
Обсяг дисципліни	<i>8 (240)</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>Моделювання фізичних процесів – 1 частина: залік/реферат Моделювання фізичних процесів – 2 частина: залік/ МКР, РР</i>
Розклад занять	http://ipt.kpi.ua/navchalnij-protses
Мова викладання	<i>Українська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: к.ф.-м.н., Димитрієва Наталія Федорівна, dimitrievanf@gmail.com Лабораторні: к.ф.-м.н., Димитрієва Наталія Федорівна, dimitrievanf@gmail.com
Розміщення курсу	http://phes.ipt.kpi.ua/modelyuvannya-fizychnyh-protsesiv https://do.ipk.kpi.ua/course/view.php?id=1831#section-9

2. Програма навчальної дисципліни

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

Курс «Моделювання фізичних процесів» (МФП) має велике значення у підготовці фахівців в області прикладної фізики та наноматеріалів, що навчає формалізувати, моделювати та розв'язувати складні актуальні задачі промислової гідрогазодинаміки, тепло- та масопереносу в широкому класі режимів процесів та геометричних конструкцій об'єктів, що вивчаються.

Метою навчальної дисципліни є формування у студентів компетентностей:

- моделювати та розв'язувати стаціонарні та нестаціонарні задачі промислової гідрогазодинаміки, процесів тепло- та масообміну;
- розв'язувати задачі визначення просторово-часових полів фізичних величин суцільних середовищ при заданих крайових умовах;
- будувати комп'ютерні моделі, використовуючи відкриті пакети прикладних програм, зокрема, SALOME, OpenFOAM, Paraview;
- будувати розрахункові сітки різними методами;
- володіння різними методами обробки і візуалізації результатів чисельних розрахунків;
- критично аналізувати отримані результати з точки зору точності, достовірності, відповідності фізичним особливостям досліджуваних процесів;
- на основі побудованих комп'ютерних моделей та отриманих результатів розрахунків оптимізувати геометричні та режимні параметри задачі з метою вдосконалення конструкцій об'єктів нової техніки та лабораторних установок для фізичних досліджень.
- ФК1 Здатність брати участь у плануванні та виконанні наукових та науково-технічних проектів
- ФК7 Здатність використовувати методи і засоби теоретичного дослідження та

математичного моделювання в професійній діяльності

Після засвоєння навчальної дисципліни студенти мають продемонструвати такі результати навчання:

- Знання основних моделей механіки суцільних середовищ,
- Знання методів чисельного моделювання та обробки результатів розрахунку.
- Уміння самостійно структурувати й формалізувати в термінах модельного представлення широкого класу задач промислової гідрогазодинаміки, процесів тепло- та масообміну та їхньої чисельної реалізації у відкритих пакетах прикладних програм
- Уміння самостійно побудувати комп'ютерну модель фізичного процесу в суцільному середовищі в рамках обраного пакету прикладних програм
- Навички роботи у відкритому ПЗ, зокрема, в системі Linux, пакетах прикладних програм SALOME, OpenFOAM, Paraview
- ПРН6 Відшукувати необхідну науково-технічну інформацію в науковій літературі, електронних базах, інших джерелах, оцінювати надійність та релевантність інформації.
- ПРН7 Класифікувати, аналізувати та інтерпретувати науково-технічну інформацію в галузі прикладної фізики.
- ПРН9 Презентувати результати досліджень і розробок фахівцям і нефахівцям, аргументувати власну позицію.

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

Навчальна дисципліна «Моделювання фізичних процесів» безпосереднім чином ґрунтується на курсах циклу професійної підготовки: «фізика суцільних середовищ», «основи конвективного теплообміну», «обчислювані методи», «диференційні рівняння», «рівняння математичної фізики», «програмування».

Отримані практичні навички та засвоєні теоретичні знання під час вивчення навчальної дисципліни «Моделювання фізичних процесів» можна використовувати в подальшому під час навчання спеціалізованих дисциплін фізико-енергетичного циклу. Особливо у наступних навчальних дисциплінах циклу професійної підготовки: «основи теорії примежового шару», «теорія гідродинамічної стійкості», «газодинаміка», «спецглави теорії теплообміну», «наукові дослідження за темою кваліфікаційної роботи».

Необхідні навички:

1. Формулювати, аналізувати і розв'язувати типові задачі визначення просторово-часових полів параметрів суцільних середовищ при заданих крайових умовах.
2. Формулювати, аналізувати і розв'язувати задачі в області законів переносу теплоти конвективним теплообміном.
3. Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.
4. Володіння алгоритмами розв'язку різних типів рівнянь із частинними похідними, що моделюють процеси у фізичних системах.
5. Володіння чисельними методами та основами програмування

3. Зміст навчальної дисципліни

Навчальна дисципліна містить три кредитні модулі:

- Моделювання фізичних процесів – 1 частина (МФП-1);
- Моделювання фізичних процесів – 2 частина (МФП-2);

Семестровий (кредитний) модуль МФП-1.

Розділ 1. Вступ.

Тема 1.1. Поняття і етапи моделювання.

Розділ 2. Сучасний стан і можливості комп'ютерного моделювання .

Тема 2.1. Можливості, переваги та недоліки існуючих пакетів прикладних програм.

Тема 2.2. Високопродуктивні обчислення. Світовий рейтинг TOP500.

Тема 2.3. Методи чисельного моделювання.

Розділ 3. Постановка задачі.

Тема 3.1. Теоретичне обґрунтування, ціль та завдання.

Тема 3.2. Математичне моделювання. Система визначальних рівнянь, початкові та граничні умови.

Тема 3.3. Масштаби задачі. Критерії подібності.

Розділ 4. Підготовка вихідних даних (Preprocessing).

Тема 4.1. Геометрія. Визначення складових розрахункової області, методи побудови.

Тема 4.2. Розрахункова сітка, різновиди й алгоритм дискретизації. Перевірка якості.

Розділ 5. Чисельна модель.

Тема 5.1. Дискретизація системи визначальних рівнянь.

Тема 5.2. Апроксимація конвективних, дифузійних та джерельних членів.

Тема 5.3. Дискретизація граничних умов. Пристінкові модельні функції.

Тема 5.4. Методи розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь.

Тема 5.5. Процедура сумісної корекції полів швидкості та тиску.

Розділ 6. Розрахунковий експеримент.

Тема 6.1. Запуск задачі в інтерактивному та пакетному режимі. Контроль збіжності.

Тема 6.2. Паралельні розрахунки. Декомпозиція розрахункової області.

Розділ 7. Обробка результатів розрахунку (Postprocessing).

Тема 7.1. Обчислення додаткових фізичних змінних, що не входять в чисельну модель, та інтегральних характеристик.

Тема 7.2. Візуалізація результатів розрахунку в графічних пакетах.

Розділ 8. Аналіз результатів розрахунку.

Тема 8.1. Порівняння результатів експериментальних, аналітичних та чисельних досліджень фізичних процесів.

Тема 8.2. Критерії адекватності чисельної моделі та достовірності отриманих результатів розрахунку.

Семестровий (кредитний) модуль МФП-2.

Розділ 1. Моделювання процесу встановлення течій, число Струхала.

Тема 1.1. Стаціонарні течії. Визначення фіктивного часу.

Тема 1.2. Нестационарні течії.

Розділ 2. Режими течій, число Рейнольдса.

Тема 2.1. Моделювання ламінарних течій. Рівняння Нав'є-Стокса.

Тема 2.2. Моделювання турбулентних течій. Рівняння Рейнольдса (RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes equations).

Розділ 3. Класифікація моделей турбулентності.

Тема 3.1. Алгебраїчні моделі.

Тема 3.2. Диференціальні моделі.

Тема 3.3. Метод великих вихорів (LES – Large Eddies Simulation).

Тема 3.4. Пряме чисельне моделювання (Direct numerical simulation - DNS).

Тема 3.5. Порівняння моделей турбулентності.

Розділ 4. Моделювання стисливості середовища.

Тема 4.1. Число Маха

Тема 4.2. Нестислива рідина.

Тема 4.3. Стисливий газ.

Розділ 5. Моделювання тепломасопереносу.

Тема 5.1. Рівняння теплопровідності.

Тема 5.2. Рівняння дифузії.

Тема 5.3. Моделювання багатофазних течій.

4. Навчальні матеріали та ресурси

Базова література

3. Комп'ютерне моделювання процесів переносу в суцільному середовищі [Електронний ресурс] : методичні вказівки до виконання курсової роботи з навчальної дисципліни «Моделювання фізичних процесів» для студентів, які навчаються за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад. Н. Ф. Димитрієва. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,21 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 25 с. – <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/33292>. (МФП-1: Темі 1.1, 5.5)

4. Механіка суцільних середовищ – 1. Механіка суцільних середовищ в інженерних розрахунках [Електронний ресурс] : текст лекцій для студентів спеціальності «Галузеве машинобудування», спеціалізації «Інжиніринг, обладнання та технології виробництв полімерних та будівельних матеріалів і виробів» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: О. С. Сахаров, А. Я. Карвацький ; ред. І. О. Мікульонок. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,38 МБ). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 233 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/19011> (**МФП-1: Тему 5.5. МФП-2:Розділи 4, 5**)
5. Карвацький, А. Я. Механіка суцільних середовищ – 2. Нелінійні задачі механіки суцільних середовищ. Конспект лекцій з навчальної дисципліни [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізації «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання виробництв полімерних і будівельних матеріалів і виробів» / А. Я. Карвацький ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,42 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 94 с. – <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/23918> (**МФП-1: Розділи 3. МФП-2: Розділи 1, 2, 4; Тему 3.1, 3.2, 3.5**)
6. Методи обчислень: Частина 1. Чисельні методи алгебри [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 113 «Прикладна математика», спеціалізації «Наука про дані (Data Science) та математичне моделювання» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В. В. Третиник, Н. Д. Любашенко. – Електронні текстові дані (1 файл: 21,3 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 138 с. – <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/28225> (**МФП-1: Тему 2.3, 5.4**)

Допоміжна література

7. Приходько А.А. Компьютерные технологии в аэрогидродинамике и тепломассообмене / А.А.Приходько. – К.: Наукова думка, 2003. – 380 с <https://drive.google.com/file/d/1vLq5nBahftQS1NdXYPPu2PvNz0I76cWe/view?usp=sharing> (**МФП-1: Розділи 2, 4, 8; Тему 5.4, 6.2. МФП-2: Розділи 3-5**)
8. Задачин В. М. Чисельні методи : навчальний посібник / В.М.Задачин, І.Г.Конюшенко. – Х. : Вид. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2014. – 180 с. <https://drive.google.com/file/d/1zhPp7ezpMnmCbozZLAGF6WCjP4sTWz5t/view?usp=sharing> (**МФП-1: Розділи 4, 5; Тему 2.3.**)
9. Халатов, А. А. Основи теорії примежового шару [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали» / А.А.Халатов, Є.В.Мочалін, Н.Ф.Димитрієва ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,86 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 191 с. – <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/26035> (**МФП-1: Розділи 3, 5, 8. МФП-2: Тему 2.2, 3.1, 3.2, 5.1, 5.2**)
10. OpenFOAM. User Guide // C.J.Greenshields. – The OpenFOAM Foundation, 2020. – 243 p. – <http://foam.sourceforge.net/docs/Guides-a4/OpenFOAMUserGuide-A4.pdf> (**МФП-1: Розділи 5, 6; Тему 7.1**)
11. OpenFOAM. Tutorial Guide. – OpenCFD Limited, 2020. – 104 p. – <https://netix.dl.sourceforge.net/project/openfoam/v2006/TutorialGuide.pdf> (**МФП-1: Розділи 4,6,7**)
12. Ayachit U. The ParaView Guide. Community Edition / U.Ayachit at al. – Kitware Inc., 2020. – 276 p. <file:///C:/Users/natali/AppData/Local/Temp/ParaViewGuide-5.8.0.pdf> (**МФП-1: Тему 7.2.**)
13. Uroić T. Implicitly Coupled Pressure–Velocity Solver / T.Uroić, H.Jasak, H.Rusche // In OpenFOAM® Selected Papers of the 11th Workshop, ed. J.M.Nóbrega, H.Jasak, Springer Press, 2019. – pp 103-161. – DOI: [10.1007/978-3-319-60846-4_19](https://doi.org/10.1007/978-3-319-60846-4_19) (**МФП-1: Розділ 6; Тему 2.1, 5.1, 5.5**)
14. Mathematical Methods in Engineering and Applied Sciences. – Ed. by H. Dutta. – CRC Press, 2020. – 308 p. – ISBN-10: 0367359774, ISBN-13: 978-0367359775 (**МФП-1: Розділ 1; Тему 3.2. МФП-2: Розділи 1, 2**)
15. Tu J. Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach, 3^d Edition / J.Tu, G.H.Yeoh, C.Liu. – Butterworth-Heinemann, 2018. – 498 p. – Paperback ISBN: 9780081011270, eBook ISBN: 9780081012444 (**МФП-1: Розділ 1; Тему 2.3, 5.1, 5.2, 5.5. МФП-2: Розділи 1, 2**)

16. Механіка суцільних середовищ [Текст] : підручник / П. Трохимчук ; Східноєвроп. нац. ун-т ім. Лесі Українки. – Луцьк : Вежа-Друк, 2018. – 166 с. – ISBN 978-966-940-114-4 (МФП-1: *Темі 3.2. МФП-2: Розділи 1, 2; Темі 5.1*)
17. Попов В. В. Методи обчислень: конспект лекцій для студентів механіко-математичного факультету / В.В.Попов. – Київ: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2012. https://drive.google.com/file/d/1zKuUM8NxshEj7BcKJ0XhTOni6_Jpr_7D/view?usp=sharing (МФП-1: *Розділи 4, 5; Темі 2.3*)
18. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г.Лойцянский. – М.: Наука, 1987. – 840 с. <https://drive.google.com/file/d/1xnXI2izQ2XjK-yo76tfWhAppPU9OoRwf/view?usp=sharing> (МФП-1: *Розділи 3, 8. МФП-2: Розділи 1, 2, 4, 5*)
19. Ландау Л. Д. Теоретическая физика, том VI, Гидродинамика / Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. М.: Наука, 1986. – 736 с. <https://drive.google.com/file/d/1syfe00DVZB2RUhCR8FYixSIL-Yqdz7SL/view?usp=sharing> (МФП-1: *Розділи 3, 8. МФП-2: Розділи 1, 2, 4, 5*)
20. Повх И.Л. Техническая гидромеханика / И.Л.Повх. – Л.: Машиностроение. 1976. https://drive.google.com/file/d/1V6zwy2zGD08AAiQv_gEOiq9JOIDV9Uza/view?usp=sharing (МФП-1: *Розділи 3, 8. МФП-2: Розділи 1, 2, 4, 5; Темі 3.1, 3.2*)
21. Хинце И.О. Турбулентность. Ее механизм и теория / И.О. Хинце. – М.: Физматгиз, 1963. – 680 с. <https://drive.google.com/file/d/18ThjtLal3BJmQUYk3XNCLEYbnvkEBPIh/view?usp=sharing> (МФП-1: *Розділ 8; Темі 5.5. МФП-2: Темі 2.2, 3.2*)
22. Димитрієва Н. Ф. Моделювання турбулентних течій розведених розчинів полімерів: дис ... канд. фіз.-мат. наук : 01.02.05 / Димитрієва Наталія Федорівна. – Київ, 2011. – 172 с. – <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/33718> (МФП-1: *Розділи 1, 8; Темі 5.3. МФП-2: Темі 2.2, 3.1, 3.2*)
23. Rodriguez S. LES and DNS Turbulence Modeling / S.Rodriguez. // In: Applied Computational Fluid Dynamics and Turbulence Modeling. – Springer, Cham. 2019. – pp 197-223. – Print ISBN 978-3-030-28690-3, Online ISBN 978-3-030-28691-0 https://doi.org/10.1007/978-3-030-28691-0_5 (МФП-1: *Розділ 8. МФП-2: Темі 3.3-3.5*)
24. Multiphase Flow: Theory and Applications. by P.Vorobieff, C.A.Brebbia Ed. – WIT Press, 2018. – 466p. – ISBN-13: 978-1784663117. ISBN-10: 1784663115. (МФП-1: *Розділ 8. МФП-2: Темі 5.3*)

Інформаційні ресурси

1. www.salome-platform.org (МФП-1: *Розділи 1, 2*)
2. <https://www.openfoam.com> (МФП-1: *Розділи 1, 2, 6; Темі 2.1, 7.1. МФП-2*)
3. www.paraview.org (МФП-1: *Темі 7.2. МФП-2*)
4. <https://www.kitware.com> (МФП-1: *Темі 7.2*)
5. <https://openfoamwiki.net> (МФП-1: *Розділи 6; Темі 7.1. МФП-2*)
6. www.cfd-online.com/Forums/openfoam/ (МФП-1: *Темі 7.1. МФП-2*)
7. <https://www.youtube.com/channel/UCHXaKLIZRQxkSG6dD6ZWvSg> (користувач OpenFOAM Tutorials) (МФП-1: *Розділи 6; Темі 7.1. МФП-2*)
8. <http://supercomputer.com.ua/> (МФП-1: *Темі 2.2*)
9. <https://www.top500.org/> (МФП-1: *Темі 2.2*)
10. <https://www.ansys.com/> (МФП-1: *Темі 2.1*)

25. Навчальний контент

5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

В рамках дисципліни заплановано наступні види навчальних занять:

- лекції;
- комп'ютерний практикум;
- модульна контрольна робота;
- реферат;
- розрахункова робота;
- самостійна робота.

Темі дисципліни взаємозв'язані, матеріал вивчається в логічній послідовності. На лекціях розкриваються найбільш суттєві теоретичні питання, які дозволяють забезпечити студентам

можливість глибокого самостійного вивчення всього програмного матеріалу. Теми та порядок виконання робіт комп'ютерного практикуму сформовано в логічній послідовності і повністю узгоджуються з лекційним матеріалом. Теоретичні і практичні знання поглиблюються шляхом самостійної роботи з використанням рекомендованої літератури та глобальної мережі Internet.

На заняттях використовуються звичайна дошка, а також презентації лекцій з використанням мультимедіапроектора. На заняттях з комп'ютерного практикуму використовуються відкриті пакети прикладних програм SALOME, OpenFOAM, Paraview моделювання механіки суцільних середовищ, обчислювальна техніка. Основна методична особливість полягає у вивченні курсу з активним вживанням ЕОМ. Велика частина методичних матеріалів міститься у інструкціях користувача (user guide) у вище вказаних програмних продуктах.

Крім того, на заняттях з комп'ютерного практикуму студент має можливість слідкувати за ходом виконання робіт і повторювати етапи роботи за викладачем під час прямої трансляції на екран мультимедіапроектора. Контроль засвоєння навчального матеріалу здійснюється індивідуальним опитуванням, захистом робіт комп'ютерного практикуму, контрольною роботою та заліком.

5.1 Лекційні заняття

Семестровий (кредитний) модуль Моделювання фізичних процесів – 1 частина

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, завдання на СРС з посиланням на літературу)
1	<i>Поняття і етапи моделювання. Вступ до курсу МФП, основні поняття та визначення. Роль моделювання у процесі дослідження фізичних процесів. Етапи моделювання.</i> Література: [1], [2], [12], [13], [20] Завдання на СРС: Засвоїти теоретичний матеріал, прослуханий на лекціях. Звернути увагу на неможливість суто формального підходу до математичного моделювання
2	<i>Можливості, переваги та недоліки існуючих пакетів прикладних програм. Особливості моделювання та класи математичних рівнянь, які описують процеси у них. Сучасні тенденції та підходи до комп'ютерного моделювання.</i> Література: [5], [11] Інф. ресурси: [2], [10] Завдання на СРС: Порівняльна характеристика комерційного обчислювального пакету ANSYS та відкритого пакету OpenFOAM
3	<i>Високопродуктивні обчислення. Світовий рейтинг TOP500.</i> Література: [5] Інф. ресурси: [8], [9] Завдання на СРС: Найпотужніші суперкомп'ютери в Україні.
4	<i>Методи чисельного моделювання. Метод скінченних різниць. Метод скінченних елементів. Метод скінченних об'ємів.</i> Література: [4], [6], [13], [15] Завдання на СРС: Порівняльна характеристика методів чисельного моделювання. Метод спектральних елементів
5	<i>Теоретичне обґрунтування, ціль та завдання.</i> Література: [1], [16-18] Засвоїти лекційний матеріал. Обрати тему майбутньої курсової роботи.
6	<i>Математичне моделювання. Система визначальних рівнянь переносу маси, імпульсу, тепла, речовини, заряду та інше. Початкові та граничні умови.</i> Література: [2], [3], [7], [12], [14], [16-18] Завдання на СРС: Система рівнянь переносу з урахуванням сили тяжіння, сили Коріоліса, електро-магнітних сил.
7	<i>Масштаби задачі. Критерії подібності.</i> Література: [3], [7], [16-18] Завдання на СРС: дифузійні числа подібності.
8	<i>Геометрія. Визначення складових розрахункової області. Методи побудови з підвищенням та пониженням порядку. Поділ на блоки.</i> Література: [5], [6], [15]

	<p>Інф. Ресурси: [1], [2] Завдання на СРС: Поділ на блоки складних геометричних об'єктів</p>
9	<p><i>Розрахункова сітка, різновиди й алгоритм дискретизації. Типи комірок. Параметризація сітки.</i> Література: [5], [6], [15] Інф. ресурси: [1], [2] Завдання на СРС: Метод будови сітки snappyHexMesh у відкритому пакеті OpenFOAM</p>
10	<p><i>Дискретизація системи визначальних рівнянь. Схеми дискретизації. Порядок точності.</i> Література: [5-8], [11], [13], [15] Завдання на СРС: Дискретизація рівняння теплопровідності.</p>
11	<p><i>Апроксимація конвективних, дифузійних та джерельних членів. Дискретизація граничних умов. Пристінкові модельні функції.</i> Література: [5-8], [13], [15], [19], [20] Завдання на СРС: TVD-схема підвищеного порядку точності. Емпіричні функції моделей турбулентності</p>
12	<p><i>Методи розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь.</i> Література: [4-6], [8], [15] Завдання на СРС: метод спряжених градієнтів для симетричних матриць та біспряжених градієнтів для асиметричних матриць</p>
13	<p><i>Процедура сумісної корекції полів швидкості та тиску. Алгоритми зв'язку полів тиску і швидкості PISO, SIMPLE та PIMPLE.</i> Література: [1], [6], [8], [11] Завдання на СРС: Порівняння методів SIMPLE та PIMPLE, застосування для нестационарних та стаціонарних задач.</p>
14	<p><i>Запуск задачі в інтерактивному та пакетному режимі. Контроль збіжності. Точність і похибки розрахунку.</i> Література: [8], [9], [11] Інф. ресурси: [2], [5], [7] Завдання на СРС: Статистика розрахунку в пакеті OpenFOAM, число Куранта.</p>
15	<p><i>Паралельні розрахунки. Декомпозиція розрахункової області.</i> Література: [5], [8], [9], [11] Інф. ресурси: [2], [5], [7] Завдання на СРС: Команди decomposePar та reconstructPar пакету OpenFOAM, що дозволяють розбивати розрахункову область на декілька процесорів та збирати результати паралельних розрахунків в єдине ціле.</p>
16	Захист реферату
17	<p><i>Обчислення додаткових фізичних змінних, що не входять в чисельну модель, та інтегральних характеристик. Завихореність, напруги, опір, підйомна сила, тощо.</i> Література: [8], [9], [11] Інф. ресурси: [2], [5-7] Завдання на СРС: Утіліти розділу postprocessing пакету OpenFOAM.</p>
18	<p><i>Візуалізація результатів розрахунку в графічних пакетах. Побудування полів фізичних величин, ліній току, векторів, графіків.</i> Література: [10] Інф. ресурси: [3], [4] Завдання на СРС: можливості графічного пакету Paraview.</p>

Семестровий (кредитний) модуль Моделювання фізичних процесів – 2 частина

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, завдання на СРС з посиланням на літературу)
1	<p><i>Стаціонарні течії. Визначення фіктивного часу. Число Струхала.</i> Література: [3], [12-14], [16-18] Завдання на СРС: Моделювання стаціонарних течій, ітераційні методи, процес збіжності</p>
2	<p><i>Нестационарні течії. Квазістаціонарні течії. Характерні частоти залежно від режиму течії.</i></p>

	Література: [3], [12-14], [16-18] Завдання на СРС: взаємозалежність числа Струхалія і числа Рейнольдса
3	<i>Моделювання ламінарних течій. Рівняння Нав'є-Стокса. Число Рейнольдса як характеристика течії.</i> Література: [3], [12-14], [16-18] Завдання на СРС: Течія Пуазейля для в'язкої рідини, вивід рівняння.
4	<i>Моделювання турбулентних течій. Рівняння Рейнольдса (RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes equations). Осереднена та пульсаційна складова фізичних величин. Тензор турбулентних напруг.</i> Література: [3], [7], [12-14], [16-20] Завдання на СРС: Рівняння Рейнольдса в примежовому шарі.
5	<i>Алгебраїчні моделі. Турбулентний примежовий шар. Профіль швидкості. Двошарова і тришарова моделі.</i> Література: [3], [5], [7], [18], [20] Завдання на СРС: Обезрозмірювання за динамічними параметрами, динамічна швидкість, напруги тертя, константа Кармана.
6	<i>Диференціальні моделі. Припущення Буссінеска, турбулентна в'язкість. Рівняння переносу напруг Рейнольдса. k-ε модель, модель переносу напруг Рейнольдса.</i> Література: [3], [5], [7], [18-20] Завдання на СРС: Безшарова модель Ван-Дрифта, k-ω модель турбулентності. Порівняння моделей турбулентної в'язкості
7	<i>Метод великих вихорів (LES – Large Eddies Simulation). Процедура фільтрації, фільтри, підсіткові моделі.</i> Література: [5], [21] Завдання на СРС: Порівняння підходів LES і RANS до моделювання тербулентних течій.
8	<i>Пряме чисельне моделювання (Direct numerical simulation - DNS). Масштаби Колмогорова.</i> Література: [5], [21] Завдання на СРС: Порівняння підходів LES, RANS і DNS до моделювання тербулентних течій. Гібридні моделі. Перспективи розвитку теорії турбулентності.
9	<i>Число Маха. Поняття і типи стисливості середовища. Швидкість звуку.</i> Література: [3], [5], [16-18] Завдання на СРС: Критичне число Маха.
10	<i>Нестислива рідина. Спрощення рівняння Нав'є Стокса за низьких чисел Маха. Моделювання руху газу в рамках механіки нестисливого середовища.</i> Література: [3], [5], [16-18] Завдання на СРС: Рівняння нерозривності за низьких M.
11	<i>Стисливий газ. Моделі стисливого середовища. Система рівнянь, друга в'язкість.</i> Література: [3], [5], [16-18] Завдання на СРС: Рівняння стану.
12	<i>Режими обтікання стисливого газу залежно від числа Маха: дозвукове, транзвукове, надзвукове і т.д. Стрибки ущільнення.</i> Література: [3], [5], [16-18] Завдання на СРС: Фізичні явища, що супроводжують перехід через критичне число Маха, наприклад, Ефект Прандтля — Глоерта
13	<i>Рівняння теплопровідності.</i> Література: [5], [7], [14], [16-18] Завдання на СРС: Види теплообміну.
14	<i>Види теплообміну: теплопровідність, конвекція і випромінювання. Модельні рівняння.</i> Література: [5], [7], [14], [16-18] Завдання на СРС: Стійка і нестійка рівновага при постійному градієнті температур.
15	<i>Рівняння дифузії залежно від видів: конвективна, молекулярна, самодифузія та ін.</i> Література: [5], [7], [16-18] Завдання на СРС: Ефекти стратифікації в полі сили тяжіння. Внутрішні хвилі.
16	<i>Моделювання багатофазних течій. Рівняння збереження.</i>

	Література: [5] , [17], [22] Завдання на СРС: Поверхневий натяг.
17	Контрольна робота
18	<i>Моделювання багатофазних течій. Фазові переходи.</i> Література: [5] , [17], [22] Завдання на СРС: Вільний струмінь.

5.2 Лабораторні заняття

Основні завдання циклу комп'ютерного практикуму: вміння самостійно проводити дослідження фізичних процесів у суцільних середовищах, обирати та реалізовувати наближений метод розв'язання; отримати досвід застосування прийомів та методів чисельного моделювання щодо аналізу практичних задач.

Семестровий (кредитний) модуль Моделювання фізичних процесів – 1 частина

№ з/п	Назва лабораторної роботи
1	Розрахунок нестационарної ламінарної течії в каверні.
2	Розрахунок стаціонарної течії в каналі з уступом.
3-4	Будування неструктурованої 3D розрахункової сітки.
5-6	Будування блочно-структурованої розрахункової сітки.
7	Обробка та візуалізація результатів розрахунку в графічних пакетах.
8	Особливості використання динамічних сіток
9	Залік

Семестровий (кредитний) модуль Моделювання фізичних процесів – 2 частина

№ з/п	Назва лабораторної роботи
1-2	Порівняння моделей турбулентності.
3	Розрахунок процесів теплообміну в кімнаті з підігрівом.
4	Розрахунок вільного струменю води в повітрі.
5-6	Розрахунок течії стисливого газу. Дозвукова і надзвукова течії
7	Розрахунок течій в каналах з заданим градієнтом (тепловий, дифузійний або МГД)
8	Захист розрахункової роботи
9	Залік

6. Самостійна робота студента (СРС)

Семестровий (кредитний) модуль Моделювання фізичних процесів – 1 частина

№ з/п	Назви тем і питань, що виноситься на самостійне опрацювання та посилання на навчальну літературу	Кількість годин СРС
1	<i>Тема 2.1. Можливості, переваги та недоліки існуючих пакетів прикладних програм.</i> Порівняльна характеристика комерційного обчислювального пакету ANSYS та відкритого пакету OpenFOAM Література: [5], [11] Інф. Ресурси: [2], [10]	2
2	<i>Тема 2.2. Високопродуктивні обчислення. Світовий рейтинг TOP500.</i> Найпотужніші суперкомп'ютери в Україні. Література: [5] Інф. Ресурси: [8], [9]	2
3	<i>Тема 2.3. Методи чисельного моделювання.</i> Порівняльна характеристика методів чисельного моделювання. Метод спектральних елементів Література: [4], [6], [13], [15]	2
4	<i>Тема 3.2. Математичне моделювання. Система визначальних рівнянь,</i>	2

	<p><i>початкові та граничні умови.</i> Система рівнянь переносу з урахуванням сили тяжіння, сили Коріоліса, електро-магнітних сил. Література: [2], [3], [7], [12], [14], [16-18]</p>	
5	<p><i>Тема 3.3. Масштаби задачі. Критерії подібності.</i> Дифузійні числа подібності. Література: [3], [7], [16-18]</p>	2
6	<p><i>Тема 4.1. Геометрія. Визначення складових розрахункової області, методи побудови.</i> Поділ на блоки складних геометричних об'єктів Література: [5], [6], [15] Інф. Ресурси: [1], [2]</p>	3
7	<p><i>Тема 4.2. Розрахункова сітка, різновиди й алгоритм дискретизації. Перевірка якості.</i> Метод будови сітки snappyHexMesh у відкритому пакеті OpenFOAM Література: [5], [6], [15] Інф. Ресурси: [1], [2]</p>	3
8	<p><i>Тема 5.1. Дискретизація системи визначальних рівнянь.</i> Дискретизація рівняння теплопровідності. Література: [5-8], [11], [13], [15]</p>	3
9	<p><i>Тема 5.2. Апроксимація конвективних, дифузійних та джерельних членів.</i> TVD-схема підвищеного порядку точності Література: [5-8], [13], [15]</p>	3
10	<p><i>Тема 5.3. Дискретизація граничних умов. Пристінкові модельні функції.</i> Емпіричні функції моделей турбулентності. Література: [7], [19], [20]</p>	2
11	<p><i>Тема 5.4. Методи розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь.</i> Метод спряжених градієнтів для симетричних матриць та біспряжених градієнтів для асиметричних матриць. Література: [4-6], [8], [15]</p>	3
12	<p><i>Тема 5.5. Процедура сумісної корекції полів швидкості та тиску.</i> Порівняння методів SIMPLE та PIMPLE, застосування для нестационарних та стаціонарних задач. Література: [1], [6], [8], [11], [13]</p>	3
13	<p><i>Тема 6.1. Запуск задачі в інтерактивному та пакетному режимі. Контроль збіжності.</i> Статистика розрахунку в пакеті OpenFOAM, число Куранта. Література: [8], [9], [11] Інф. Ресурси: [2], [5], [7]</p>	3
14	<p><i>Тема 6.2. Паралельні розрахунки. Декомпозиція розрахункової області.</i> Команди decomposePar та reconstructPar пакету OpenFOAM, що дозволяють розбивати розрахункову область на декілька процесорів та збирати результати паралельних розрахунків в єдине ціле Література: [5], [8], [9], [11] Інф. Ресурси: [2], [5], [7]</p>	3
15	<p><i>Тема 7.1. Обчислення додаткових фізичних змінних, що не входять в чисельну модель, та інтегральних характеристик.</i> Утіліти розділу postprocessing пакету OpenFOAM Література: [8], [9], [11] Інф. Ресурси: [2], [5-7]</p>	3
16	<p><i>Тема 7.2. Візуалізація результатів розрахунку в графічних пакетах.</i> Можливості графічного пакету Paraview. Література: [10] Інф. Ресурси: [3], [4]</p>	3
17	<p><i>Тема 8.1. Порівняння результатів експериментальних, аналітичних та</i></p>	4

	<i>чисельних досліджень фізичних процесів.</i> Підібрати у доступних літературних джерелах результати досліджень за темою курсової роботи для подальшого порівняння результатів розрахунку. Література: [5], [7], [16-20]	
18	<i>Тема 8.2. Критерії адекватності чисельної моделі та достовірності отриманих результатів розрахунку.</i> Проаналізувати літературні джерела, виявити характеристики, які можна буде порівняти з власними результатами розрахунків за темою курсової роботи. Література: [5], [7], [16-20]	4
19	<i>Підготовка реферату.</i> Матеріал розділів 1-8 Література: [1-20]	10
20	<i>Підготовка до заліку.</i> Матеріал розділів 1-8 Література: [1-20]	6

Семестровий (кредитний) модуль Моделювання фізичних процесів – 2 частина

№ з/п	Назви тем і питань, що виносяться на самостійне опрацювання та посилення на навчальну літературу	Кількість годин СРС
1	<i>Тема 1.1. Стаціонарні течії. Визначення фіктивного часу.</i> Завдання на СРС: Моделювання стаціонарних течій, ітераційні методи, процес збіжності. Література: [3], [12-14], [16-18]	1
2	<i>Тема 1.2. Нестационарні течії.</i> Взаємозалежність числа Струхала і числа Рейнольдса Література: [3], [12-14], [16-18]	1
3	<i>Тема 2.1. Моделювання ламінарних течій. Рівняння Нав'є-Стокса.</i> Течія Пуазейля для в'язкої рідини, вивід рівняння. Література: [3], [12], [16-18]	1
4	<i>Тема 2.2. Моделювання турбулентних течій. Рівняння Рейнольдса (RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes equations).</i> Завдання на СРС: Рівняння Рейнольдса в примежовому шарі. Література: [3], [7], [12-14], [16-20]	2
5	<i>Тема 3.1. Алгебраїчні моделі.</i> Обезрозмірювання за динамічними параметрами, динамічна швидкість, напруги тертя, константа Кармана. Література: [3], [7], [18], [20]	1
6	<i>Тема 3.2. Диференціальні моделі.</i> Безшарова модель Ван-Дриста, $k-\omega$ модель турбулентності. Порівняння моделей турбулентної в'язкості. Література: [3], [5], [7], [18-20]	3
7	<i>Тема 3.3. Метод великих вихорів (LES – Large Eddies Simulation).</i> Порівняння підходів LES і RANS до моделювання тербулентних течій. Література: [5], [21]	3
8	<i>Тема 3.4. Пряме чисельне моделювання (Direct numerical simulation - DNS).</i> Завдання на СРС: Гібридні моделі. Література: [5], [21]	3
9	<i>Тема 3.5. Порівняння моделей турбулентності.</i> Завдання на СРС: Порівняння підходів LES, RANS і DNS до моделювання тербулентних течій. Література: [3], [5], [7], [16-21]	2
10	<i>Тема 4.1. Число Маха.</i> Завдання на СРС: Критичне число Маха. Література: [3], [5], [16-18]	1

11	<i>Тема 4.2. Нестислива рідина.</i> Рівняння нерозривності за низьких чисел Маха. Література: [3], [5], [16-18]	1
12	<i>Тема 4.3. Стисливий газ.</i> Рівняння стану стисливого середовища. Фізичні явища, що супроводжують перехід через критичне число Маха, наприклад, Ефект Прандтля — Глоерта. Література: [3], [5], [16-18]	4
13	<i>Тема 5.1. Рівняння теплопровідності.</i> Стійка і нестійка рівновага при постійному градієнті температур. Література: [5], [7], [14], [16-18]	4
14	<i>Тема 5.2. Рівняння дифузії.</i> Ефекти стратифікації в полі сили тяжіння. Внутрішні хвилі. Література: [5], [7], [16-18]	4
15	<i>Тема 5.3. Моделювання багатофазних течій.</i> Поверхневий натяг. Вільний струмінь Література: [5], [17], [22]	4
16	<i>Підготовка розрахункової роботи.</i> Матеріал розділів 1-5 Література: [1-22]	20
17	<i>Підготовка до контрольної роботи.</i> Матеріал розділів 1-5 Література: [2], [3], [5], [7], [12-14], [16-22]	5
18	<i>Підготовка до заліку.</i> Матеріал розділів 1-5 Література: [1-22]	6

26. Політика та контроль

7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Перелік тем, завдання та терміни виконання

Програмні результати навчання, контрольні заходи та терміни виконання оголошуються студентам на першому занятті.

Семестровий (кредитний) модуль Моделювання фізичних процесів – 1 частина

№ з/п	Тема	Контрольний захід	Термін виконання
1.	Розрахунок нестационарної ламінарної течії в каверні.	Комп'ютерний практикум 1	2-ий тиждень
2.	Розрахунок стаціонарної течії в каналі з уступом	Комп'ютерний практикум 2	4-ий тиждень
3	Будування неструктурованої 3D розрахункової сітки	Комп'ютерний практикум 3	8-ий тиждень
4	Будування блочно-структурованої розрахункової сітки	Комп'ютерний практикум 4	12-ий тиждень
5	Обробка та візуалізація результатів розрахунку в графічних пакетах	Комп'ютерний практикум 5	14-ий тиждень
6.	Особливості використання динамічних сіток	Комп'ютерний практикум 6	16-ий тиждень
7	Розділи 1-8	Реферат	17-ий тиждень
8	Розділи 1-8	Залік	18-ий тиждень

Семестровий (кредитний) модуль Моделювання фізичних процесів – 2 частина

№ з/п	Тема	Контрольний захід	Термін виконання
-------	------	-------------------	------------------

1.	Порівняння моделей турбулентності.	Комп'ютерний практикум 1	4-ий тиждень
2.	Розрахунок процесів теплообміну в кімнаті з підігрівом.	Комп'ютерний практикум 2	6-ий тиждень
3	Розрахунок вільного струменю води в повітрі.	Комп'ютерний практикум 3	8-ий тиждень
4	Розрахунок течії стисливого газу. Дозвукова і надзвукова течії	Комп'ютерний практикум 4	12-ий тиждень
5	Розрахунок течій в каналах з заданим градієнтом (тепловий, дифузійний або МГД)	Комп'ютерний практикум 5	14-ий тиждень
6	Розділи 1-5	Розрахункова робота	16-ий тиждень
7	Розділи 1-5	Модульна контрольна робота	17-ий тиждень
8	Розділи 1-5	Залік	18-ий тиждень

Відвідування занять

Студентам рекомендується відвідувати заняття. Система оцінювання орієнтована на отримання балів за активність студента, а також виконання завдань, які здатні розвинути практичні уміння та навички. Відсутність на лекційних і лабораторних заняттях, без поважних причин штрафується від'ємними балами.

Порушення термінів виконання завдань та заохочувальні бали

Заохочувальні бали		Штрафні бали	
Критерій	Ваговий бал	Критерій	Ваговий бал
Участь в олімпіадах, публікаціях, студентських наукових конференціях, розробці дидактичних матеріалів (за тематикою навчальної дисципліни)	+10 балів	Несвоєчасне виконання контрольної роботи без поважних причин	-3 бали

Пропущені контрольні заходи

Результат модульної контрольної роботи для студента, який не з'явився на контрольний захід, є нульовим. У такому разі, студент має можливість написати модульну контрольну роботу, але максимальний бал за неї буде дорівнювати 50% від загальної кількості балів. Повторне написання модульної контрольної роботи не допускається.

Академічна доброчесність

Політика та принципи академічної доброчесності визначені у розділі 3 Кодексу честі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Детальніше: <https://kpi.ua/code>.

Норми етичної поведінки

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>.

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.

Дистанційне навчання

Дистанційне навчання через проходження онлайн-курсів за певною тематикою допускається за умови погодження зі студентами, але вони повинні виконати всі завдання, які передбачені у навчальній дисципліні. Надаються всі необхідні матеріали, завдання для самостійної роботи з можливістю консультування з викладачем через Google Meet, Zoom, viber, електронну пошту, а також в телефонному режим, подальша їх перевірка та оцінювання.

Передбачено можливість проведення занять дистанційно з використанням платформи Google Meet або Zoom, які дозволяють транслювати презентації лекцій. Крім того, на заняттях з комп'ютерного практикуму студент має можливість слідкувати за ходом виконання робіт і повторювати етапи роботи за викладачем під час прямої трансляції екрану. Захист робіт комп'ютерного практикуму також можна проводити дистанційно в Google Meet або Zoom.

Окрема рейтингова система оцінювання для дистанційного навчання не передбачена.

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

Семестровий (кредитний) модуль Моделювання фізичних процесів – 1 частина

Поточний контроль: роботи комп'ютерного практикуму, реферат

Календарний контроль: атестація проводиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу.

Критерій		Перша атестація	Друга атестація	
Термін атестації		8-ий тиждень	14-ий тиждень	
Умови отримання атестації	Поточний рейтинг	≥ 9 балів	≥ 15 балів	
	Лабораторні роботи	ЛР №1	+	+
		ЛР №2	+	+
		ЛР №3	+	+
		ЛР №4	-	+
ЛР №5	-	+		

Семестровий контроль: залік

Умови допуску до семестрового контролю:

Обов'язкові:

- Реферат
- Виконані всі роботи комп'ютерного практикуму
- **Поточний рейтинг RD ≥ 30 балів.**

Необов'язкові:

- Активність на практичних заняттях.
- Позитивний результат першої атестації та другої атестації.
- Відвідування лекційних занять.

Система рейтингових балів:

1. Комп'ютерний практикум складається з шести робіт. Максимальна кількість балів – 30. За кожен окрему роботу студент отримує:
 - гарна підготовка до роботи за результатами вхідного контролю, самостійне та повне виконання індивідуального завдання по роботі, глибоке розкриття питань під час співбесіди – 5 балів;
 - готовність до роботи, повне і в цілому самостійне виконання індивідуального завдання, розкриття питань під час співбесіди – 4 балів;
 - виконання завдання, частково правильні відповіді під час співбесіди – 1-3 балів;
 - незадовільні результати виконання – 0 балів.
2. Реферат. Максимальна кількість балів – 25.
 - Написання та оформлення реферату. Максимальна кількість балів – 15.
 - Оцінюється структура, послідовність та якість викладеного матеріалу, підбір використаних літературних джерел, а також своєчасність виконання.
 - Захист реферату. Максимальна кількість балів – 10.
 - Оцінюється якість презентації та усної доповіді, ступінь володіння матеріалом, вміння захищати свою думку.

3. Самостійна робота. Виконання додаткових практичних завдань підвищеної складності. Максимальна кількість балів – 15.
4. Штрафні та заохочувальні бали:
 - відсутність на лекції без поважних причин (-0,5 балів). Максимальна кількість балів – -9.
 - відсутність на комп'ютерному практикумі без поважної причини (-0,5 балів). Максимальна кількість балів – -4;
 - несвоєчасне виконання модульної контрольної роботи без поважних причин – -3 бали;
 - участь в олімпіадах, публікаціях, студентських наукових конференціях, розробці дидактичних матеріалів – +10 балів.
5. Залік. Проводиться на останньому за розкладом занятті. Умовою допуску до складання заліку є виконання всіх робіт комп'ютерного практикуму, оформлений і захищений реферат та рейтинг більший за 30 балів. Студенти, які мають попередній рейтинг більший за 60 балів, (у тому числі ті, що не з'явилися на заключне заняття) можуть отримати оцінку «автоматом» відповідно до попередньо набраного рейтингу з дисципліни. Складається з п'яти запитань максимальною кількістю 30 балів.
 - вичерпна відповідь – 26 – 30 балів;
 - відповідь з незначними неточностями – 21-25 балів;
 - неповна відповідь та незначні помилки – 16 – 20 балів;
 - грубі помилки – 5-15
 - незадовільна відповідь – 0 балів.

Розрахунок шкали рейтингу:

$$R_c = 30 + 25 + 15 + 30 = 100 \text{ балів}$$

Семестровий (кредитний) модуль Моделювання фізичних процесів – 2 частина

Поточний контроль: роботи комп'ютерного практикуму, МКР, РР

Календарний контроль: атестація проводиться один раз на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу.

Критерій		Перша атестація	Друга атестація	
Термін атестації		8-ий тиждень	14-ий тиждень	
Умови отримання атестації	Поточний рейтинг	≥ 9 балів	≥ 15 балів	
	Лабораторні роботи	ЛР №1	+	+
		ЛР №2	+	+
		ЛР №3	+	+
		ЛР №4	–	+
		ЛР №5	–	+

Семестровий контроль: залік

Умови допуску до семестрового контролю:

Обов'язкові:

- Модульна контрольна робота
- Розрахункова робота
- Виконані всі роботи комп'ютерного практикуму
- **Поточний рейтинг $RD \geq 30$ балів.**

Необов'язкові:

- Активність на практичних заняттях.
- Позитивний результат атестації.
- Відвідування лекційних занять.

Система рейтингових балів:

1. Комп'ютерний практикум складається з п'яти робіт. Максимальна кількість балів – 20. За кожну окрему роботу студент отримує:
 - гарна підготовка до роботи за результатами вхідного контролю, самостійне та повне виконання індивідуального завдання по роботі, глибоке розкриття питань під час співбесіди – 4 балів;

- готовність до роботи, повне і в цілому самостійне виконання індивідуального завдання, розкриття питань під час співбесіди – 3 балів;
 - виконання індивідуального завдання, частково правильні відповіді під час співбесіди – 1-2 балів;
 - незадовільні результати виконання – 0 балів.
2. Контрольна робота. Максимальна кількість балів – 15.
 - вичерпна відповідь – 13 – 15 балів;
 - відповідь з незначними неточностями – 10-12 балів;
 - неповна відповідь та незначні помилки – 7 – 9 балів;
 - грубі помилки – 4-6
 - незадовільна відповідь – 0 балів.
 3. Розрахункова робота. Максимальна кількість балів – 25.
 - Стартова складова. Максимальна кількість балів – 15.

Оцінюється ступінь обґрунтування вибору математичної моделі поставленої задачі, правильність методів чисельного моделювання та організації розрахунків, якісний та кількісний аналіз результатів, а також своєчасність виконання.
 - Захист. Максимальна кількість балів – 10.

Оцінюється якість усної доповіді, ступінь володіння матеріалом, повнота аналізу отриманих результатів розрахунку, вміння захищати свою думку.
 4. Самостійна робота. Виконання додаткових практичних завдань підвищеної складності. Максимальна кількість балів – 10.
 5. Штрафні та заохочувальні бали:
 - відсутність на лекції без поважних причин (-0,5 балів). Максимальна кількість балів – -9.
 - відсутність на комп'ютерному практикумі без поважної причини (-0,5 балів). Максимальна кількість балів – -4;
 - несвоєчасне виконання контрольної роботи без поважних причин – -3 бали;
 - участь в олімпіадах, публікаціях, студентських наукових конференціях, розробці дидактичних матеріалів – +10 балів.
 6. Залік. Проводиться на останньому за розкладом занятті. Умовою допуску до складання заліку є виконання всіх робіт комп'ютерного практикуму, модульна контрольна робота, розрахункова робота та рейтинг більший за 30 балів. Студенти, які мають попередній рейтинг більший за 60 балів, (у тому числі ті, що не з'явилися на заключне заняття) можуть отримати оцінку «автоматом» відповідно до попередньо набраного рейтингу з дисципліни. Складається з п'яти запитань максимальною кількістю 30 балів.
 - вичерпна відповідь – 26 – 30 балів;
 - відповідь з незначними неточностями – 21-25 балів;
 - неповна відповідь та незначні помилки – 16 – 20 балів;
 - грубі помилки – 5-15
 - незадовільна відповідь – 0 балів.

Розрахунок шкали рейтингу:
 $R_c = 20 + 15 + 25 + 10 + 30 = 100$ балів

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою:

<i>Кількість балів</i>	<i>Оцінка</i>
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

9. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)

Семестровий (кредитний) модуль Моделювання фізичних процесів – 1 частина
Орієнтовний перелік тем рефератів:

- Паралельні обчислення.
- Класифікація електронних обчислювальних машин.
- Еволюція електронних обчислювальних машин.
- Найсучасніші суперкомп'ютери світу.
- Високопродуктивні обчислення в Україні.
- Сучасні обчислювальні пакети.
- Класифікація розрахункових сіток.
- Метод скінченних різниць.
- Метод скінченних елементів.
- Метод скінченних об'ємів.
- Критерії адекватності чисельної моделі та достовірності отриманих результатів розрахунку.

Студент може самостійно обрати тему реферату з нижче представленою списку або запропонувати свою.

Питання до заліку:

- Метод скінченних різниць.
- Метод скінченних елементів. Приклади елементів.
- Метод скінченних об'ємів.
- Математичне моделювання процесів переносу в суцільному середовищі.
- Подібність процесів переносу. Порівняння гідродинамічних, теплових та дифузійних критеріїв подібності.
- Масштабний аналіз задачі.
- Пакети прикладних програм. Порівняння.
- Класифікація електронних обчислювальних машин. Етапи розвитку комп'ютерної техніки.
- Поняття суперкомп'ютеру, типова структура, характеристики. Рейтинг TOP-500.
- Високопродуктивні обчислення в Україні.
- Які розрахункові сітки придатні для розрахунків в OpenFOAM.
- Побудова неструктурованої та структурованої розрахункової сітки в SALOME.
- Параметризація та контроль якості геометрії в SALOME. Перевірка геометрії на можливість будівництва в ній структурованої гексаєдральної сітки.
- Побудова розрахункової сітки за допомогою утиліти blockMesh.
- Побудова розрахункової сітки за допомогою утиліти snappyHexMesh.
- Одиниці виміру величин, що використовуює в OpenFOAM для розрахунку. Масштабування сітки під параметри задачі.
- Розв'язок плоскої та вісесиметричної методом скінчених об'ємів.
- Часові параметри параметри в OpenFOAM. Стаціонарна та нестаціонарна задачі. Як крок за часом залежить від параметрів задачі.
- Схеми дискретизації визначальних рівнянь. Порядок точності скінчено-різницевої схеми. Стійкість різницевої схем.
- Алгоритми зв'язку поля тиску та швидкості.
- Алгоритми розв'язку систем лінійних алгебраїчних рівнянь в OpenFOAM.
- Часові параметри в OpenFOAM. Стаціонарна та нестаціонарна задачі.
- Схеми дискретизації визначальних рівнянь. Порядок точності скінчено-різницевої схеми. Стійкість різницевої схем.
- Алгоритми зв'язку поля тиску та швидкості.
- Алгоритми розв'язку систем лінійних алгебраїчних рівнянь в OpenFOAM.
- Обробка результатів розрахунку в OpenFOAM. Як пакет OpenFOAM взаємодіє з іншими пакетами прикладних програм.
- Паралельні обчислення. «speed factor».
- Обробка результатів розрахунку в OpenFOAM. Як пакет OpenFOAM взаємодіє з іншими пакетами прикладних програм.
- Поняття, елементи та класифікація розрахункових сіток.
- Які розрахункові сітки придатні для розрахунків в OpenFOAM.
- Побудова неструктурованої та структурованої розрахункової сітки в SALOME. Етапи, алгоритми та гіпотези розбиття

- Параметризація та контроль якості геометрії в SALOME. Перевірка геометрії на можливість будування в ній структурованої гексаєдральної сітки.
- Побудова розрахункової сітки за допомогою утиліти blockMesh та snappyHexMesh. Як задати розмір комірки, згущення сітки
- Одиниці виміру величин, що використовуює в OpenFOAM для розрахунку. Масштабування сітки під параметри задачі.

Семестровий (кредитний) модуль Моделювання фізичних процесів – 2 частина

Завдання МКР відповідають наступним питанням:

- Режими течії. Порівняльна характеристика.
- Число Рейнольдса як характеристика течії
- Режими течії. Залежність характеристик турбулентної течії від часу.
- Ламінарна течія.
- Рівняння Рейнольдса. Фізичний зміст його складових.
- Тензор напруг. Його складові.
- Рівняння переносу напруг Рейнольдса, його складові.
- Моделі турбулентності. Класифікація.
- Масштаби турбулентності.
- Припущення Бусінеска. Коефіцієнт турбулентної в'язкості.
- Переваги та недоліки RANS моделей турбулентності.
- Алгебраїчні моделі турбулентності.
- k-ε модель турбулентності.
- Моделювання великих вихорів (LES).
- Моделювання стисливості середовища. Число Маха
- Моделювання тепломасопереносу.
- Моделювання багатofазних течій.

Орієнтовний перелік тем розрахункової роботи:

- Моделювання поверхневої течії вздовж площини.
- Моделювання нестационарного обтікання круглого циліндру.
- Моделювання плоскої течії в житловому кварталі при різних режимах.
- Моделювання нестационарної течії нестисливого середовища через систему перешкод.
- Моделювання течії в плоскому каналі складної форми при різних режимах.
- Моделювання обтікання тривимірної лопаті вітрогенератора.
- Моделювання нестационарної плоскої течії навколо прямокутного тіла.
- Моделювання течії навколо клину при різних режимах.
- Моделювання плоскої течії в каверні при різних режимах.
- Моделювання затопленого струменю в плоскому каналі при різних числах Re і Pr .
- Моделювання течії в плоскому каналі складної форми з розгалуженням.
- Моделювання течії в плоскому каналі з поворотом при різних режимах.
- Моделювання тривимірного вільного струменю, що витікає зі складної системи.
- Моделювання конвективного теплопереносу у вихровій течії нестисливої рідини.
- Моделювання турбулентної течії в неізотермічному потоці.
- Моделювання процесів горіння складних систем.
- Моделювання двофазної течії в каналі без урахування фазових переходів.
- Моделювання двофазної течії з урахуванням фазового переходу вода-пара.
- Моделювання процесу кипіння в замкненому просторі.
- Моделювання конвективного теплопереносу в стисливому середовищі.

Студент може самостійно обрати тему розрахункової роботи з представленого списку або запропонувати свою. Також вітається виконання розрахункової роботи за темою, що пов'язана з бакалаврською кваліфікаційною роботою.

Питання до заліку:

- Режими течії. Порівняльна характеристика.
- Число Рейнольдса як характеристика течії
- Режими течії. Залежність характеристик турбулентної течії від часу.

- Ламінарна течія.
- Рівняння Рейнольдса. Фізичний зміст його складових.
- Тензор напруг. Його складові.
- Рівняння переносу напруг Рейнольдса, його складові.
- Моделі турбулентності. Класифікація.
- Порівняння RANS, LES і DNS підходів до моделювання турбулентності.
- Турбулентний примежовий шар.
- Масштаби турбулентності.
- Баланс турбулентної енергії.
- Припущення Бусінеска. Коефіцієнт турбулентної в'язкості.
- Переваги та недоліки RANS моделей турбулентності.
- Алгебраїчні моделі турбулентності.
- k-ε модель турбулентності.
- Моделювання великих вихорів (LES).
- Фільтри LES моделі.
- Спільні та відмінні характеристики модельних рівнянь RANS і LES.
- Переваги та недоліки метода DNS.
- Порівняння LES і DNS методів моделювання турбулентних течій.
- Гібридні моделі турбулентності.
- Моделювання стисливості середовища. Число Маха
- Дозвукова течія. Умови використання моделі нестисливого середовища.
- Надзвукова течія. Стрибки ущільнення.
- Моделювання тепломасопереносу. Види теплообміну.
- Ефекти стратифікації або конвекції.
- Моделювання багатофазних течій.

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

Складено:

ас., к.ф.-м.н, Димитрієва Наталія Федорівна

Ухвалено кафедрою Фізики енергетичних систем (протокол № 2 від 04.09.2020)

Затверджено Вченою радою Фізико-технічного інституту (протокол №7/1 від 07.09.2020)