

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



## РОБОЧА ПРОГРАМА ВИБІРКОВОЇ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

### Моделювання та розрахунок процесів в АРКТ

(назва навчальної дисципліни)

Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»

(шифр і найменування галузі знань)

Спеціальність: 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка»

(код і найменування спеціальності)

Освітньо-наукова програма: «Авіаційна та ракетно-космічна техніка»

(найменування освітньої програми)

Форма навчання: денна

Рівень вищої освіти: третій (освітньо-науковий)

Харків 2020 рік

Робоча програма «Моделювання та розрахунок процесів в АРКТ»

(назва дисципліни)

для здобувачів за спеціальністю 134, Авіаційна та ракетно-космічна техніка  
освітньої програми Авіаційна та ракетно-космічна техніка

Розробник: доцент каф. 101, к.т.н.

(освітній науковий ступінь і вчене звання)



(підпис)

Брега Д.А.

(прізвище та ініціали)

Гарант ОНП професор каф. 103, д.т.н., професор



(підпис)

Малков І.В.

(прізвище та ініціали)

Протокол № 20/21-01 від «28» серпня 2020 р. засідання кафедри №101

Завідувач кафедри к.т.н.

(науковий ступінь і вчене звання)



(підпис)

С. М. Єрьоменко

(ініціали та прізвище)

ПОГОДЖЕНО:

Завідувач відділу  
аспірантури і докторантури



В.Б. Селевко

Голова наукового товариства  
студентів, аспірантів,  
докторантів і молодих вчених



Г.П. Старовойт

## 1. Опис навчальної дисципліни

Найменування показника	Галузь знань, спеціальність, освітня програма, рівень вищої освіти	Характеристика навчальної дисципліни (денна форма навчання)
Кількість кредитів – 5	<p style="text-align: center;"><b>Галузь знань</b> 13 «Механічна інженерія» (шифр і найменування)</p> <p style="text-align: center;"><b>Спеціальність</b> 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка» (код і найменування)</p> <p style="text-align: center;"><b>Освітньо-наукова програма</b> «Авіаційна та ракетно-космічна техніка» (найменування)</p> <p style="text-align: center;"><b>Рівень вищої освіти:</b> <u>третій (освітньо-науковий)</u></p>	Вибіркова
Кількість модулів – 1		<b>Навчальний рік</b>
Кількість змістовних модулів – 2		2020/2021
Індивід. завдання: немає		<b>Семестр</b>
Загальна кількість годин – 80/150		2-й
		<b>Лекції*</b>
Кількість тижневих годин для денної форми навчання: аудиторних – 5 самостійної роботи аспіранта – 4,4		48 годин
		<b>Практичні, семінарські*</b>
		32 години
		<b>Лабораторні*</b>
		-
		<b>Самостійна робота</b>
		70 годин
	<b>Індивідуальні завдання</b>	
	-	
	<b>Вид контролю</b>	
	диф. залік	

## 2. Мета та завдання навчальної дисципліни

**Мета вивчення:** отримання сукупності навичок щодо професійної інженерної діяльності в галузі проектування, виробництва та експлуатації АРКТ шляхом використання сучасних числових методів дослідження та розв'язання задач предметної області, що насамперед полягають у створенні математичного апарату для опису фізичних процесів, серед яких: зовнішнє обтікання ЛА дозвуковими та надзвуковими потоками, реагуючі течії, процеси пов'язані з роботою двигунів внутрішнього згорання, робота турбоагрегатів та пневмоприладів.

### Завдання:

- сформувані у слухачів стійку систему навичок та умінь щодо створення математичних моделей комплексних фізичних процесів;
- визначити алгоритм вибору моделі турбулентності для опису зовнішніх та внутрішніх течій;
- виділити основні етапи створення математичної моделі для мультикомпонентних сумішей;
- розглянути особливості моделювання роботи несучих гвинтів гвинтокрилих ЛА;
- розглянути особливості моделювання процесів горіння сумішей для задач оптимізації паливних форсунок та камер згорання для двигунів АРКТ.
- розвинути навички щодо редагування тривимірних твердотільних геометричних об'єктів, роботі с булевими операціями для вичленення внутрішніх об'ємів області моделювання, визначити алгоритм створення та редагування розрахункових скінчено елементних сіток моделей на основі тетрагональних, гексагональних та поліедричних елементів.
- ознайомити слухачів з основними можливостями програмного комплексу ANSYS, а саме з модулями розрахунку гідро-газодинаміки ANSYS CFX та ANSYS Fluent.

**Результати навчання:** у результаті вивчення даного курсу слухач повинен знати:

- алгоритми розв'язання системи рівнянь Нав'є-Стокса для опису течій в'язких рідин,
- принципи створення розрахункових моделей,
- алгоритм визначення крайових умов,
- основні особливості побудови та редагування геометрії об'єктів АРКТ для створення розрахункових скінчено-елементних сіток,
- основні підходи для опису турбулентних та ламінарних течій,
- особливості моделювання зовнішніх та внутрішніх течій,
- основні етапи створення математичної моделі для моделювання надзвукових течій,
- принципи побудови математичної моделі для опису мультикомпонентних сумішей;
- особливості моделювання тіл обертання.

На підставі отриманих теоретичних знань слухач повинен **уміти:**

- практично використовувати програмний комплекс для розрахунку фізичних процесів в АРКТ;
- використовувати сукупність можливостей програмного забезпечення для створення математичних моделей;
- володіти навиками щодо редагування геометрії та розрахункової сітки моделі;

Крім того слухач повинен мати представлення:

- про алгоритми розрахунку аеродинамічних характеристик ЛА на дозвукових і надзвукових режимах польоту;
- про алгоритми імпорту – експорту отриманих результатів розрахунку аеродинамічних характеристик до систем розрахунку на міцність.
- про перспективу застосування програмного комплексу ANSYS для дослідження аеродинамічних характеристик суміжних з АРКТ об'єктів.

**Міждисциплінарні зв'язки:** дисципліна «Моделювання та розрахунок процесів в АРКТ» базується на наступних дисциплінах:

- «Гідравліка»;
- «Аерогідродинаміка»;
- «Динаміка польоту»;
- «Фізика»;
- «Вища математика».

### **3. Програма навчальної дисципліни**

#### **Змістовний модуль 1. Основні можливості програмного модуля ANSYS**

**Тема 1. Вступ до навчальної дисципліни “Моделювання та розрахунок процесів в АРКТ”.**

Предмет вивчення і задачі дисципліни. Створення і опрацювання геометрії в ANSYS Design Modeler. Основні можливості програми, інтерфейс та основи CAD моделювання. Редагування існуючої геометрії для агрегатів чи вузлів з метою створення внутрішніх та зовнішніх областей для розрахунків параметрів течії.

**Тема 2. Сучасні підходи до створення розрахункових сіток.**

Використання модулів ANSYS Mesher та Icem CFD для створення сіток з різними типами елементів. Кількісні та якісні показники для кінцево-елементних моделей. Визначення параметрів пристінкового шару для моделювання відривних течій. Прогнозування точок відриву потоку для задач зовнішнього обтікання аеродинамічних поверхонь на критичних кутах атаки.

**Тема 3. Метод скінченних елементів.**

Числові методи розв'язання системи рівнянь Нав'є – Стокса для описання руху в'язкої ньютонівської рідини. Вирішення прикладних задач для оцінки ефективності роботи запірної арматури гідропристроїв.

**Тема 4. Основні налаштування системи числового аналізу.**

Алгоритм SIMPLE - на пів неявний метод для розв'язку рівнянь зі зв'язком по тиску. Порівняльна характеристика алгоритмів розв'язання системи диференціальних рівнянь руху рідини з урахування стисливості.

### **Тема 5. Міждисциплінарний аналіз. Особливості налаштувань.**

Статичний розрахунок на міцність конструкції ЛА з попередньо розрахованим розподіленням тиску від аеродинамічних навантажень. Динамічний обмін даними між системами розрахунку на міцність та модулем гідрогазодинаміки. Вирішення задачі обтікання тонкої пружної пластини з урахуванням процесів її коливання.

### **Тема 6. Параметризація геометрії та вхідних даних для розрахунків.**

Створення таблиць вхідних та вихідних параметрів. Планування числового експерименту. Принцип Парето, створення цільових функцій для оптимізації. Оптимізація форми лопатки турбіни.

## **Змістовний модуль 2. Основні можливості програмних модулів ANSYS Fluent та ANSYS CFX**

### **Тема 1. Математичні моделі в'язких течій.**

Визначення області використання RANS моделей турбулентності, їх основні недоліки та переваги. Використання гібридних моделей турбулентності DES та SAS для опису нестационарних течій. Ньютонівські та неньютонівських рідини, особливості їх опису.

### **Тема 2. Особливості моделювання пристінкового шару.**

Вимоги до розмірів и кількості елементів розрахункової сітки моделі. Безрозмірний параметр  $Y^+$ . Визначення величини пограничного шару. Відривні течії. Розрахунок аеродинамічних характеристик профілю крила ЛА на критичних кутах атаки.

### **Тема 3. Задачі з рухомими границями.**

Налаштування алгоритмів деформації та автоматичного перестроювання розрахункових сіток. Стабільність ітераційної процедури. Графіки похибки системи диференціальних рівнянь. Застосування алгоритмів адаптації розрахункової сітки для розрахунку характеристик несучого гвинта.

### **Тема 4. Моделювання мультикомпонентних течій. Фазові переходи.**

Гомогенні та гетерогенні суміші. Моделювання хімічних реакцій. Процеси горіння. Вирішення задачі оптимізації паливної форсунки для двигунів внутрішнього згорання.

### **Тема 5. Опрацювання результатів.**

Принцип роботи програми CFD Post, створення графіків, таблиць результатів, карти відображень змінних. Візуалізація ліній току, створення ізоповерхонь по обраній змінній.

#### 4. Структура навчальної дисципліни

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин				
	денна форма				
	усього	у тому числі			
л		п	лаб	с.р.	
<b>Змістовий модуль 1.</b>					
Вступ до навчальної дисципліни «Моделювання та розрахунків процесів в АРКТ»	4	2	2	-	-
Сучасні підходи до створення розрахункових сіток.	12	2	2		7
Метод скінченних елементів.	14	6	2	-	7
Основні налаштування системи числового аналізу.	14	4	2	-	7
Міждисциплінарний аналіз. Особливості налаштувань.	16	6	4	-	7
Параметризація геометрії та вхідних даних для розрахунків.	15	4	4	-	7
<b>Разом</b>	<b>75</b>	<b>24</b>	<b>16</b>	<b>-</b>	<b>35</b>
<b>Змістовий модуль 2.</b>					
Математичні моделі в'язких течій.	16	6	4	-	6
Особливості моделювання пристінкового шару.	14	4	2	-	6
Задачі з рухомими границями.	16	4	4	-	8
Моделювання мультикомпонентних течій. Фазові переходи	18	6	4	-	7
Опрацювання результатів.	11	4	2	-	8
<b>Разом</b>	<b>75</b>	<b>24</b>	<b>16</b>	<b>-</b>	<b>35</b>
<b>Усього з дисципліни</b>	<b>150</b>	<b>48</b>	<b>32</b>	<b>-</b>	<b>70</b>

#### 5. Темі семінарських занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин	
		Денна форма навчання	Заочна форма навчання
1	Не передбачено навчальним планом		

#### 6. Темі практичних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Побудова блочної структури и створення двомірної розрахункової сітки для профілю крила в середовищі Icem CFD	2
2	Створення математичної моделі обтікання профілю крила дозвуковим потоком газу	2
3	Обчислення аеродинамічних коефіцієнтів, створення вхідних параметрів ( швидкість та кут установки крила ) та	2

	вихідних параметрів (аеродинамічна якість крила)	
4	Розрахунок розподілення тиску по поверхні крила з наступним експортом значень до модуля розрахунків на міцність	4
5	Гібридні моделі турбулентності. (LES, DES, SAS) Переваги, недоліки, сфера застосування. Вирішення задачі формування паливної суміші форсункою ежекторного типу	4
6	Вирішення задач оптимізації (Оптимізація форми профілю крила за цільовою функцією максимальної аеродинамічної якості для заданої висоти та швидкості польоту). Адаптивне крило.	4
7	Обчислення параметрів крила на критичних кутах атаки. Відривні зони. Особливості моделювання пристінкового шару.	4
8	Випаровування та конденсація рідини.	4
9	Кавітація. Моделювання роботи гребного гвинта	4
10	Автоматична генерація звітів для виконаних розрахунків	2
	<b>Всього</b>	<b>32</b>

### 7. Теми лабораторних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Не передбачено навчальним планом	

### 8. Самостійна робота

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Вступ до навчальної дисципліни «Моделювання та розрахунок процесів в АРКТ»	4
2	Сучасні підходи до створення розрахункових сіток.	6
3	Метод скінченних елементів.	8
4	Основні налаштування системи числового аналізу.	6
5	Міждисциплінарний аналіз. Особливості налаштувань.	8
6	Параметризація геометрії та вхідних даних для розрахунків.	8
7	Математичні моделі в'язких течій.	10
8	Особливості моделювання пристінкового шару.	6
9	Задачі з рухомими границями.	8
10	Моделювання мультикомпонентних течій. Фазові переходи	6
	<b>Разом</b>	<b>70</b>

### 9. Індивідуальні завдання

Не передбачено навчальним планом.



## 10. Методи навчання

Проведення лекцій, практичних робіт, індивідуальні консультації з питань нового матеріалу, самостійна робота слухачів.

## 11. Методи контролю

Опитування, модульний контроль, іспит/залік.

## 12. Критерії оцінювання та розподіл балів, які отримують аспіранти

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

Складові навчальної роботи	Бали за одне заняття	Кількість занять	Сумарна кількість балів
<b>Змістовний модуль 1</b>			
Робота на лекціях	0...1	6	0...6
Виконання і захист лабораторних робіт	0...9	4	0...36
Модульний контроль	0...14	1	0...14
<b>Змістовний модуль 2</b>			
Робота на лекціях	0...1	4	0...4
Виконання і захист лабораторних робіт	0...9	3	0...27
Модульний контроль	0...14	1	0...14
<b>Усього за семестр</b>			<b>0...100</b>

Семестровий контроль (іспит) проводиться у разі відмови аспіранта від балів поточного тестування й за наявності допуску до заліку. Під час складання семестрового заліку аспірант має можливість отримати максимум 100 балів.

Білет для іспиту/заліку складається з 3 теоретичних запитань. За повну правильну відповідь на два перших запитання аспірант отримує по 30 балів. За повну правильну відповідь на останнє запитання – 40 балів.

### 12.2. Якісні критерії оцінювання

Необхідний обсяг знань для одержання позитивної оцінки:

- основні етапи налаштування математичної моделі фізичного явища;
- алгоритм призначення крайових умов;
- основні типи розрахункових сіток, їх переваги, недоліки, а також алгоритми визначення їх кількісних та якісних показників;
- принципи вибору моделей турбулентності;
- основні етапи вирішення завдань оптимізації;
- створення параметричних зв'язків для вхідних та вихідних даних.

Необхідний обсяг вмінь для одержання позитивної оцінки:

- практично використовувати чисельні методи розрахунку для вирішення задач гідрогазодинаміки;
- застосовувати математичні моделі фізичних явищ для оптимізації геометрії об'єктів АРКТ;
- практично володіти методами дискретизації розрахункової моделі.

### 12.3 Критерії оцінювання роботи аспіранта протягом семестру

**Задовільно (60-74).** Мати мінімум знань та умінь. Відпрацювати усі практичні заняття. Мати загальну уяву про програмне забезпечення ANSYS, орієнтуватися у темах лекційного матеріалу.

**Добре (75-89).** Вільно володіти лекційним матеріалом. Мати навички самостійного виконання чисельних розрахунків. Вміти опрацювати отримані результати. Виконати та належним чином оформити усі практичні завдання.

**Відмінно (90-100).** В повному обсязі володіти лекційним та додатковим матеріалом. Виконати та належно оформити усі практичні завдання. Вміти аналізувати та робити висновки з отриманих результатів. Орієнтуватися у підручниках та посібниках. Безпомилково виконати індивідуальне практичне завдання.

### Шкала оцінювання: бальна і традиційна

Сума балів	Оцінка за традиційною шкалою	
	Іспит, диференційований залік	Залік
90 – 100	Відмінно	Зараховано
75 – 89	Добре	
60 – 74	Задовільно	
0 – 59	Незадовільно	Не зараховано

### 13. Методичне забезпечення

#### Рекомендована література

1. Spalart, P.R. “Strategies for turbulence modeling and simulation” [Текст] / P.R. Spalart, Int. J. Heat Fluid Flow, 2000, v.21, p. 252-263.
2. Ландау, Л.Д. Гидродинамика [Текст]/ Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц – М., 1980. – 535 с.
3. Jones, W.P. The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence [Текст] / W.P. Jones, B.E. Launder // Int. J. Heat and Mass Transfer. – 1972. – V.15. – P.301 – 314.
4. Алямовский, А.А. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике [Текст] / под ред.. А.А. Алямоского. – СПб.: БХВ Петербург, 2005. – 800 с.
5. Волков, Э.П. Моделирование горения твердого топлива [Текст] / Э.П. Волков, Л.И. Зайчик, В.А. Першуков. – М.: Наука, 1994. – 320 с.
6. Menter, F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [Текст] / F.R. Menter // AIAA-Journal – 1994. – № 32(8). – P. 269 – 289.
7. Menter, F.R. A scale-adaptive simulation model for turbulent flow predictions [Текст] / F.R. Menter, M. Kuntz, R. Bender. – AIAA Paper 2003-0767, 2003. – 40 p.

8. Bradshaw, P. "Effects of Streamwise Curvature on turbulent Flow"[Текст] / P. Bradshaw. AGARD-AG-169, 1973.
9. Spalart, P.R. "On the sensitization of simple turbulence models to rotation and curvature" [Текст]/ P.R. Spalart, M.L. Shur // Aerospace Science and Technology, 1997, v. 1, No. 5, pp 297-302.
10. Piomelli, U. "Wall-layer models for large-eddy simulations" [Текст] / U. Piomelli, E. Balaras // Annual Rev. Fluid Mech., 2002, v.34, pp. 349-374.
11. Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach [Текст] / P.R. Spalart, W.H. Jou, M. Strelets, S.R. Allmaras // Proceedings of first AFOSR international conference on DND/LES, 1997.
12. Physical and numerical upgrades in the detached-eddy simulation of complex turbulent flows [Текст] / A. Travin, M. Shur, M. Strelets, P.R. Spalart // Proceedings of Euromech Coll. "LES of complex transitional and turbulent flows", Munich, Germany, 2002. Fluid Mechanics and Its Applications , 2004, v. 65, No. 5, pp. 239-254.
13. Cantwell B., Coles D. "An experimental study of entrainment and transport in the turbulent near wake of a circular cylinder", J. Fluid Mechanics, 1983, v.136, pp.321-374.