

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

Кафедра Конструкції авіаційних двигунів (№ 203)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант освітньої програми

 Олександр БІЛОГУБ
(підпис) (ім'я та прізвище)

« 30 » 08 2023 р.

**РОБОЧА ПРОГРАМА ВИБІРКОВОЇ
НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**

КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ СИСТЕМИ ПРОЄКТУВАННЯ

(назва навчальної дисципліни)

**MAJOR Проєктування авіаційних двигунів та енергетичних установок.
Дисципліна 2**

Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»
(шифр і найменування галузі знань)

Спеціальність: 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка»
(код і найменування спеціальності)

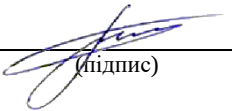
Освітня програма: Авіаційні двигуни та енергетичні установки (ОПП, ОНП)
(найменування освітньої програми)

Форма навчання: денна

Рівень вищої освіти: Другий (магістерський)
(рівень освіти)

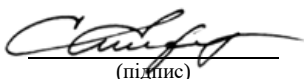
Харків 2023

Розробник Марценюк Євген Вікторович, ст. викл. каф. 203
(прізвище та ініціали, посада, науковий ступінь і вчене звання)


(підпис)

Робочу програму розглянуто на засіданні кафедри
Конструкції авіаційних двигунів (№ 203)
(назва кафедри)

Протокол № 1 від « 28 » серпня 2023.

Завідувач кафедри д.т.н., професор  Сергій ЄПІФАНОВ
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ім'я та прізвище)

1. Опис навчальної дисципліни

Найменування показника	Галузь знань, спеціальність, освітня програма, рівень вищої освіти	Характеристика навчальної дисципліни (денна форма навчання)
Кількість кредитів – 3	Галузь знань: 13 <u>«Механічна інженерія»</u> (шифр і назва)	Вибіркова (MAJOR 2)
Кількість модулів – 1	Спеціальність: 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка» <u> </u>	

Співвідношення кількості годин аудиторних занять до самостійної роботи становить 32 / 58

* Аудиторне навантаження може бути зменшене або збільшене на одну годину в залежності від розкладу занять.

2. Мета та завдання навчальної дисципліни

Мета: придбання знань та умінь, необхідних для виконання інженерних розрахунків основних деталей авіаційного газотурбінного двигуна в програмному пакеті ANSYS.

Завдання: вивчення особливостей виконання інженерних розрахунків в програмному комплексі ANSYS.

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

Загальні компетентності: ЗК1 – здатність до абстрактного мислення, аналізу і синтезу. ЗК2 – здатність виявляти, ставити та вирішувати проблеми. ЗК3 – здатність проводити дослідження на відповідному рівні. ЗК4 – здатність генерувати нові ідеї (креативність). ЗК8 – здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями.

Спеціальні (фахові) компетентності: ФК2 – Здатність критично осмислювати проблеми авіаційної та/або ракетно-космічної техніки, у тому числі на межі із суміжними галузями, інженерними науками, фізикою, хімією, екологією, економікою.

Програмні результати навчання: РН5 – використовувати новітнє спеціалізоване програмне забезпечення для розв'язання складних задач у професійній (науково-технічній) діяльності відповідно до освітньої програми. РН6 – приймати ефективні рішення при виникненні нестандартних складних задач у професійній (науково-технічній) діяльності в умовах невизначеності вимог, наявності спектра думок та обмеженості часу. РН9 – обґрунтовано призначати клас матеріалів для елементів та систем авіаційної та ракетно-космічної техніки, обирати і застосовувати ефективні методи модифікації їх властивостей. ПРН16 – розраховувати напружено-деформований стан, визначати несійну здатність конструктивних елементів та надійність систем авіаційної та ракетно-космічної техніки з використанням спеціалізованого програмного забезпечення, яке використовується в галузі. ПРН17 – використовувати на практиці сучасні методи та засоби проектування, виробництва, випробування, ремонту та (або) сертифікації систем авіаційної та ракетно-космічної техніки.

Пре-реквізити: Вища математика, Фізика, Теоретична механіка, Термодинаміка і теплообмін, Інженерна та комп'ютерна графіка, Комп'ютерні технології проектування, Конструкція і динаміка АД і ЕУ.

Ко-реквізити: Системи охолодження елементів АД і ЕУ, Ресурсне проектування і випробування авіаційних двигунів і енергетичних установок.

3. Програма навчальної дисципліни

Модуль 1

Змістовий модуль 1

ЧИСЕЛЬНІ МЕТОДИ В ІНЖЕНЕРНИХ РОЗРАХУНКАХ

ТЕМА 1. Історія розвитку САЕ систем. Стисла характеристика систем-лідерів: їх основні переваги і недоліки. Місце студійованої САЕ системи та її можливості.

ТЕМА 2. Роль числових методів в розрахунках на міцність. Основні етапи числового дослідження міцності конструкції. Ідея і галузь застосування метода кінцевих елементів (МКЕ). Основні етапи практичної реалізації. Типи кінцевих елементів.

ТЕМА 3. Етапи створення кінцево-елементної сітки. Призначення атрибутів об'єктам твердотільної моделі. Керування щільністю сітки. Методи створення кінцево-елементних сіток.

ТЕМА 4. Аналітичне розв'язання задач розрахунку балок на міцність: методика постановки, розв'язання задач та аналізу результатів в програмному комплексі ANSYS. Лінійні та нелінійні постановки задач.

ТЕМА 5. Випробування матеріалів: діаграма “напруження-деформації”. Типи нелінійності в задачах розрахунків на міцність. Алгоритм нелінійного аналізу, його ладнання.

ТЕМА 6. Типи граничних умов в теплових задачах. Задання граничних умов і умов теплового контакту. Стаціонарні і нестаціонарні задачі теплопровідності. Формування функціональних залежностей теплофізичних характеристик матеріалів від температури.

ТЕМА 7. Особливості розрахунку дисків компресорів і турбін на міцність. Методика виконання розрахунку тепло напруженого стану деталі. Плоска постановка задачі. Особливості задання граничних умов на поверхні диска турбіни.

ТЕМА 8. Власні та вимушені коливання. Методика розрахунку власних форм і частот коливань на прикладі робочих лопаток. Частотна діаграма.

ТЕМА 9. Розрахунок зовнішнього корпусу камери згоряння на міцність. Характеристика задач стійкості. Місцева стійкість тонкостінних конструкцій. Розрахунок внутрішнього корпусу камери згоряння на стійкість.

ТЕМА 10. Методика постановки і рішення контактних задач. Загальна характеристика задач динаміки. Параметри динамічних розрахунків. Динамічне застосування навантаження. Спектральний відгук у разі ударного навантаження.

4. Структура навчальної дисципліни

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин				
	денна форма				
	усього	у тому числі			
		л	п	лаб	с.р.
1	2	3	4	5	6
Модуль 1					
Змістовий модуль 1 (ЧИСЕЛЬНІ МЕТОДИ В ІНЖЕНЕРНИХ РОЗРАХУНКАХ)					
ТЕМА 1. Загальні відомості про САЕ системи	3	1	-	-	2
ТЕМА 2. Основні положення методу кінцевих елементів	4	2	-	-	2
ТЕМА 3. Створення кінцеве-елементної сітки	5	1	-	-	4
ТЕМА 4. Розрахунок балок та рам на міцність	10	2	2	-	6
ТЕМА 5. Особливості рішення нелінійних задач	12	4	-	-	8
ТЕМА 6. Задачі поширення тепла	11	2	1	-	8
ТЕМА 7. Розрахунок дисків компресорів і турбін на міцність	14	2	4	-	8
ТЕМА 8. Частотний аналіз робочих лопаток ГТД	9	2	1	-	6
ТЕМА 9. Розрахунок корпусів камер згоряння на міцність та втрату стійкості	5	1	-	-	4
ТЕМА 10. Контактні задачі. Аналіз динаміки конструкції	16	6	-	-	10
Модульний контроль	1	1	-	-	-
Разом за змістовим модулем 1	90	24	8	0	58
Усього годин	90	24	8	-	58

5. Теми семінарських занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1		0
	Разом	0

6. Теми практичних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
Модуль 1		
Змістовий модуль 1 (ЧИСЕЛЬНІ МЕТОДИ В ІНЖЕНЕРНИХ РОЗРАХУНКАХ)		
1	Розрахунок балок з використанням бібліотеки сортаменту	1
2	Розрахунок рам з сортаментом користувача	1
3	Стаціонарні та нестаціонарні задачі теплопровідності	1
4	Розрахунок напружено-деформованого стану диска компресора, враховуючи його циклічну симетрію	2
5	Розрахунок термонапруженого стану диска турбіни ГТД з урахуванням умов його кріплення до валу	2
6	Частотний аналіз лопатки компресора	1
	Разом	8

7. Теми лабораторних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1		0
	Разом	0

8. Самостійна робота

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
Модуль 1		
Змістовий модуль 1 (ЧИСЕЛЬНІ МЕТОДИ В ІНЖЕНЕРНИХ РОЗРАХУНКАХ)		
1	Основні положення метода кінцевих елементів	2
2	Графічний інтерфейс, командний рядок програмного комплексу ANSYS	2
3	Створення кінцеве-елементної сітки	4
4	Методика роботи з програмою. Рішення основних інженерних задач (міцності, теплопровідності, визначення частот власних коливань та ін.)	44
5	Розрахунок термонапруженого стану диска турбіни високого тиску	6
	Разом	58

9. Індивідуальне завдання

Немає.

10. Методи навчання

Основні форми навчання:

- лекційна;
- практичні роботи;
- самостійна робота студента;
- іспит.

На лекціях студентів даються основні поняття, основи теорії, закономірності, необхідні для підготовки до практичних занять, виконання самостійної роботи.

Лекція, розв'язує тільки одну дидактичну задачу – дає первісне знайомство з темою, організовує первісне сприйняття матеріалу, формулює основні проблеми.

Проведення практичних занять базується на індивідуальному виконанні студентами розрахунків деталей газотурбінних двигунів на міцність, теплових розрахунків та ін. с подальшим аналізом і поясненням отриманих результатів.

Основною формою навчання є самостійна робота. До неї не можна приступати без певного багажу знань, які даються на лекції. Під час самостійної роботи студенті поглиблено вивчають лекційний матеріал, готуються до проведення практичних робіт.

11. Методи контролю

11.1. Тестування

Матеріал дисципліни складається з одного змістового модуля:

1. Чисельні методи в інженерних розрахунках.

Складання модуля – на 17-му тижні 1-го семестру (один раз).

До складання модулів студент допускається за умови виконання всіх видів обов'язкових робіт, передбачених у модулях.

Оформлення практичних робіт – *електронний звіт*, захист – *усно*.

Семестр 1 – *іспит*.

11.2. Питання для контролю та самостійної роботи студентів

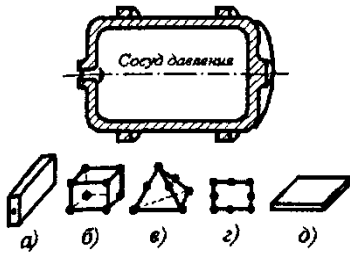
Модуль 1

Змістовий модуль 1

1. Чим зумовлена необхідність появи метода кінцевих елементів?
2. Основні поняття та принципи метода кінцевих елементів.
3. Етапи вирішення задач з допомогою МКЕ.
4. Порівняльний аналіз програм-лідерів за колом задач, границь застосування і т. ін..
5. Перелік задач, що можуть бути вирішені за допомогою програмного комплексу ANSYS: вихідні дані та отримані результати.
6. Структура інтерфейса ANSYS та загальна характеристика меню.
7. Робота з командним файлом.
8. Перелік та властивості геометричних примітивів.
9. Типи кінцевих елементів: призначення точок, балок та оболонки.
10. Особливості елементів, що застосовуються для моделювання вісесиметричних задач.
11. Різниця між елементами першого та другого порядку.
12. Поняття системи координат: різні типи і їх призначення (для побудови складної геометрії, закріплень, навантаження).
13. Особливості побудови сітки: основні характеристики якісно побудованої сітки; «вільна» і впорядкована сітка.
14. Процес побудови сітки: контрольований користувачем, та автоматичний. Переваги та недоліки різних підходів.
15. Який вплив має орієнтованість сторін елементів на точність рішення?
16. Чим зумовлені похибки інтерполяції результатів чисельного рішення: різниця між повузовим і по-елементним наведенням результатів (на прикладі напружено-деформованого стану конструкції).
17. Розглядається наступний розрахунковий випадок: в одній і тій самій моделі одночасно присутні елементи першого та другого порядків. Чи є можливим такий варіант з точки зору МКЕ? Поясніть, чому, та наведіть приклад.

18. Розглядається наступний розрахунковий випадок: в одній і тій самій моделі одночасно присутні лінійні, балочні й поверхневі (оболонкові) елементи. Чи є можливим такий варіант з точки зору МКЕ? Поясніть, чому, та наведіть приклад.

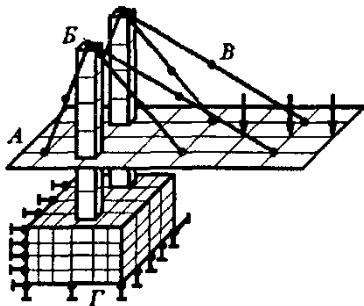
19. Який із перерахованих елементів є найбільш вдалим для моделювання симетричної тонкостінної ємності під тиском – дивись рисунок.



- а) балочний елемент;
- б) тримірний гексагональний елемент;
- в) тримірний тетрадральний елемент;
- г) 8-ми вузловий прямокутний двомірний елемент;
- е) поверхневий (оболонковий) елемент?

Поясніть свій вибір.

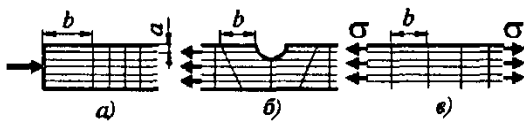
20. На разі статичного аналізу конструкції моста збільшення кількості яких із застосованих елементів може максимально підвищити точність результатів (дивись рисунок):



- А – оболонкових;
- Б – балочних;
- В – стрижневих;
- Г) тримірних?

Поясніть, чому.

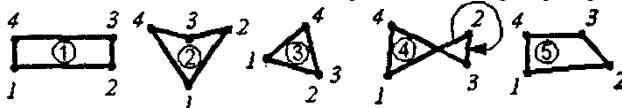
21. У якій із наведених схем можливе застосування «довгих» елементів ($b/a > 2$):



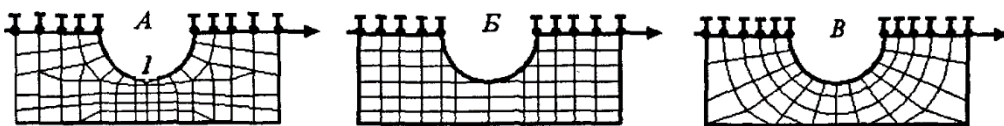
- а) на границі дії сили та/або граничних умов;
- б) у зонах концентрації напружень;
- в) в зоні постійних напружень;
- г) застосування таких елементів завжди призводить до помилок?

Поясніть, чому.

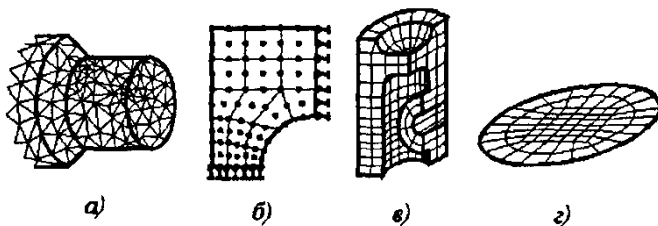
22. Які з елементів 1...5, зображених на рисунку, не є вірними? Чому?



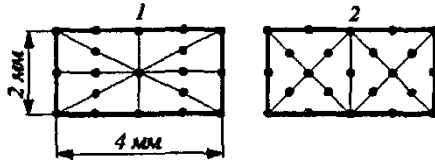
23. Яка з наведених на рисунку сіток А...В не є раціональною? Поясніть, чому.



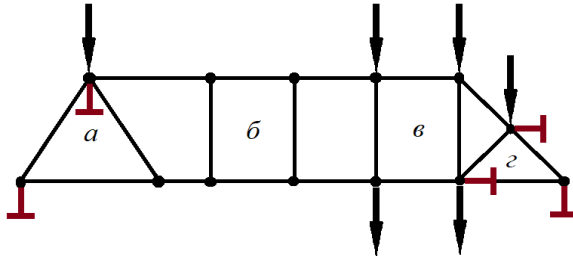
24. Які з наведених схем а...г відповідають довільній сітці, а які – впорядкованій? Поясніть, чому.



25. Яка з двох схем є переважною з точки зору точності результатів?



26. В якому з елементів $a \dots g$ граничні умови застосовано не вірно? Поясніть, чому і наведіть вірний варіант.



27. Призначення властивостей матеріалу, побудова залежностей одних властивостей від інших (наприклад, теплопровідності від температури, напруження від деформації і т. ін.).

28. Розглядається наступний розрахунковий випадок: в моделі присутні елементи з нульовою жорсткістю ($E=0$). Чи є можливим такий варіант з точки зору МКЕ? Поясніть, чому та наведіть приклад

29. Розглядається наступний розрахунковий випадок: в моделі присутні елементи з нескінченною жорсткістю ($E=\infty$). Чи є можливим такий варіант з точки зору МКЕ? Поясніть, чому та наведіть приклад

30. Типи навантажень: локальні, розподілені, об'ємні, теплові, механічні і т. ін..

31. Способи призначення навантажень і закріплень: до примітивів кінцеве-елементної моделі (вузлів та елементів) або до геометричних примітивів (точок, ліній, поверхонь, об'ємів).

32. Що може спричинити нелінійність розрахункової моделі?

33. Особливості та порядок виконання розрахунку напружено-деформованого стану конструкції.

34. Особливості та порядок виконання розрахунку теплового стану конструкції.

35. Особливості та порядок виконання частотного аналізу конструкції.

36. Особливості та порядок виконання нелінійного аналізу конструкції.

37. Особливості та порядок розрахунку контактної задачі.

38. Особливості та порядок розрахунку конструкції на втрату стійкості.

39. Використання результатів попередньо виконаного розрахунку, як навантажень у поточному аналізі.

40. Поняття ортотропії та анізотропії. Завдання властивостей подібних матеріалів.

12. Критерії оцінювання та розподіл балів, які отримують студенти

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

Складові навчальної роботи	Бали за одне заняття (завдання)	Кількість занять (завдань)	Сумарна кількість балів
Модуль 1			
Змістовний модуль 1			
Робота на лекціях	2,5...4	12	30...48
Виконання і захист лабораторних (практичних) робіт	1,5...3	4	6...12
Модульний контроль	24...40	1	24...40
Усього за семестр 1			60...100

Семестровий контроль (іспит) проводиться у разі відмови студента від балів поточного тестування й за наявності допуску до іспиту. Допуск до іспиті надається за умов відпрацювання та здачі усіх практичних робіт.

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

Білет для іспиту складається з трьох теоретичних запитань та одного практичного завдання. Питання по білетах розподілені таким чином:

12.2. Розподіл питань у білетах іспиту

Семестр	1-й
Тип контролю	Іспит
Теоретичні питання (<i>перше, друге, третє</i>)	Змістовий модуль 1
Четверте питання	Тематика практичних занять

Максимальна кількість балів за кожне теоретичне питання – 20, за практичне завдання – 40.

12.3. Якісні критерії оцінювання

Для одержання позитивної оцінки студент повинен

знати:

- основи методу кінцевих елементів;
- рекомендації щодо побудови якісної сітки кінцевих елементів;
- основні правила обмеження ступенів свободи та/або навантаження розрахункової моделі;
- принципи та порядок виконання різних типів інженерних розрахунків методом кінцевих елементів в програмному пакеті ANSYS;

вміти:

- створювати розрахункові моделі деталей і вузлів АД та ЕУ на базі балочних, оболонкових, тримірних елементів або їх комбінації для виконання інженерних розрахунків у програмному пакеті ANSYS;
- виконувати розрахунки двовимірного та тривимірного температурного та напруженого стану деталей із використанням відповідних програмних засобів;
- проводити частотний аналіз конструкції та аналіз на втрату стійкості;
- виконувати критичний аналіз отриманих результатів щодо їх достовірності, тобто теорії або реального фізичного експерименту;
- самостійно визначати в складній конструкції зони «інтересу» для проведення подальшого аналізу відповідно до поставленої задачі;
- виконувати порівняльну оцінку існуючих конструкцій, пропонувати шляхи їх вдосконалення за результатами виконаних розрахунків.

12.4. Критерії оцінювання роботи студента протягом семестру

Задовільно (60-74). Мати необхідний мінімум знань та умінь. Відпрацювати та захистити всі практичні заняття. Виконати та захистити індивідуальне завдання (курсний проєкт). Здати модульне тестування з позитивною оцінкою. Знати, які типи інженерних задач можуть бути вирішені програмними продуктами на базі методу кінцевих елементів. Знати основну ідею методу кінцевих елементів. Розуміти різницю між елементами та вузлами. Орієнтуватися у інтерфейсі програмного продукту ANSYS та вміти пояснити, для чого призначені різні вікна та різні процесори програми. Бути спроможним виконувати прості міцнісні та теплові розрахунки окремих деталей типу балка або пластина за допомогою рекомендацій з навчальних посібників.

Добре (75-89). Твердо опанувати мінімум знань та вмінь. Відпрацювати та захистити всі практичні заняття. Виконати та добре захистити індивідуальне завдання. Здати модульне тестування з позитивною оцінкою. Знати хто або що сприяв розвиненню метода кінцевих елементів. Знати чим відрізняються елементи першого та другого порядків. Вміти самостійно налагоджувати прості моделі (типу балки, пластини тощо) до виконання усіх типів стаціонарних розрахунків, розглянутих у змістових модулях. Бути спроможним надавати оцінку вірності отриманих результатів – чи не протирічають вони теорії. Знати, що призводить до появи помилок у результатах розрахунків та розуміти їхнє чисельне співвідношення.

Відмінно (90-100). Відпрацювати та захистити всі лабораторні та практичні роботи. Виконати та добре або відмінно захистити індивідуальне завдання. Здати модульне тестування з відмінною оцінкою (припускається здати один з двох модулів з оцінкою «добре» і кількістю балів не менше 80). Повно знати основний та додатковий матеріал. Вміти робити вибір між елементами першого та другого порядків в залежності від отриманої задачі. Вміти самостійно налагоджувати складні моделі, у тому числі і складових вузлів з декількох окремих деталей, до виконання усіх типів стаціонарних та нестаціонарних розрахунків, розглянутих у змістових модулях. Розуміти різницю між окремими типами контактних граничних умов і вміти налагоджувати їх властивості. Вміти пояснювати та аналізувати отримані результати, розрізняти у них механічні та методологічні помилки підготовки розрахункової моделі. Пояснювати фізику симульованих процесів та пропонувати заходи з оптимізації моделі щодо її «полегшення», тобто зменшення часу на підготовку та розрахункового часу, а також щодо підвищення точності результатів симулювання.

Шкала оцінювання: національна та ECTS

Сума балів за всі види навчальної діяльності	Оцінка за національною шкалою	
	Для іспиту	Для заліку
90-100	Відмінно	Зараховано
75-89	Добре	
60-74	Задовільно	
01-59	Незадовільно	Не зараховано

13. Методичне забезпечення

1. <https://mentor.khai.edu/course/view.php?id=2785>.
2. Моделювання нестационарного термонапруженого стану елементів ГТД [Текст] : навч. посіб. до курс. та дипл. проєктування / Є. В. Марценюк. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2022. – 88 с.
(http://library.khai.edu/library/fulltexts/metod/Marcenuk_Modeluvanna.pdf)
3. Методичні розробки каф. 203 з методиками розрахунків та варіантами завдань.

14. Рекомендована література

Базова

1. ANSYS Mechanical User's Guide.

Допоміжна

2. Опір матеріалів: підручник / Г. С. Писаренко, О. Л. Квітка, Е. С. Уманський [та інші]. – 2-ге вид., допов. і переробл. – К. : Вища шк., 2004. – 655 с.

15. Інформаційні ресурси

1. Розрахункові та контрольні програми ПЕОМ: ANSYS STUDENT (<https://www.ansys.com/academic/students/ansys-student>).
2. Файли та інтернет ресурси довідкової системи програмного комплексу ANSYS.