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

Кафедра Конструкцій і проектування ракетної техніки (№ 401)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи
_____ Є. В. Павліков
(підпис) (ініціали та прізвище)
«___» _____ 2020 р.
Відділ аспірантури і докторантури

РОБОЧА ПРОГРАМА ВИБІРКОВОЇ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Інтегровані комп'ютерні системи моделювання об'єктів авіаційної та ракетно-космічної техніки
(назва навчальної дисципліни)

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

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

Освітньо-наукова програми: Авіаційна та ракетно-космічна техніка
(найменування освітньої програми)

Форма навчання: денна

Рівень вищої освіти: третій (освітньо-науковий)

Харків 2020 рік

Робоча програма вибіркової навчальної дисципліни

Інтегровані комп'ютерні системи моделювання об'єктів авіаційної та ракетно-космічної техніки
(назва дисципліни)

для здобувачів за спеціальністю 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка
освітньої програми Авіаційна та ракетно-космічна техніка
«26» 08 2020 р.,11 с.
Розробник: доц. каф. № 401, д. т. н. _____ Середа В. О.
(посада, науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (прізвище та ініціали)
Гарант ОНП професор каф. 103, д.т.н., професор _____ Малков І.В.
(посада, науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (прізвище та ініціали)

Протокол № 01 від «27» 08 2020 р засідання кафедри № 401
В. о. зав. кафедри: доцент, к. т. н. _____ Бетін Д.О.
(посада, науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (прізвище та ініціали

ПОГОДЖЕНО:

Завідувач відділу
аспірантури і докторантури В. Б. Селевко

Голова наукового товариства
студентів, аспірантів,
докторантів і молодих вчених Т. П. Старовойт

1. Опис навчальної дисципліни

<table>
<tr><td>Найменування показників</td><td>Галузь знань, спеціальність, освітня програма, рівень вищої освіти</td><td>Характеристика навчальної дисципліни
(денна форма навчання)</td></tr>
<tr><td>Кількість кредитів – 5</td><td rowspan="14">Галузь знань
13 Механічна інженерія
(шифр і найменування)

Спеціальність
134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка
(код та найменування)

Освітня програма
Авіаційна та ракетно-космічна техніка
(найменування)

Рівень вищої освіти
третій (освітньо-науковий)</td><td>Вибіркова</td></tr>
<tr><td>Кількість модулів – 1</td><td rowspan="2">Навчальний рік
2020 / 2021</td></tr>
<tr><td>Змістових модулів – 2</td></tr>
<tr><td>Індивід. завдання – не має</td><td>Семестр</td></tr>
<tr><td>Загальна кількість годин – 80/150</td><td>2-й</td></tr>
<tr><td rowspan="10">Кількість тижневих годин для денної форми навчання:
аудиторних – 5;
самостійної роботи аспіранта – 4,4</td><td>Лекції *</td></tr>
<tr><td>48 годин</td></tr>
<tr><td>Практичні, семінарські *</td></tr>
<tr><td>32 годин</td></tr>
<tr><td>Лабораторні *</td></tr>
<tr><td>0 годин</td></tr>
<tr><td>Самостійна робота</td></tr>
<tr><td>70 годин</td></tr>
<tr><td>Індивідуальні завдання</td></tr>
<tr><td>0 годин</td></tr>
<tr><td>Вид контролю</td></tr>
<tr><td>диф. залік</td></tr>
</table>

Співвідношення кількості годин аудиторних занять до самостійної роботи становить: для денної форми навчання – 80/70*;

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

2. Мета та завдання навчальної дисципліни

Мета вивчення: вивчення основ спеціальних розділів математичної фізики, механіки газу та рідни, на ґрунті яких побудована теорія сучасних методів реалізації теплофізичних моделей робочих процесів у ракетних двигунах, базових визначень сіткових методів, що реалізують математичні моделі теплофізичних процесів у теплових машинах для подальшого самостійного розв'язувати найпростіші задачі чисельного експерименту в теплофізиці ракетних двигунів.

Завдання дисципліни: вивчення основних конструктивних рішень в області конструювання ракетних двигунах твердого палива, конструкцій і вузлів, формування умінь проводити конструктивних аналіз і визначати параметри вузлів ракетних двигунах твердого палива, формування навичок інженерного обґрунтування проектних рішень і розрахунку параметрів двигуна з використанням програмного забезпечення

Результати навчання: у результаті вивчення навчальної дисципліни слухач повинен:

знати: теорію різницевих схем, сіткові методи розв'язання задач теплофізики, властивості течій; вариаційно- і проекційно- сіткові методи;

вміти: складати балансові рівняння, складати неявні кінцево-різницеві схеми, розробляти алгоритми моделювання процесів у ракетних двигунах;

мати навички: чисельного моделювання процесів у ракетних двигунах, розробки програмного забезпечення для розрахунку процесів.

Міждисциплінарні зв'язки дисципліни «Інтегровані комп'ютерні системи моделювання об'єктів авіаційної і ракетно-космічної техніки» може бути ефективно засвоєна слухачем у повному обсязі при належному вивченні теорії ракетних двигунів, спеціальних розділів математики, обробка та аналіз результатів наукових досліджень з використанням ІТ.

3. Програма навчальної дисципліни

Змістовий модуль 1.

Тема 1. Огляд методів теплофізичного розрахунку ракетних двигунів

Класифікація методів моделювання теплофізичних процесів у ракетних двигунах. Квазістаціонарні методи розрахунку процесів у теплових машинах. Моделі процесів, що використовують метод особливостей. Способи віддзеркалення чинників робочого процесу в термінах методу особливостей. Визначення інтенсивностей джерел-стоків, що імітують фактори робочого процесу.

Тема 2. Класифікація диференціальних рівнянь у частинних похідних

Рівняння з двома незалежними змінними. Характеристичне перетворення координат. Властивості і типи диференціальних рівнянь другого порядку. Класифікація диференціальних рівнянь у частинних похідних. Рівняння з двома незалежними перемінними. Характеристичне перетворення координат.

Тема 3. Класифікація рівнянь математичної фізики і їх властивості.

Характеристичні рівняння. Типи рівнянь у часткових похідних другого порядку. Класифікація рівнянь математичної фізики і їхньої властивості. Приклади моделей процесів механіки суцільних середовищ, описуваних різними типами систем рівнянь. Течія рідини. Приклади моделей течії рідини. Теплопровідність.

Тема 4. Властивості рівнянь гіперболічного типу

Характеристичний вид рівнянь. Похідна по напрямку. Характеристики. Властивості систем рівнянь гіперболічного типу. Системи квазілінійних рівнянь гіперболічного типу. Властивості та ознаки систем квазілінійних рівнянь гіперболічного типу. Класифікація систем рівнянь. Властивості характеристичних сіток. Інваріанти Рімана.

Тема 5. Сіткові методи рішення задач теплофізики

Сіткові методи рішення задач теплофізики: класифікація, основні визначення. Класифікація основних сіткових методів рішення задач теплофізики: метод скінчених різниць, метод характеристик, метод скінчених об’ємів, метод скінчених елементів.

Тема 6. Основні поняття теорії різницевих схем

Норми сіткових функцій. Різницева апроксимація диференціальних операторів. Погрішність різницевої апроксимації. Різницеві схеми як операторні рівняння. Деякі зведення про властивості лінійних операторів. Розв’язуючи оператори. Коректність різницевої задачі. Стійкість. Збіжність. Апроксимація.

Тема 7. Віддзеркалення кінцево-різницевими схемами фізичних властивостей течій

Фізичне трактування умови збіжності. Поняття консервативності. Вплив в'язкості на стійкість різницевих схем. Властивість транспортивності. Методи реалізації. «Суто» різницеві схеми. Одержання апріорних оцінок на прикладі схеми Лакса. Приклад схеми з разностями проти потоку.

Тема 8. Кінцево-різницеві схеми

Схема Куранта-Изаксона Риса. Двошагова схема Лакса-Вендрофа. Методи реалізації. Схема С.К.Годунова. Методи реалізації. Методи часток. Загальні засади. Метод розщіплення згідно з точками зору Ейлера та Лагранжа. Метод часток в осередках (Ф. Харлоу). Метод великих часток (О. М. Белоцерковского – Ю. М. Давидова).

Змістовий модуль 2.

Тема 1. Методи характеристик

Використання нерегулярних сіток. Класичний вид методу характеристик. Умова консервативності. Регулярізація розрахункової сітки та сіточно-характеристичний метод.

Тема 2. Вариаційно- і проекційно- сіткові методи

Метод Ритца. Метод Гальоркіна-Бубнова. Метод кінцевих елементів. Узагальнені математичні моделі процесів у теплових машинах. Опис теплофізичних процесів в основних вузлах теплових двигунів у термінах методу особливостей.

Тема 3. Автомодельні рішення приватних задач одномірної газової динаміки

Одномірна течія досконалого газу. Квазілинійна і характеристична форми запису одномірної течії досконалого газу. Одномірна течія досконалого газу. Ознаки автомодельности рішення. Теорема Сєдова. Доказ теореми.

Тема 4. Властивості рімановых хвиль

Ізоентропічна течія і інваріанти Рімана. Застосування інваріантів Рімана. Рівняння в інваріантах для політропного газу. Найпростіші форми безпереривних автомодельних течій. Хвилі Рімана. Приклади простих хвиль розрідження та стиску й умова автомодельності.

Тема 5. Ударні хвилі

Властивості ударної хвилі, як розриву. Поняття нормального газу. Адіабата Гюгоніо для нормального газу. Поняття стійкості ударних хвиль. Умови стійкості на розривах, як частка прояву другого початку термодинаміки. Терема Цемплена. Уявлення ударних хвиль у фазовій площині. Приклади застосування теореми Цемплена: взаємне розташування ліній розриву і характеристик.

Тема 6. Адіабата Гюгонио для політропного газу

Класифікація розривів. Умови гідромеханічної спільності на розривах. Контактний розрив. Властивості ударної адіабати. Порівняння простих хвиль стиску й ударних. Взаємне розташування адіабат Пуассона і Гюгоніо. Порівняння Рімановых хвиль і коротких ударних.

Тема 7. Примітиви, що утворять рішення задачі про розпад розриву

Задача про взаємодію однорідного одномірного потоку газу з плоскою перешкодою: випадки розльоту і фокусування. Задача про розпад довільного розриву для політропних газів. Структура можливих конфігурацій розпаду розриву. Конфігурації А-Г.

Тема 8. Реалізації схеми С. К. Годунова

Повна схема «розпаду розриву». Метод розщеплення за напрямками у просторі. Ізоентропічне наближення схеми «розпаду розриву».

4. Структура навчальної дисципліни

№№ тем	Назви змістовних модулів	Кількість годин – денна форма					
		Σ	лек.	пр.	лаб.	інд.	с. р.
1	2	3	4	5	6	7	8
Змістовний модуль № 1							
1	Огляд методів теплофізичного розрахунку ракетних двигунів	1	1	-	-	-	-
2	Класифікація диференціальних рівнянь у частинних похідних	6	1	-	-	-	5
3	Класифікація рівнянь математичної фізики і їх властивості.	6	1	-	-	-	5
4	Властивості рівнянь гіперболічного типу	6	1	-	-	-	5
5	Сіткові методи рішення задач теплофізики	14	5	4	-	-	5
6	Основні поняття теорії різницевих схем	14	5	4	-	-	5
7	Віддзеркалення кінцево-різницевими схемами фізичних	14	5	4	-	-	5

	властивостей течій						
8	Кінцево-різницеві схеми	14	5	4	-	-	5
	Разом	**75**	**24**	**16**	**-**	**-**	**35**
Змістовний модуль № 2							
1	Методи характеристик	6	1	-	-	-	5
2	Вариаційно- і проекційно- сіткові методи	10	1	4	-	-	5
3	Автомодельні рішення приватних задач одномірної газової динаміки	10	1	4	-	-	5
4	Властивості рімановых хвиль	6	1	-	-	-	5
5	Ударні хвилі	10	5	-	-	-	5
6	Адіабата Гюгонио для політропного газу	10	5	-	-	-	5
7	Примітиви, що утворять рішення задачі про розпад розриву	14	5	4	-	-	5
8	Реалізації схеми С. К. Годунова	9	5	4	-	-	-
	Разом	**75**	**24**	**16**	**-**	**-**	**35**
	Разом за семестр	**150**	**48**	**32**	**-**	**-**	**70**

5. Теми семінарських занять

№№ п/п	Назва семінарського заняття	Кількість годин

6. Теми практичних занять

№№ п/п	Назва практичного заняття	Кількість годин
Змістовний модуль № 1		
1	Складання балансових рівнянь для задачі теплопровідності циліндричної стінки	4
2	Складання неявної кінцево-різницевої схеми для задачі теплопровідності гомогенної циліндричної стінки	4
3	Розробка алгоритму вирішення задачі несталої теплопровідності в циліндричній стінці методом прямої та зворотної прогонки	4
4	Розробка програмного забезпечення для розрахунку несталого температурного поля у гомогенній стінці	4
Змістовний модуль № 2		
1	Розробка графічної оболонки для візуалізації несталого температурного стану у гомогенній циліндричній стінці	4
2	Чисельне моделювання процесу несталої теплопровідності у гомогенній циліндричній стінці	4
3	Розробка алгоритму моделювання несталого температурного поля у багатошаровій циліндричній стінці	4
4	Чисельне моделювання несталого температурного стану у багатошаровій циліндричній стінці	4
	Всього	**32**

7. Теми лабораторних робіт

№№ п/п	Назва лабораторної роботи	Кількість годин

8. Самостійна робота

№№ п/п	Назва самостійної роботи	Кількість годин
1	Класифікація диференціальних рівнянь у частинних похідних	5
2	Класифікація рівнянь математичної фізики і їх властивості.	5
3	Властивості рівнянь гіперболічного типу	5
4	Сіткові методи рішення задач теплофізики	5
5	Основні поняття теорії різницевих схем	5
6	Віддзеркалення кінцево-різницевими схемами фізичних властивостей течій	5
7	Кінцево-різницеві схеми	5
8	Методи характеристик	5
9	Вариаційно- і проекційно- сіткові методи	5
10	Автомодельні рішення приватних задач одномірної газової динаміки	5
11	Властивості рімановых хвиль	5
12	Ударні хвилі	5
13	Адіабата Гюгонио для політропного газу	5
14	Примітиви, що утворять рішення задачі про розпад розриву	5
	Всього	**70**

9. Індивідуальні завдання

№№ п/п	Назва індивідуального завдання	Кількість годин

10. Методи навчання

Проведення аудиторних лекцій, практичних занять, індивідуальні консультації (при необхідності), самостійна робота аспірантів за матеріалами, опублікованими кафедрою (методичні посібники).

11. Методи контролю

Для поточного контролю враховується робота на лекційних та практичних заняттях, усне опитування при їх проведенні, виконання та захист усіх лабораторних робіт, проведення поточних контрольних тестів і фінальний контроль у вигляді іспиту у разі відмови аспіранта від зароблених балів протягом семестру.

12. Критерії оцінювання та розподіл балів, які отримують аспіранти

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

Оцінювання основних елементів навчальної роботи та контрольні заходи проводиться за наступними рекомендованими балами.

Складові навчальної роботи	Бали за одне заняття (завдання)	Кількість занять (завдань)	Сумарна кількість балів
Змістовний модуль 1			
Робота на лекційних заняттях	0…0,5	24	0…12
Виконання і захист практичних робіт	0…5	4	0..20
Модульний контроль	0…18	1	0…18
Змістовний модуль 2			
Робота на лекційних заняттях	0…0,5	24	0…12
Виконання і захист практичних робіт	0…5	4	0..20
Модульний контроль	0…18	1	0…18
Усього за семестр			**60…100**

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 20 білетів по 3 питання у кожному (усі три питання в білеті теоретичні), причому кількість балів розподіляється наступним чином: по 35 балів за перші два питання, присвячених теорії різницевих схем і 30 балів – за третє питання, присвячене чисельним методам розв’язання рівнянь.

12.2 Якісні критерії оцінювання

Необхідний обсяг знань для одержання позитивної оцінки:

1. Класифікацію диференційних рівнянь у частинних похідних. Типи рівнянь у частинних похідних другого порядку. Знати приклади моделей, які описуються різними типами рівнянь.
2. Знати властивості рівнянь гіперболічного типу. Знати основні автомодельні рішення задач одномірної газової динаміки (задача про розпад довільного розриву, взаємодію газу з перешкодою).
3. Знати співвідношення у хвилі Рімана, ударній хвилі. Знати про призначення умов гідродинамічної сумісності на розривах. Знати про взаємне розташування ліній розриву та характеристик.
4. Знати структури можливих конфігурацій задачі розпаду довільного розриву. Знати характеристику и класифікацію чисельних методів вирішення задач теплофізики.
5. Знати основні поняття теорії різницевих схем: різницева апроксимація диференційних рівнянь, похибка різницевої апроксимації, коректність різницевих схем, поняття консервативності.
6. Знати яким чином впливає в’язкість на стійкість різницевих схем. Знати коротку характеристику сучасних методів розрахунку газодинамічних процесів у ракетних двигунах.
7. Знати класифікацію моделей течій у теплових двигунах. Знати моделі, які використовують квазістаціонарні уявлення про процес. Знати моделі течій, які використовують метод особливостей.
8. Знати сутність чисельних методів газової динаміки з сильними нелінійними одуреннями. Перелічувати та знати сутність сіткових методів з неперервною апроксимацією рішення.

Необхідний обсяг вмінь для одержання позитивної оцінки:

1. Вміти записувати систему квазілінійних рівнянь гіперболічного типу. Вміти визначати параметри течії за стрибком ущільнення у політропному газі. Вміти записувати різницеву апроксимацію диференційних рівнянь.
2. Вміти записувати параметри течії у конфігураціях задачі розпаду довільного розриву. Вміти записувати основні положення схеми Лакса та двошарової схеми Лакса-Вендорфа.
3. Вміти записувати приклад схеми з різницями проти потоку Куранта-Ізаксона-Ріса. Вміти пояснювати основні положення схеми Мак-Кормака, схеми Годунова.
4. Вміти пояснювати в чому полягає сутність методів часток: часток в комірках – метод Харлоу, крупних часток – метод Білоцерківського-Давидова. Мати уявлення про метод характеристик.
5. Вміти ставити крайову задачу для моделювання в'язкого теплопроводного газу. Вміти імітувати просторовий характер течії на границях області при використанні зниженого числа вимірювань.
6. Вміти використовувати наближення одновимірної Рімановоі хвилі розрядження, при моделюванні витікання зі звужуючого каналу в оточуюче середовище. Вміти моделювати взаємодію потоку газу зі стінкою.
7. Вміти користуватися методом розщеплення за напрямками та за фізичними процесами. Вміти універсальним чином описувати процеси в основних елементах камери РРД в термінах методу особливостей.
8. Вміти пояснювати основну сутність комплексно-спряжених газодинамічних моделей РРД, що базуються на методі особливостей. Вміти користуватися варіаційними підходами до вирішення задачі Діріхлє.
9. Вміти користуватися основними кінцево-різницевими методами вирішення задачі Коші (Ейлера, Рунге-Кутта, Адамса, Ньютона). Вміт пояснювати основну сутність методу кінцевих елементів.

12.3 Критерії оцінювання роботи аспіранта протягом семестру

Задовільно (60-74). Показати мінімум знань та умінь. Відпрацювати та захистити всі практичні роботи. Знати відмінності рівняння у частинних похідних від звичайного диференційного рівняння. Записувати різницевий аналог похідної. Називати основні чисельні методи та знати їх особливості. Знати особливості постановки крайової задачі теплопровідності. Знати основи програмної реалізації математичних алгоритмів.

Добре (75-89). Твердо знать мінімум знань. Захистити всі практичні роботи в обумовлений викладачем строк. Вміти визначати тип диференційного рівняння: еліптичного, гіперболічного, параболічного. Мати уявлення про транспортивні властивості різницевих схем. Знати моделі процесів, що використовують метод особливостей. Вміти реалізувати на мові програмування високого рівня математичні алгоритми.

Відмінно (90-100). Повно знати основній та додатковий матеріал. При виконанні практичних робіт докладно обґрунтувати запропоновані заходи. Орієнтуватися у підручниках та посібниках. Знати всі особливості конфігурацій задачі розпаду розриву. Визначати коректність різницевої схеми. Знати властивості рівнянь еліптичного, гіперболічного, параболічного типів. Відрізняти вільні особливості та пов'язані з масопереносом.

Шкала оцінювання: бальна і традиційна

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

13. Методичне забезпечення

Навчальні посібники:

1. Амброжевич, А. В. Численное моделирование теплофизических процессов в двигателестроении [Текст] / А. В. Амброжевич. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2005. – 233 с.
2. Амброжевич, А.В. Численное моделирование течений в тепловых двигателях и энергоустановках [Текст]: конспект лекций / А. В. Амброжевич. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 1995. – 145 с.
3. Амброжевич, А. В. Методы численного моделирования течений теплофизических процессов в двигателях летательных аппаратов. [Текст]: конспект лекций / А. В. Амброжевич. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2001. – 35 с.
4. Лаврівський, З. В. Технічна механіка рідин та газів [Текст] : навч. посібник / З. В. Лаврівський, .В. І. Мандрус. – Л : Сполом, 2004. – 198 с.
5. Ляшенко, М. Я. Чисельні методи [Текст] : підручник / М. Я. Ляшенко, М. С. Головань. – К. : Либідь, 1996. – 288 с.
6. Задачин, В. М. Чисельні методи [Текст] : навч. посібник / В. М. Задачин, І. Г. Конюшенко. – Х : Вид. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2014. – 180 с.
7. Пістунов, І. М. Чисельні методи [Текст] : навч. посібник / І. М. Пістунов. – Дн : Вид. ДВНЗ «НГУ», 2014. – 215 с.

Навчально-методичний комплекс дисципліни «Інтегровані комп'ютерні технології проектування» розміщено у методичному кабінеті кафедри «Конструкцій і проектування ракетної техніки», який включає в себе:

1. Обов'язкові складові:
   - робоча програма дисципліни;
   - конспект лекцій, підручники (навчальні посібники);
   - методичні вказівки та рекомендації для виконання практичних робіт;
   - рекомендації для самостійної підготовки;
   - тематики індивідуальних завдань;
   - приклади розв'язування типових задач чи виконання типових завдань;
   - питання, тести для контрольних заходів;
   - каталоги інформаційних ресурсів;
2. Додаткові складові:
   - ілюстративні матеріали.

14. Рекомендована література

Базова:

1. Халіпа, В. М. Технічна механіка рідини та газів [Текст] : консп. лекцій / В. М. Халіпа, С. О. Вамболь, І. В. Міщенко. – Х. : УЦЗУ, 2007. – 164 с.
2. Versteeg, H. K. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. The Finite Volume Method. Second Edition [Text] / H. K. Versteeg, W. Malalasekera // Pearson Education Limited, 2007. – 517 p.
3. Moukalled, F. The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics. An Advanced Introduction with OpenFOAM and MathLAB [Text] / F. Moukalled, L. Mangani, M. Darwish // Springer International Publishing Switzerland, 2016. – 817 p.
4. Hirsch, C. Numerical Computation of Internal and External Flows. Vol. 1. Fundamentals of Computational Fluid Dynamics Second Edition [Text] / C. Hirsch // Springer International Publishing Switzerland, 2007. – 696 p.

5. Segerlind, L. J. Applied Finite Element Analysis. Second Edition [Text] / Larry J. Segerlind // John Wiley & Sons, 1984. – 448 p.

Допоміжна:

1. Ковеня, В. М. Метод расщепления в задачах газовой динамики [Текст] / В. М. Ковеня, Н. Н. Яненко. – Новосибирск: Наука, 1981. – 304 с.
2. Роуч П. Вычислительная гидродинамика [Текст] / П. Роуч. – М.:Мир,1980. – 616 с.
3. Салтанов, Н. В. Аналитическая гидромеханика [Текст] / Н. В. Салтанов. – Киев : Наукова думка, 1984. – 200с.
4. Ван-Дайк М. Методы возмущений в механике жидкостей [Текст]. – М.: Мир, 1967. – 310 с.
5. Ворожцов, Е. В. Методы локализации особенностей при численном решении задач газодинамики [Текст] / Е. В. Ворожцов, В. М. Ковеня. – Новосибирск: Наука, 1985. – 224 с.
6. Тихонов, А. Н. Уравнения математической физики [Текст] / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – М.: Наука, 1977. – 736 с.
7. Самарский, А. А. Теория разностных схем [Текст] / А. А. Самарский. – М.: Наука, 1983. – 616 с.
8. Рождественский, Б. Л. Системы квазилинейных уравнений и их приложения к газовой динамике [Текст] / Б. Л. Рождественский, Н. Н. Яненко. – М.: Наука, 1978. – 688 с.
9. Седов, Л. И. Методы подобия и размерности в механике [Текст] /. – М.: Наука, 1977. – 440 с.
10. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Л. Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1978. – 736 с.
11. Годунов С. К. Разностные схемы [Текст] / С. К. Годунов, В. С. Рябенький. – М.: Наука, 1977. – 440 с.
12. Рихмайер Р. Разностные методы решения краевых задач [Текст] / Р. Рихмайер, К. Мортон. – М.: Мир, 1972. – 418 с.
13. Самарский А. А. Разностные методы решения задач газовой динамики [Текст] / А. А. Самарский, Ю. П. Попов. – М.: Наука, 1980. – 352 с.
14. Марчук, Г. И. Методы вычислительной математики [Текст] / Г. И. Марчук. – М.: Наука, 1977. – 456 с.
15. Сагерлинд М. Применение метода конечных элементов [Текст] / М. Сагерлинд. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
16. Мышкис, А. Д. Математика для ВТУЗов. Специальные курсы [Текст] / А. Д. Мышкис. – М.: Наука, 1971. –632 с.
17. Болгарский, А. В. Сборник задач по термодинамике и теплопередаче [Текст] / А. В. Болгарский, В. И. Голдобеев, Н. С. Идиатуллин. – М.: Высшая школа, 1972. – 304 с.
18. Исаченко В. П., Теплопередача [Текст] / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел – М.: Энергия, 1975. – 488 с.

15. Інформаційні ресурси

1. Програма для проведення термогазодинамічного розрахунку РДТП з урахуванням процесів дисоціації [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.lpre.de/resources/software/astra4.txt