

Національна академія наук України

Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Заступник директора  
з наукової роботи



Робоча програма навчальної дисципліни

**Моделювання нестационарних в'язких просторових течій у проточних частинах турбомашин**

спеціальність 142 - енергетичне машинобудування

2019 / 2020 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження Вченою радою інституту

18 жовтня 2018 року, протокол №10

**РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ:**

Авраменко А.М., к.т.н., с.н.с., в.о. завідувача відділу водневої енергетики  
(вказати авторів, їхні наукові ступені, вчені звання та посади)

Програму схвалено на засіданні відділу «Оптимізація процесів і конструкцій турбомашин»

Протокол від 10 вересня 2018 року, № 2

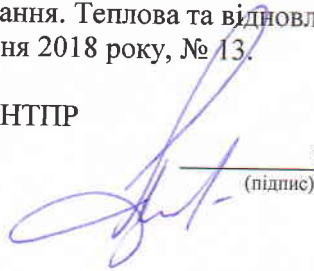
Завідувач відділу «Оптимізація процесів і конструкцій турбомашин»

  
(підпис)

чл.-кор. НАН України О.Л.Шубенко  
(прізвище та ініціали)

Програму погоджено науково-технічною проблемною радою  
«Енергомашинобудування. Теплова та відновлювальна енергетика. Екологія»  
Протокол від 13 вересня 2018 року, № 13.

Голова НТПР

  
(підпис)

чл.- кор. НАН України А.В.Русанов  
(прізвище та ініціали)

## ВСТУП

Програма навчальної дисципліни “Моделювання нестационарних в'язких просторових течій у проточних частинах турбомашин” складена відповідно до освітньо-наукової програми підготовки здобувачів третього рівня вищої освіти ступеня доктора філософії за спеціальністю

142 - енергетичне машинобудування.

### 1. Опис навчальної дисципліни

#### 1.1. Мета викладання навчальної дисципліни

Метою викладання навчальної дисципліни «Моделювання нестационарних в'язких просторових течій у проточних частинах турбомашин» є формування знань в галузі чисельного моделювання нестационарних в'язких просторових течій у проточних частинах турбомашин та оволодіння навичками формування та адаптації розрахункової сітки, опису граничних умов та аналізу результатів моделювання

#### 1.2. Основні завдання вивчення дисципліни

Основними завданнями вивчення дисципліни «Моделювання нестационарних в'язких просторових течій у проточних частинах турбомашин» є опанування методики чисельного моделювання нестационарних в'язких просторових течій у проточних частинах турбомашин

1.3. Кількість кредитів 3

1.4. Загальна кількість годин 90

#### 1.5. Характеристика навчальної дисципліни

Вибіркова	
Вид підсумкового контролю - залік	
Рік підготовки	1-й
Семестр	1-й
Лекції	45 год.
Практичні, семінарські заняття	-
Лабораторні заняття	-
Самостійна робота	45 год.
Індивідуальні завдання	-

#### 1.6. Заплановані результати навчання

**знати :**

- фізичну суть явищ, які виникають при тепломасообмінних процесах у проточних частинах турбомашин;
- математичні моделі для опису ламінарної та турбулентної течії рідини та газу.

**вміти :**

з використанням чисельних методів моделювати процеси нестационарних в'язких просторових течій у проточних частинах турбомашин.

## 2. Тематичний план навчальної дисципліни

### **Розділ 1. Математичні моделі об'єктів турбоустановки**

*Тема 1. Математична модель одномірної течії робочого тіла у багатоступеневій проточній частині*

Основні рівняння

*Тема 2. Математична модель вісисиметричної течії реального робочого тіла у проточній частині багатоступеневої турбіни*

Основні рівняння

### **Розділ 2. Метод скінченних різниць**

*Тема 1. Скінченно-різницева апроксимація рівнянь у частинних похідних*

Загальні питання та визначення.

*Тема 2. Різні методи побудови скінченно-різницевої схем*

Застосування нерегулярних сіток

*Тема 3. Стійкість скінченно-різницевої схем*

Задачі

### **Розділ 3. Застосування методу скінченних різниць для розв'язання модельних рівнянь**

*Тема 1. Хвильове рівняння*

Явні та неявні методи Ейлера

*Тема 2. Рівняння теплопровідності*

Простий явний метод

*Тема 3. Рівняння Лапласа*

Скінченно-різницеві аналоги рівняння Лапласа

*Тема 4. Рівняння Бюргерса (нев'язка течія)*

Метод Лакса

*Тема 5. Рівняння Бюргерса (в'язка течія)*

Метод різниць уперед по часу та центральних різниць по простору

### **Розділ 4. Основні рівняння рідини та теплообміну**

*Тема 1. Рівняння Рейнольдса для турбулентної течії*

Рівняння руху, енергії

*Тема 2. Рівняння пограничного шару*

Рівняння нерозривності, руху, енергії

*Тема 3. Рівняння Ейлера*

Рівняння нерозривності, кількості руху

### **Розділ 5. Чисельні методи розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса**

*Тема 1. Рівняння Нав'є-Стокса для стисливої рідини*

Явний та неявний метод Мак-Кормака

*Тема 2. Рівняння Нав'є-Стокса для нестислової рідини*

Підхід з використанням завихреності та функцій току

## 3. Структура навчальної дисципліни

Назви розділів і тем	Кількість годин						
	усього	у тому числі					
		лекції	практ.	лаб.	сем.	інд.	с.р.
1	2	3					
<b>Розділ 1. Математичні моделі об'єктів турбоустановки</b>							
Тема 1. Математична модель одномірної течії робочого тіла у багатоступеневій проточній частині	4	2					2

Тема 2. Математична модель вісісиметричної течії реального робочого тіла у проточній частині багатоступеневої турбіни	4	2					2
Разом за розділом 1	8	4					4
<b>Розділ 2. Метод скінченних різниць</b>							
Тема 1. Скінченно-різницева апроксимація рівнянь у частинних похідних	8	4					4
Тема 2. Різні методи побудови скінченно-різницевої схем	4	2					2
Тема 3. Стійкість скінченно-різницевої схем	4	2					2
Разом за розділом 2	16	8					8
<b>Розділ 3. Застосування методу скінченних різниць для розв'язання модельних рівнянь</b>							
Тема 1. Хвильове рівняння	4	2					2
Тема 2. Рівняння теплопровідності	4	2					2
Тема 3. Рівняння Лапласа	10	5					5
Тема 4. Рівняння Бюргерса (нев'язка течія)	10	5					5
Тема 5. Рівняння Бюргерса (в'язка течія)	10	5					5
Разом за розділом 3	8	4					4
<b>Розділ 4. Основні рівняння рідини та теплообміну</b>							
Тема 1. Рівняння Рейнольдса для турбулентної течії	4	2					2
Тема 2. Рівняння пограничного шару	8	4					4
Тема 3. Рівняння Ейлера	4	2					2
Разом за розділом 4	16	8					8
<b>Розділ 5. Чисельні методи розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса</b>							
Тема 1. Рівняння Нав'є-Стокса для стисливої рідини	8	4					4
Тема 2. Рівняння Нав'є-Стокса для нестисливої рідини	4	2					2
Разом за розділом 5	12	6					6
<b>Усього годин</b>	<b>90</b>	<b>45</b>					<b>45</b>

#### 4. Завдання для самостійної роботи

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Нові методи визначення теплофізичних властивостей робочих тіл	7
2	Нові матеріали, що використовуються або можуть бути використані в енергомашинобудуванні	7
3	Нові методи експериментального дослідження деталей та вузлів енергообладнання	9

4	Основні сучасні напрямки розвитку науки про чисельні методи у гідродинаміці	2
5	Виконання розрахунків течії рідини у проточних частинах енергообладнання	2
6	Виконання розрахунків течії газу у проточних частинах енергообладнання	2
7	Визначення теплофізичних характеристик робочих тіл	2
8	Неявна скінченно-об'ємна апроксимація модифікованих рівнянь	2
9	Чисельна реалізація крайових умов	4
10	Метод розв'язання рівнянь к-е моделі турбулентності	2
11	Чисельна реалізація методу пристіночних функцій	4
12	Турбулентна течія у плоскому каналі	2
	Разом	45

### 5. Методи контролю

На заняттях – опитування. По закінченні вивчення розділу – усний контроль. Форма підсумкового контролю знань — залік.

### 6. Схема нарахування балів

Поточне тестування															Залік	Сума	
Розділ 1		Розділ 2			Розділ 3					Розділ 4			Розділ 5		Разом		
T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15			
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	10	80	20	100

T1, T2 ... – теми розділів.

### Шкала оцінювання

Сума балів за всі види навчальної діяльності протягом семестру	Оцінка
	для заліку
50 – 100	Зараховано
0–49	Не зараховано

### 7. Рекомендована література

1. Аэродинамический расчёт и оптимальное проектирование проточной части турбомашин: монография / А. В. Бойко [и др.]. – Харьков : НТУ«ХПИ», 2002. – 356 с
2. Многокритериальная многопараметрическая оптимизация проточной части осевых турбин с учетом режимов эксплуатации: монография / А. В. Бойко, А. П. Усатый, А. С. Руденко. – Харьков : Изд-во «ПідручникНТУ “ХПІ”», 2014. – 220 с.
3. Бойко А.В. Аэродинамика проточной части паровых и газовых турбин: расчёты, исследования, оптимизация, проектирование / А. В. Бойко, А. В. Гаркуша. – Х.: ХГПУ, 1999. – 360 с.
4. Вычислительная гидромеханика и теплообмен, Том 1, 2, Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р., 1990.
5. Русанов А.В. Математическое моделирование нестационарных газодинамических процессов в проточных частях турбомашин / А.В. Русанов, С.В. Ершов // Монография. – Харьков, ИПМаш НАН Украины, 2008. – 275 с

### Основна література

1. Cedar R. D., Stow P., “A compatible mixed design and analysis finite element method for the design of turbomachinery blades”, *Internat. J. Numer. Methods in Fluids*, 5 (1985), 331–345
2. Вольп Г., Мельник Р. Е., “Метод проектирования замкнутых профилей с произвольным сверхкритическим распределением скоростей”, *Аэрокосмич. техн.*, 1987, № 4, 66–76
3. Самойлович Г. С. Переменные и переходные режимы в паровых турбинах / Г. С. Самойлович, Б. М. Трояновский. – М. : Энергоиздат, 1982. – 494 с.
4. Арзуманов А.М. Многорежимная оптимизация проточной части паровой турбины с учётом изменения параметров тепловой схемы / А. М. Арзуманов, К. Л. Лапшин // *Теплоэнергетика*. – 2003. – No 12. – С. 68–71.

### Допоміжна література

1. Rusanov A.V. The new implicit ENO method for 3D viscous multi stage flow calculations / A.V. Rusanov, S.V. Yershov // *Computational Fluid Dynamics '96. Proc. 3rd ECCOMAS Computational Fluid Dynamics Conf.*, September 9–13, 1996, Paris, France. – 1996. – P. 911–916.
2. Rusanov A.V. Numerical method for calculation of 3d viscous turbomachine flow taking into account stator // rotor unsteady interaction / A.V. Rusanov, S.V. Yershov / *The 4th Colloq. Process Simulation*, ed. A. Jokilaakso, 11–13 June 1997, Espoo, Finland, 1997. – P. 179–197.
3. Calculations of 3D viscous compressible turbomachinery flows / S. Yershov, A. Rusanov, A. Gardzilewicz, P. Lampart // *Proc. 2nd Symp. on Comp. Technologies for Fluid/Thermal/Chemical Systems with Industrial Applications, ASME PVP Division Conf.*, 1-5 August 1999, Boston, USA, PVP – 1999. – Vol. 397.2. – P. 143 – 154.
4. Investigations of flow characteristics of an HP turbine stage including the effect of tip leakage and windage flows using a 3D Navier-Stokes solver with source/sink-type boundary conditions / P. Lampart, A. Gardzilewicz, S. Yershov, A. Rusanov // *Proc. 2000 Int. Joint Power Generation Conf. Miami Beach, Florida, July 23-26, 2000.* – IJPGC2000-15004. – P. 1 – 8.
5. The comparison of performance of the Menter shear stress transport and Baldwin-Lomax turbulence models with respect to CFD prediction of losses in HP axial turbine stages / P. Lampart, J. Świryczuk, A. Gardzilewicz, S. Yershov, A. Rusanov // *Technologies for Fluid/Thermal/Structural/Chemical Systems with Industrial Applications, ASME 2001, PVP- Vol. 424-2*, P. 1 – 12.

### 8. Посилання на інформаційні ресурси в Інтернеті, відео-лекції, інше методичне забезпечення

1. Обзор новых возможностей программных продуктов ANSYS/CFX для задач вычислительной аэродинамики/  
<https://sapr.ru/article/6937>
2. Вычислительная гидродинамика/  
<https://www.cadfem-cis.ru/products/ansys/fluids/>
3. Развитие методов численного моделирования пространственных течений жидкости и газа для решения актуальных фундаментальных задач, связанных с проектированием перспективных аэрогидродинамических установок/  
[https://www.rfbr.ru/rffi/ru/project\\_search/o\\_247171](https://www.rfbr.ru/rffi/ru/project_search/o_247171)
4. Бібліотека ПІМаш НАН України.