

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-енергетичний факультет

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

ТЕПЛОТЕХНІКА

**методичні рекомендації для виконання самостійної роботи
здобувачами вищої освіти ступеня «бакалавр»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка» денної та заочної форм навчання**

МИКОЛАЇВ
2017

УДК 621.1.016

Т34

Рекомендовано науково-методичною комісією інженерно-енергетичного факультету МНАУ, протокол № 10 від «11» травня 2017 р.

Укладач:

О. С. Кириченко – канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Миколаївського національного аграрного університету.

Рецензенти:

І. М. Сідорика – канд. техн. наук, доцент кафедри теоретичних основ електротехніки та електронних систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова;

І. С. Білюк – канд. техн. наук, доцент кафедри автоматики Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.

© Миколаївський національний аграрний університет, 2017

Зміст

Вступ	4
1. Основні завдання самостійної роботи з дисципліни «Теплотехніка»	5
2. Розподіл часу вивчення дисципліни	9
3. Планування самостійної роботи	10
4. Організація самостійної роботи	16
5. Приклади розрахункових завдань на самостійну роботу	17
6. Питання для самостійного контролю знань	30
Рекомендована література	32

Вступ

Основна мета даних методичних рекомендацій полягає у наданні допомоги студентам у засвоєнні матеріалу дисципліни “Теплотехніка” під час самостійного виконання розрахункових робіт. Матеріал, наведений у рекомендаціях, узгоджений з навчальним планом спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», затвердженим Департаментом вищої освіти Міністерства освіти і науки України та робочою навчальною програмою дисципліни, розробленою на кафедрі електроенергетики, електротехніки та електромеханіки та затвердженою методичною комісією Миколаївського національного аграрного університету. Тематика розрахункових прикладів самостійних завдань з дисципліни та методичні рекомендації до їх виконання складено таким чином, щоб допомогти студентам денної і заочної форм навчання оволодіти складними для засвоєння темами робочої навчальної програми. Самостійна робота та, зокрема, самостійне виконання розрахункових завдань передбачає попереднє вивчення теоретичного матеріалу, а також набуття навичок теплотехнічних розрахунків на практичних заняттях. Література до самостійної роботи обиралася з літературних джерел робочої навчальної програми дисципліни за принципами наявності у бібліотечному фонді, вичерпності, сучасності, ясності та стислості подання матеріалу.

1. Основні завдання самостійної роботи з дисципліни “Теплотехніка”

Курс “Теплотехніка” належить до числа дисциплін циклу природничо-наукової підготовки спеціальності 141 “Електронергетика, електротехніка та електромеханіка”, які визначають теоретичний рівень фахівців у галузях технічної термодинаміки та основ теорії тепло- і масообміну.

Вивчення вказаного курсу базується на знаннях, одержаних з курсів «Фізика», «Вища математика», «Теоретичні основи електротехніки», а його метою є оволодіння основами функціонування теплотехнічного устаткування енергетики.

Програма курсу “Теплотехніка” містить 2 модулі.

Модуль 1. Технічна термодинаміка.

В модулі 1 розглядаються наступні питання:

1. Предмет та метод технічної термодинаміки. Основні поняття та їх визначення. Робоче тіло. Ідеальний та реальний газ. Термодинамічна система. Термодинамічний стан. Рівноважний і нерівноважний стани. Параметри стану. Термодинамічний процес і його характеристики. Круговий процес. Рівняння стану ідеального газу.

2. Газові суміші. Закон Дальтона. Газова стала, середня молярна маса суміші газів. Робота і теплота як форми передачі енергії. Аналітичні вирази для обчислення роботи та кількості теплоти в термодинамічних процесах. Масова, мольна, об'ємна теплоємність та залежність між ними. Теплоємність сталого об'єму суміші газів.

3. Перший закон термодинаміки. Аналітичний вираз першого закону термодинаміки. Дві форми запису в диференціальному вигляді. Основне рівняння термодинаміки. Аналіз термодинамічних процесів ідеальних газів. Ізохорний, ізобарний, ізотермний і адіабатний процеси. Політропний процес та його узагальнююче значення.

4. Другий закон термодинаміки, його зміст та формулювання. Прямий та зворотний цикли. Термічний ККД і холодильний коефіцієнт. Аналіз кругових термодинамічних процесів: прямий цикл Карно, еквівалентний цикл Карно, узагальнюючий (регенеративний) цикл Карно. Зворотний цикл Карно. Зміна ентропії в ізольованій та неізольованій термодинамічній системі. Математичний вираз другого закону термодинаміки. Роботоздатність термодинамічної системи. Ексергія. Ексергетичний аналіз циклів.

5. Термодинамічні властивості і процеси реальних газів. Загальні властивості реальних газів. Процеси пароутворення. Основні поняття і визначення. Рівняння стану. Діаграми P-V, T-S, H-d для води і водяної пари. Вологе повітря. Основні характеристики вологого повітря та їх визначення: абсолютна вологість, відносна вологість, вологовміст, густина, ентальпія. H-d діаграма вологого повітря. Основні процеси вологого повітря: нагрівання, охолодження, адіабатне зволоження, змішування вологого повітря різних станів.

6. Термодинаміка потоку газів і пари. Рівняння першого закону термодинаміки для потоку. Витікання газів і пари із звужувального сопла, швидкість витікання, масові витрати. Критична швидкість. Комбіноване сопло Лаваля. Основні закономірності течії газу і пари в соплах і дифузорах. Процеси витікання водяної пари в T-S діаграмі. Параметри загальмованого потоку.

7. Дроселювання газів. Сутність процесу. Диференціальний дросель-ефект. Температура інверсії. Процес дроселювання в p-z діаграмі.

8. Термодинамічний аналіз процесів у компресорах. Процеси стиснення в ідеальному компресорі. Робота компресора. Багатоступінчасте стиснення. Зображення процесів стиснення в P-V і T-S діаграмах. Цикли теплових двигунів. Термодинамічна ефективність циклів. Теоретичні цикли двигунів внутрішнього згоряння з підведенням теплоти: за умов сталого об'єму, сталого тиску та змішаного підведення теплоти. Термічний ККД циклів. Порівняння циклів.

9. Цикли паросилових установок. Принципова схема паросилової установки. Цикл Ренкіна, його зображення в P-V і T-S діаграмах, термічний ККД. Шляхи підвищення економічності паросилових установок. Термодинамічні основи теплофікації.

10. Цикли холодильних установок і теплових насосів. Принципова схема і цикл парокомпресорної холодильної установки. Холодильний коефіцієнт. Абсорбційні холодильні установки. Принципова схема та цикл теплового насосу. Коефіцієнт перетворення теплоти.

Модуль 2. Основи теорії тепло- та масообміну.

В модулі 2 розглядаються наступні питання:

1. Загальні відомості з теорії тепло- і масообміну. Способи переносу теплоти: теплопровідність, конвективний теплообмін, теплове випромінювання. Основні положення теплопровідності: температурне поле – стаціонарне і нестаціонарне, одно-, дво- і тривимірне, градієнт температури. Закон Фур'є, коефіцієнт теплопровідності. Диференціальне рівняння теплопровідності.

2. Температуропровідність. Умови однозначності розв'язку. Теплопровідність плоскої та циліндричної стінок за граничних умов першого і третього роду. Теплопередача. Коефіцієнт теплопередачі. Термічний опір теплопровідності та теплопередачі. Інтенсифікація теплопередачі. Теплопровідність тіл з внутрішніми джерелами теплоти. Загальні принципи аналітичних і числових методів розв'язку задач теплопровідності.

3. Конвективний теплообмін. Закон Ньютона-Ріхмана. Коефіцієнт тепловіддачі. Термічний опір тепловіддачі. Диференціальне рівняння конвективного теплообміну. Основи теорії подібності. Моделювання. Тепловіддача за різних умов руху рідини і обтікання тіл. Теплообмін під час зміни агрегатного стану. Теплообмін під час кипіння.

4. Бульбашкове та плівкове кипіння. Залежність інтенсивності теплообміну від температурного напору. Теплообмін під час конденсації пари; плівкова і краплинна конденсація. Інтенсифікація процесів Теплообмінні

апарати. Класифікація теплообмінних апаратів. Основні положення теплового розрахунку.

5. Рівняння теплопередачі і теплових балансів теплоносіїв. Водяний еквівалент. Середній температурний напір за умов прямотруминного та протиструминного руху теплоносіїв. Особливості розрахунку теплообмінних апаратів.

6. Основи масообміну. Основні положення. Молекулярний перенос маси Кінетичні коефіцієнти переносу в різних середовищах. Густина потоку маси Закон Фіка. Диференціальне рівняння тепломасообміну. Коефіцієнт масообміну. Числа подібності в масообміні. Аналогія процесів теплообміну та масообміну Визначення потоків переносу маси і енергії.

На основі знань, отриманих при вивченні дисципліни “Теплотехніка” базуються курси циклу професійної та практичної підготовки: “Основи електропостачання”, “Електротехнології в АПК”, “Основи моделювання енергетичних систем”, “Електричні мережі та підстанції”, “Проектування систем електрифікації, автоматизації та енергопостачання АПК”, “Електроустановки і системи електропостачання”, “Пристрої автоматики систем електропостачання”, “Малі електростанції в АПК” та ін. Тому даний курс має підготувати студентів до розробки і аналізу різного за ступенем складності теплотехнічного устаткування енергетичних систем. Згідно з освітньо-кваліфікаційною програмою підготовки фахівців спеціальності 141 “Електронергетика, електротехніка та електромеханіка” в результаті вивчення дисципліни “Теплотехніка” студент повинен вміти:

– виконувати розрахунки теплотехнічного устаткування об'єктів та систем енергетики;

– вирішувати практичні завдання по монтажу та експлуатації теплогенеруючих установок та систем тепло- і газопостачання.

Складовою частиною засвоєння цих знань є самостійна робота. Самостійна робота з дисципліни передбачають попереднє опрацювання лекційного матеріалу та практичних занять за вказаними наприкінці посібника

літературними джерелами, оскільки засвоєння матеріалу великою мірою визначається саме аудиторними лекційними та практичними заняттями. Розвинути навички розрахунків та закріпити теорію допомагає виконання самостійних розрахункових завдань, що полягають у вирішенні розрахункових задач та моделюванні теплотехнічного устаткування об'єктів і систем енергетики.

2. Розподіл часу вивчення дисципліни

Навчальним планом спеціальності 141 “Електроненергетика, електротехніка та електромеханіка” передбачається наступна структура розподілу часу для вивчення матеріалу з дисципліни “Теплотехніка” (табл. 1).

Таблиця 1

Розподіл часу вивчення дисципліни “Теплотехніка” (витяг з навчального плану)

Назва дисципліни	Форма контролю, семестр	Загальний обсяг годин	Обсяг аудиторних годин	Аудиторні заняття, годин			Самостійна робота, годин
	Іспит			Лекції	Практичні заняття	Лабораторні заняття	
Теплотехніка	5-й	150	87	23	32	32	63

Таким чином, самостійна робота становить понад 40 відсотків часу вивчення дисципліни (63 години) протягом семестру. Цей час розподілено між двома вищезазначеними модулями дисципліни “Теплотехніка”.

3. Планування самостійної роботи

У плані самостійної роботи передбачається, згідно з календарним планом, самостійне виконання розрахункових завдань рішення типових завдань, проробка конспектів та навчальних посібників. Частина часу відведена на виконання розрахунково-графічних завдань з використанням академічних версій систем автоматизованого проектування.

Контроль над виконанням самостійної роботи здійснюється шляхом перевірки розрахункових (розрахунково-графічних) завдань і/або опитуванням чи тестуванням.

Рекомендоване планування часу практичних занять студентів з дисципліни “Теплотехніка” наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Рекомендований розподіл часу на самостійну роботу для засвоєння теоретичних знань та практичних навичок з дисципліни “Теплотехніка”

№ з/п	Тема самостійної роботи за навчальним планом	Літературні джерела для загального опрацювання теми	Завдання для засвоєння матеріалу	Література до виконання самостійного завдання	Час опрацювання матеріалу, годин
1	Предмет та метод технічної термодинаміки. Основні поняття та їх визначення. Робоче тіло. Ідеальний та реальний газ. Термодинамічна система.	[1-9]	Самостійно виконаний розрахунок за поточною темою самостійної роботи.	[1-9]	4
2	Газові суміші. Закон Дальтона. Газова стала, середня молярна	[1-9]	Самостійно виконаний розрахунок за поточною темою	[1-9]	4

	<p>маса суміші газів. Робота і теплота як форми передачі енергії. Аналітичні вирази для обчислення роботи та кількості теплоти в термодинамічних процесах. Масова, мольна, об'ємна теплоємність та залежність між ними. Теплоємність сталого об'єму суміші газів.</p>		самостійної роботи.		
3	<p>Перший закон термодинаміки. Аналітичний вираз першого закону термодинаміки. Дві форми запису в диференціальному вигляді. Основне рівняння термодинаміки. Аналіз термодинамічних процесів ідеальних газів.</p>	[1-9]	Самостійно виконаний розрахунок за поточною темою самостійної роботи.	[1-9]	4
4	<p>Другий закон термодинаміки, його зміст та формулювання. Прямий та зворотний цикли. Термічний ККД і холодильний коефіцієнт. Аналіз кругових термодинамічних процесів: прямий цикл Карно, еквівалентний</p>	[1-9]	Самостійно виконаний розрахунок за поточною темою самостійної роботи.	[1-9]	4

	цикл Карно, узагальнюючий (регенеративний) цикл Карно. Зворотний цикл Карно. Роботоздатність термодинамічної системи. Ексергія. Ексергетичний аналіз циклів.				
5	Термодинамічні властивості і процеси реальних газів. Загальні властивості реальних газів. Процеси пароутворення. Основні поняття і визначення. Рівняння стану. Діаграми P-V, T-S, H-d для води і водяної пари.	[1-9]	Самостійно виконаний розрахунок за поточною темою самостійної роботи.	[1-9]	4
6	Термодинаміка потоку газів і пари. Рівняння першого закону термодинаміки для потоку. Витікання газів і пари із звужувального сопла, швидкість витікання, масові витрати. Критична швидкість. Комбіноване сопло Лавалю. Основні закономірності течії газу і пари в соплах і дифузорах. Процеси витікання водяної пари в T-S	[1-9]	Самостійно виконаний розрахунок за поточною темою самостійної роботи.	[1-9]	4

	діаграмі. Параметри загальмованого потоку.				
7	Дроселювання газів. Сутність процесу. Диференціальний дросель-ефект. Температура інверсії. Процес дроселювання в п-з діаграмі.	[1-9]	Самостійно виконаний розрахунок за поточною темою самостійної роботи.	[1-9]	4
8	Термодинамічний аналіз процесів у компресорах. Процеси стиснення в ідеальному компресорі. Робота компресора. Багатоступінчасте стиснення. Зображення процесів стиснення в P-V і T-S діаграмах. Цикли теплових двигунів. Термодинамічна ефективність циклів.	[1-9]	Самостійно виконаний розрахунок за поточною темою самостійної роботи.	[1-9]	4
9	Цикли паросилових установок. Принципова схема паросилової установки. Цикл Ренкіна, його зображення в P-V і T-S діаграмах, термічний ККД. Шляхи підвищення економічності паросилових установок. Термодинамічні	[1-9]	Самостійно виконаний розрахунок за поточною темою самостійної роботи.	[1-9]	4

	основи теплофікації.				
10	Цикли холодильних установок і теплових насосів. Принципова схема і цикл парокомпресорної холодильної установки. Холодильний коефіцієнт. Абсорбційні холодильні установки. Принципова схема та цикл теплового насосу. Коефіцієнт перетворення теплоти.	[1-9]	Самостійно виконаний розрахунок за поточною темою самостійної роботи.	[1-9]	4
11	Загальні відомості з теорії тепло- і масообміну. Способи переносу теплоти: теплопровідність, конвективний теплообмін, теплове випромінювання Основні положення теплопровідності: температурне поле - стаціонарне і нестаціонарне, одно-, дво- і тривимірне, градієнт температури.	[1-9]	Самостійно виконаний розрахунок за поточною темою самостійної роботи.	[1-9]	4
12	Температуропровідність. Умови однозначності розв'язку.	[1-9]	Самостійно виконаний розрахунок за поточною темою	[1-9]	4

	<p>Теплопровідність плоскої та циліндричної стінок за граничних умов першого і третього роду. Теплопередача. Коефіцієнт теплопередачі. Термічний опір теплопровідності та теплопередачі. Інтенсифікація теплопередачі.</p>		самостійної роботи.		
13	<p>Конвективний теплообмін. Закон Ньютона-Ріхмана. Коефіцієнт тепловіддачі. Термічний опір тепловіддачі. Диференціальне рівняння конвективного теплообміну. Основи теорії подібності. Моделювання. Тепловіддача за різних умов руху рідини і обтікання тіл.</p>	[1-9]	Самостійно виконаний розрахунок за поточною темою самостійної роботи.	[1-9]	4
14	<p>Бульбашкове та плівкове кипіння. Залежність інтенсивності теплообміну від температурного напору.</p>	[1-9]	Самостійно виконаний розрахунок за поточною темою самостійної роботи.	[1-9]	4
15	<p>Рівняння теплопередачі і теплових балансів теплоносіїв. Водяний</p>	[1-9]	Самостійно виконаний розрахунок за поточною темою самостійної	[1-9]	4

	еквівалент.		роботи.		
16	Основи масообміну. Основні положення. Молекулярний перенос маси Кінетичні коефіцієнти переносу в різних середовищах. Густина потоку маси Закон Фіка.	[1-9]	Самостійно виконаний розрахунок за поточною темою самостійної роботи.	[1-9]	3
	Разом:				63

4. Організація самостійної роботи

Шістдесят три години самостійної роботи, які заплановані на весь час вивчення дисципліни протягом семестру, розподілено приблизно пропорційно до кількості тижнів навчання у дев'ятому семестрі (14). Тому у середньому на практичне заняття з дисципліни припадає приблизно 4,5 години на тиждень. Важливо, щоб цей час був використаний у режимі найвищої ефективності засвоєння матеріалу. У великій мірі цьому сприяє правильна організація самостійної роботи.

Для досягнення цього необхідно: по-перше, заздалегідь подбати про наявність літератури для самостійної роботи; по-друге, лекційний матеріал має опрацьовуватися в день його подання в аудиторії або, у крайньому випадку, наступного дня; по-третє, бажано, щоб до самостійної роботи студенти приступали через невеликий проміжок після лекційного заняття за відповідною тематикою. В такому разі з'ясується більшість питань і підготовка до самостійної роботи вимагає менше часу. Крім того, з'являється додаткова можливість вирішити незрозумілі питання під час занять. Самостійні розрахунки з теплотехніки рекомендовано виконувати із застосуванням сучасної літератури, обчислювальних пристроїв і систем автоматизованого

проектування. Результати самостійної роботи необхідно ретельно аналізувати. Результати опрацювання лекційного матеріалу занотовуються у вигляді тез, виписок з підручників та монографій. Найбільш складні питання розтлумачуються повністю у письмовому вигляді або у вигляді електронного набору. Самостійна робота з теми завершується відповіддю на питання для контролю знань. У подальшому весь матеріал, напрацьований під час самостійної роботи, використовується для підготовки до виконання звітів і розрахункових (розрахунково-графічних) завдань, іспиту з дисципліни.

5. Приклади розрахункових завдань на самостійну роботу

5.1. Розрахунок теплового балансу котельного агрегату

В топці котельного агрегату паропродуктивністю $D = 13,4$ кг/с спалюється вугілля з наступним складом: $C^p = 27,4$ %; $H^p = 2,8$ %; $S_{II}^p = 3,1$ %; $N^p = 2$ %; $O^p = 10$ %; $A^p = 20$ %; $W^p = 29,5$ %.

Скласти тепловий баланс котельного агрегату, якщо відомі температура палива при вході в топку $t_{II} = 20$ °С, натуральні витрати палива $B = 4$ кг/с, тиск перегрітої пари $p_{II,II} = 4$ МПа, температура перегрітої пари $t_{II,II} = 450$ °С, температури живильної води $t_{ж.в} = 150$ °С, величина безперервної продувки $P = 4$ %; теоретичний об'єм повітря, який необхідний для згоряння 1 кг палива $V^0 = 2,94$ м³/кг, об'єм газів на виході з останнього газоходу $V_{вих} = 4,86$ м³/кг, температура газів на виході з останнього газоходу $\vartheta = 160$ °С, середня об'ємна теплоємність газів при постійному тиску $c'_{вих} = 1,415$ кДж/(м³·К), коефіцієнт надлишку повітря за останнім газоходом $\alpha_{вих} = 1,48$, температура повітря в котельній $t_{II} = 30$ °С, середня об'ємна теплоємність повітря в вихідних газах оксиду вуглецю $CO = 0,2$ % і триатомних газів $RO_2 = 16,6$ % і втрати теплоти

від механічної неповноти згоряння палива $q_4 = 4\%$. Втратами теплоти з фізичною теплотою шлаків знехтувати.

Методика розв'язку:

Тепловим балансом котельного агрегату називають розподіл теплоти, що вноситься в котлоагрегат при спалюванні палива, на корисно використане тепло і теплові втрати. Тепловий баланс складається на 1 кг твердого (рідкого) палива або на 1 м³ газоподібного палива для сталого теплового стану котельного агрегату.

Рівняння теплового балансу (кДж/кг, кДж/м³) має вигляд:

$$Q_p^p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6,$$

де Q_p^p – наявна теплота;

$Q_1(q_1)$ – теплота, що корисно використана в котлоагрегаті на отримання пари; $Q_2(q_2)$ – втрати теплоти з вихідними газами; $Q_3(q_3)$ – втрати теплоти від хімічної неповноти згоряння палива; $Q_4(q_4)$ – втрати теплоти від механічної неповноти згоряння палива; $Q_5(q_5)$ – втрати теплоти в оточуюче середовище; $Q_6(q_6)$ – втрати теплоти з фізичною теплотою шлаку.

Рівняння теплового балансу в відсотках від наявної теплоти палива:

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 = 100,$$

де $q_1 = (Q_1/Q_p^p)100$; $q_2 = (Q_2/Q_p^p)100$ і т.д.

Нижча теплота згоряння робочої маси палива визначається за формулою:

$$Q_H^p = 338C^p + 1025H^p - 108,5(O^p - S_n^p) - 25W^p, \text{ кДж/кг.}$$

Теплоємність робочої маси палива визначається за формулою:

$$c_T^p = c_T^c(100 - W^p)/100 + C_{H_2O}W^p/100, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К).}$$

Фізична теплота палива визначається за формулою:

$$Q_{тл} = c_T^p t_T, \text{ кДж/кг.}$$

Наявна теплота знаходиться за формулою:

$$Q_p^p = Q_n^p + Q_{тл}, \text{ кДж/кг.}$$

Теплота, що корисно використовується в котлоагрегаті, визначається формулою:

$$Q_1 = (D_{пе} / B) [(i_{п.п} - i_{ж.в}) + (P/100)(i_{к.в} - i_{ж.в})], \text{ кДж/кг,}$$

де $D_{пе}$ – витрати перегрітої пари;

$i_{п.п.}$ – ентальпія пара (прийняти $i_{п.п.} = 3300$ кДж/кг);

$i_{п.в.}$ – ентальпія живильної води (прийняти $i_{п.в.} = 632$ кДж/кг);

$i_{к.в.}$ – ентальпія котлової води (прийняти $i_{к.в.} = 1087,5$ кДж/кг);

B – витрати натурального палива; P – величина безперервної продувки.

Витрати перегрітої пари можна порівняти до паропродуктивності

$D_{пе} = D$, оскільки відсутній відбір насиченої пари.

Втрати теплоти з вихідними газами знаходимо за формулою:

$$Q_2 = (V_{вих} c'_{рух} \vartheta_{вих} - \alpha_{вих} V^0 c'_{рв} t_{п}) (100 - q_4) / 100, \text{ кДж/кг,}$$

де $V_{вих}$ – об'єм вихідних (димових) газів на виході з останнього газоходу котлоагрегату; $c'_{рух}$ – середня об'ємна теплоємність газів при постійному тиску; $\vartheta_{вих}$ – температура вихідних газів на виході з останнього газоходу; $\alpha_{вих}$ – коефіцієнт надлишку повітря за котлоагрегатом; V^0 – теоретичний об'єм повітря, необхідний для згоряння 1 кг палива; $t_{п}$ – температура повітря в котельній.

Втрати теплоти від хімічної неповноти згоряння палива визначається за формулою:

$$Q_3 = 237(C^p + 0,375S_n^p)CO / (RO_2 + CO), \text{ кДж/кг.}$$

Втрати теплоти від механічної неповноти згоряння палива за формулою:

$$Q_4 = q_4 Q_p^p / 100, \text{ кДж/кг.}$$

Втрати теплоти в оточуюче середовище визначаємо за формулою:

$$Q_5 = Q_p^p - (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4), \text{ кДж/кг.}$$

Складові теплового балансу:

$$q_1 = (Q_1 / Q_p^p) 100, \%;$$

$$q_2 = (Q_2 / Q_p^p) 100, \%;$$

$$q_3 = (Q_3 / Q_p^p) 100, \%;$$

$$q_5 = (Q_5 / Q_p^p) 100, \%.$$

Рівняння теплового балансу котельного агрегату

$$Q_p^p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5, \text{ кДж/кг.}$$

або у відсотках від наявної теплоти палива

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 = 100 \%.$$

5.2. Розрахунок температурного поля оребреного трубчастого нагрівача

Оребрені трубчасті нагрівачі (ТЕНи) типу ТЕНР (рис. 1) є необхідними елементами в промислових і побутових електрокалориферних установках різних типів (ЕКОЦ (СФОЦ), КЕВ, ЕК, СФО), конвекторах, теплових гарматах, теплових завісах і інших установках.

Конструкція оребрених ТЕНів представляє собою двокінцеву оребрену по всій поверхні або фрагментарно сталеву стрічку. Стрічка може бути виготовлена як з вуглецевої сталі марки 0.8Ю або 10 КП.

Велика різноманітність нагрівальних приладів вироблених як у нас в країні, так і за кордоном, обумовлено кліматичними умовами середньої смуги, в якій велику частину року становлять холодні місяці. Для обігріву великого ангара або складського приміщення, де немає можливості організувати централізоване опалення, вони знаходять широке використання в електрокалориферних установках.

Конструкція електрокалориферних установок наступна: на металевій рамі стоїть або осьовий, або відцентровий вентилятор, до якого приєднаний ящик з

ТЕНами (схема підключення – зірка – 220 В, або трикутник – 380 В), при цьому кількість ТЕНів залежить від об'єму, що обігривається. Повітря, що нагнітається вентилятором, проходячи через гарячі електронагрівачі, потрапляє в повітропровід, від нього – в систему повітропроводів, розподілених по приміщенню. Схожий принцип і в інших нагрівальних приладах, призначення яких – створити сприятливий клімат.



а



б

Рис. 1. Оребрені трубчасті ТЕНи: а – прямий; б – U-подібний

Технічні характеристики ТЕНів типу ТЕНР наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Технічні характеристики ТЕНів типу ТЕНР

Розгорнута довжина, см	Діаметр, мм	Середовище «О»				Середовище «S»			
		110 В	127 В	220 В	380 В	110 В	127 В	220 В	380 В
ТЕНР-32	10	0,63	0,63	–	–	0,4	0,4	–	–
	13	0,8	0,8	–	–	0,5	0,5	–	–

ТЕНР-45	10	1	1	1	–	0,63	0,63	–	–
	13	1,25	1,25	1,25	–	0,8	0,8	0,8	–
ТЕНР-54	10	1,25	1,25	1,25	–	0,8	0,8	0,8	–
	13	1,6	1,6	1,6	–	1	1	1	–
ТЕНР-60	10	1,5	1,5	1,5	1,5	0,8	0,8	0,8	–
	13	2	2	2	1,5	1	1	1	–
ТЕНР-71	10	1,6	1,6	1,6	1,6	1	1	1	–
	13	2	2,5	2,5	2,5	1,5	1,5	1,5	1,5
ТЕНР-80	10	2	2	2	2	1,25	1,25	1,25	1,25
	13	2	2,5	2,5	2,5	1,6	1,6	1,6	1,6
ТЕНР-85	10	2	2	2	2	1,25	1,25	1,25	1,25
	13	2	2,5	3	3	1,6	1,6	1,6	1,6
ТЕНР-100	10	2	2,5	2,5	2,5	1,6	1,6	1,6	1,6
	13	2	2,5	3,5	3,5	2	2	2	2
ТЕНР-125	10	2	2,5	3,15	3,15	2	2	2	2
	13	2	2,5	3,15	3,15	2	2	2	2
ТЕНР-140	10	–	2	3,5	3,5	1,6	2	2	2
	13	–	2	4	4	1,6	2	3	3
ТЕНР-170	10	–	1,6	4	4	1,25	1,6	2,5	2,5
	13	–	1,6	4	6,3	1,25	1,6	3,5	3,5

В табл. 3 зазначено два типи середовища: рухоме повітря, що рухається зі швидкістю не менше 6 м/с (О) та спокійного повітря (S).

ТЕНР представляє собою металеву трубку-корпус, всередині якого запресована в наповнювач спіраль з проводу високого омичного опору, прикріплена до контактних стержнів. Торці оребрень електрообігрівача герметизовані лаком, забезпечені ізоляційними втулками і контактним пристроєм. На поверхню електрообігрівача навита стрічка – ребра.

Розглянемо оребрений ТЕН типу ТЕНР модель ТЕНР-140. Його довжина становить 140 см, діаметр трубки 13 мм.

Виконаємо розрахунок температурного поля для 1/10 довжини нагрівача ТЕНР-140, тобто довжина моделі становитиме 14 см.

Просторова модель оребреного трубчастого електричного нагрівача та імпортована програмна модель трубчастого електричного нагрівача показані на рис. 2-3.

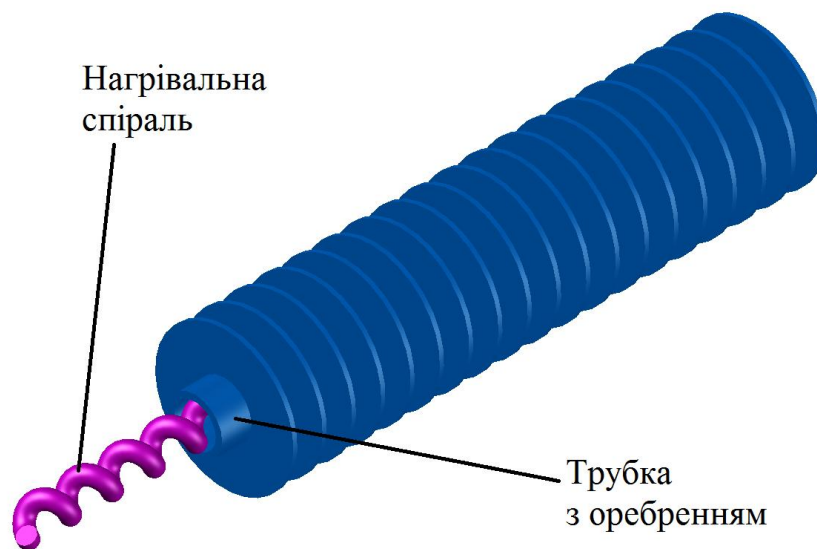


Рис. 2. Просторова модель оребреного трубчастого електричного нагрівача

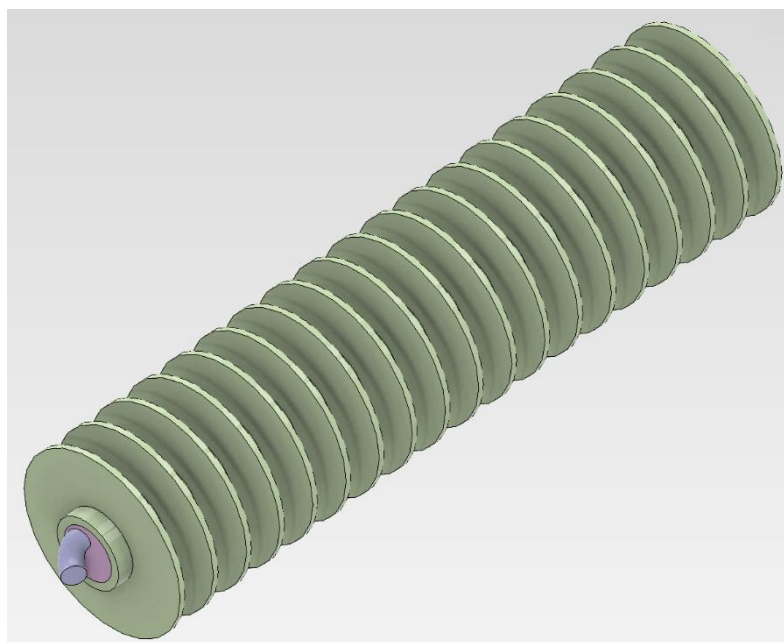


Рис. 3. Імпортована програмна модель трубчастого електричного нагрівача

Кінцево-елементну модель трубчастого електричного нагрівача зображено на рис. 4.

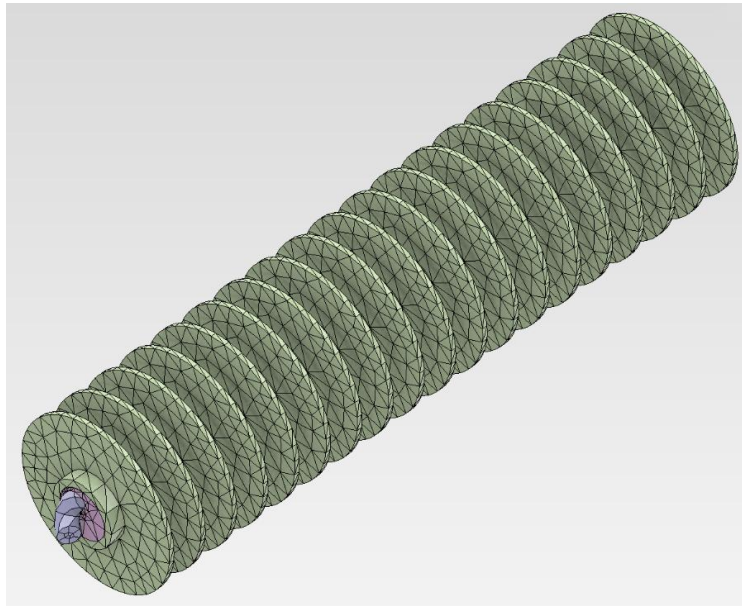


Рис. 4. Кінцево-елементна модель трубчастого електричного нагрівача

Нехай по металевій спіралі протікає струм величиною 200 А. Проаналізуємо теплові процеси, що відбуватимуться, для різного матеріалу спіралі: вольфрам, нікель, хром.

Розподіл електричного потенціалу наведено на рис. 5-6.

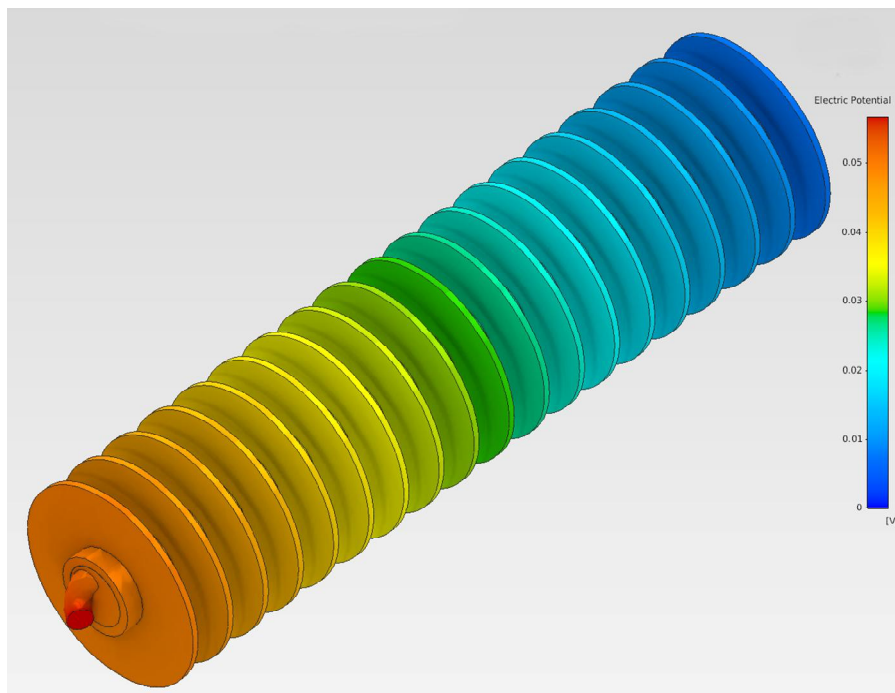


Рис. 5. Розподіл електричного потенціалу при застосуванні вольфрамової спіралі

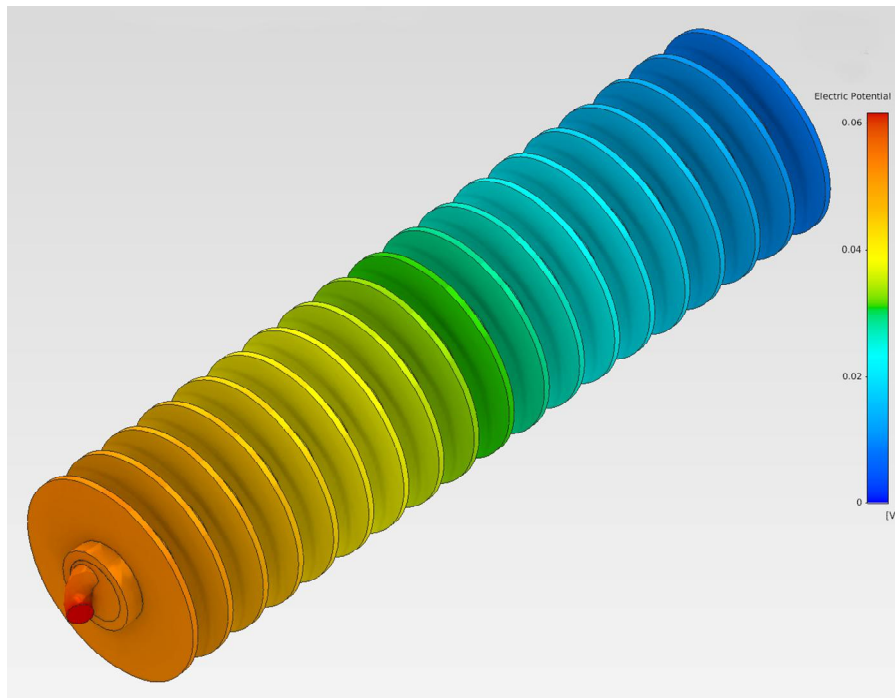


Рис. 6. Розподіл електричного потенціалу при застосуванні нікелевої спіралі

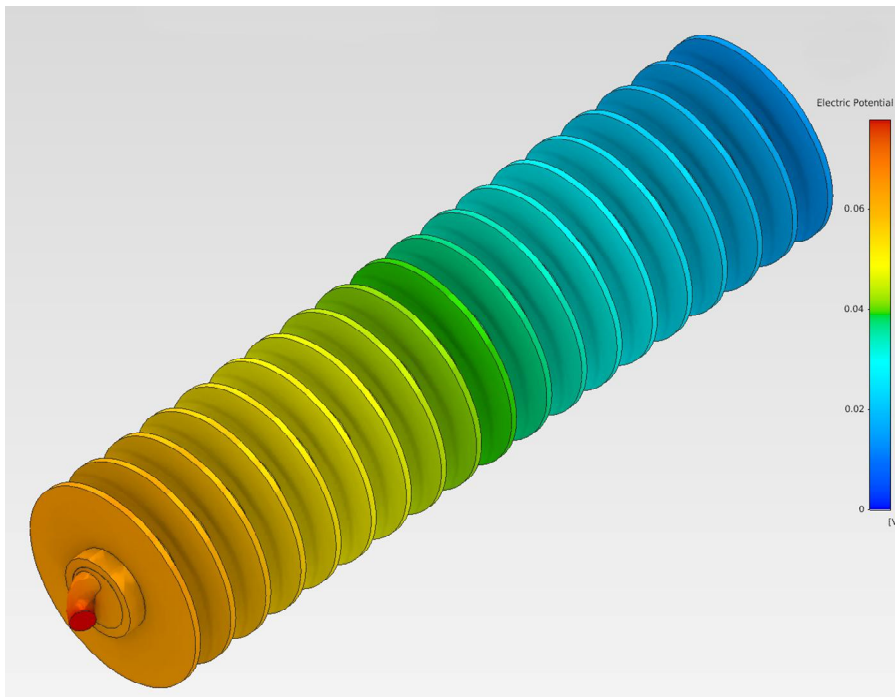


Рис. 7. Розподіл електричного потенціалу при застосуванні хромової спіралі

Як видно з рис. 5-7 розподіл електричного потенціалу для всіх трьох випадків однаковий.

Густина струму при застосуванні вольфрамової, нікелевої і хромової спіралі показана на рис. 8-10 відповідно.

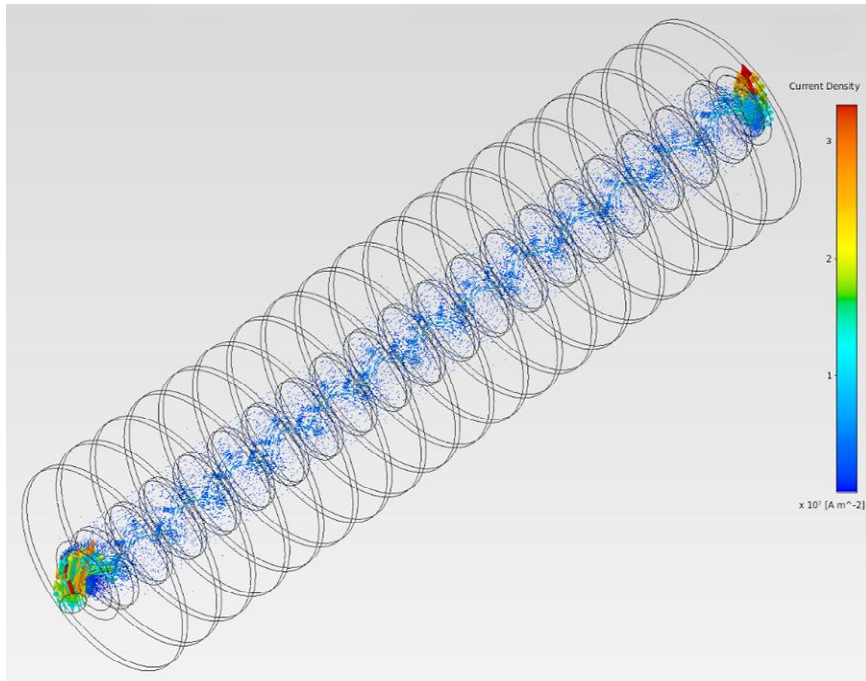


Рис. 8. Густина струму при застосуванні вольфрамової спіралі

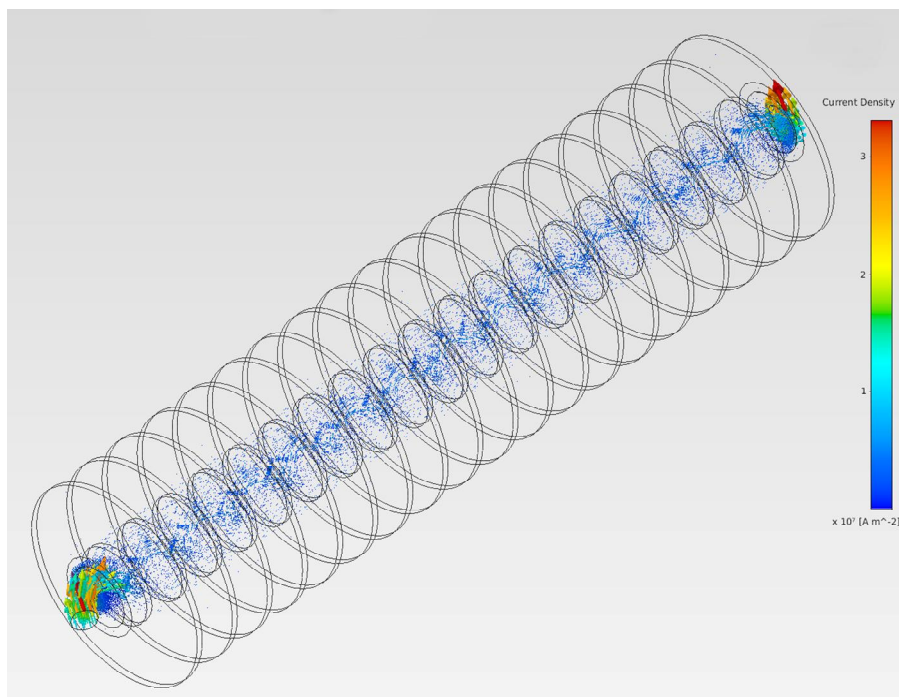


Рис. 9. Густина струму при застосуванні нікелевої спіралі

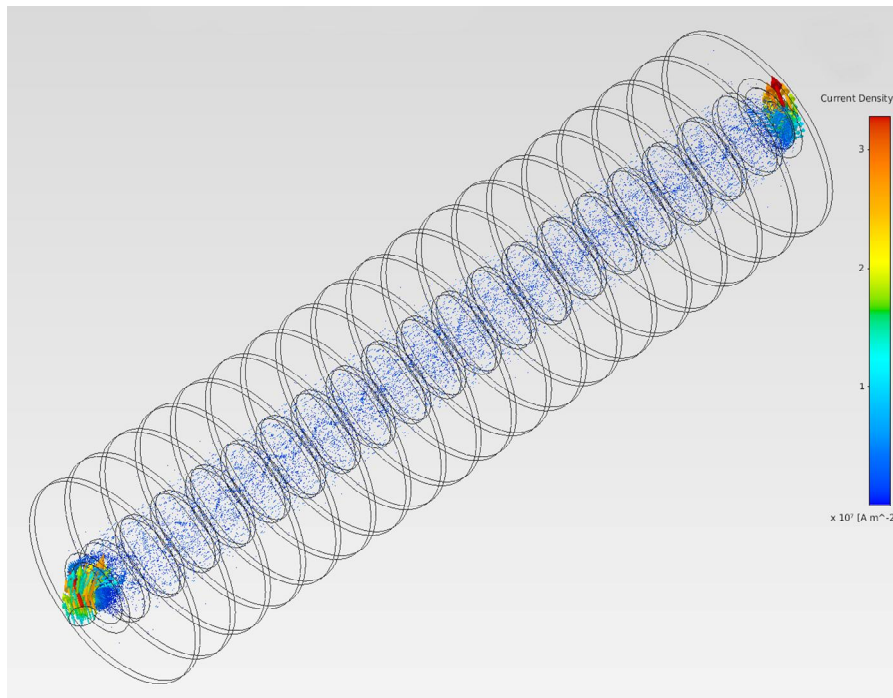


Рис. 10. Густина струму при застосуванні хромової спіралі

Слід зазначити, що питомий електричний опір вольфраму, нікелю та хрому було прийнято рівним $5,5 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, $6,9 \cdot 10^{-8}$ Ом·м та $1,32 \cdot 10^{-7}$ Ом·м відповідно.

Температура плавлення вольфраму, нікелю та хрому становлять 3422 °С, 1455 °С, 1907 °С відповідно.

Для сталі температура плавлення становить 1300-1500 °С. Якщо простір між сталеву оребрену трубку і нагрівальною спіраллю заповнити оксидом магнію, то необхідно вказати і його температуру плавлення, яка становить 2852 °С. При цьому зазначимо, що температура плавлення магнію становить лише 650 °С.

Нагрів спіралі ТЕНу при протіканні змінного струму в усталеному режимі буде рівномірним. Нерівномірність температурного поля, яка має місце на рисунках пов'язана з обраними граничними умовами розрахунку.

Розподіл температурного поля при застосуванні спіралі з вольфраму, нікелю та хрому показано на рис. 11-13 відповідно.

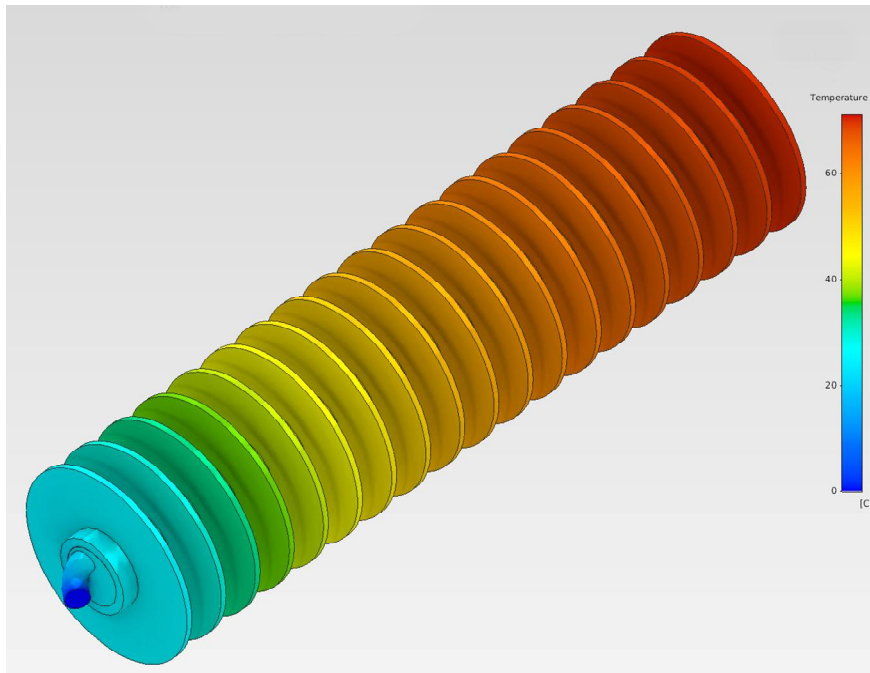


Рис. 11. Температурне поле при застосуванні вольфрамової спіралі

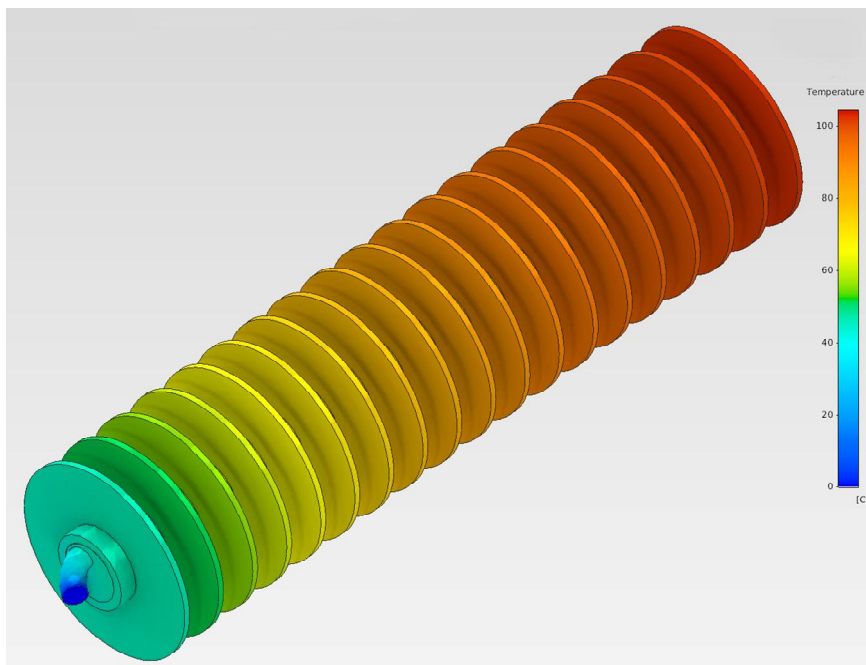


Рис. 12. Температурне поле при застосуванні нікелевої спіралі

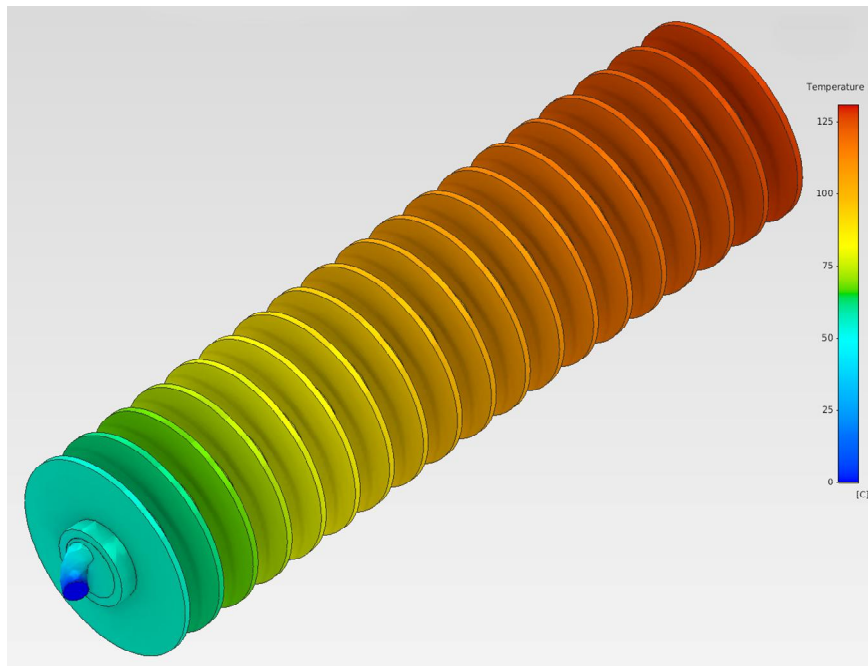


Рис. 13. Температурне поле при застосуванні хромової спіралі

З розподілу температурного поля на рис. 11-13 видно, що при застосуванні вольфрамової спіралі температура ділянки ТЕНу досягне 70 °С, при застосуванні нікелевої спіралі та ж сама ділянки ТЕНу нагріється вже приблизно до 100 °С, а при застосуванні хромової спіралі температура ділянки ТЕНу досягне 125 °С.

Для ребрених ТЕНів типу ТЕНР, як правило, застосовуються спіралі з вольфраму або ніхрому (сплав нікелю та хрому). Як показали результати розрахунку, тепловіддача буде вищою при застосуванні ніхрому.

5. Питання для самостійного контролю знань

1. Сучасний стан теплоенергопостачання. Вдосконалення конструкцій паросилових установок.
2. Предмет і мета технічної термодинаміки. Термодинамічна система.
3. Основні параметри стану робочого тіла.
4. Теплоємність. Рівняння Майера. Рівняння показника адіабати.
5. Теплові параметри стану тіла. Поняття ентропії та ентальпії.
6. Теплота та питома теплота. Термодинамічний аналіз з використанням діаграм типу TS та PV.
7. Ідеальний газ. Рівняння Менделєєва-Клапейрона.
8. Перший закон термодинаміки. Аналітичний вираз першого закону термодинаміки.
9. Термодинамічні процеси зміни стану робочого тіла. Методика дослідження термодинамічних процесів зміни стану робочого тіла (ідеального газу).
10. Ізохорний термодинамічний процес.
11. Ізобарний термодинамічний процес.
12. Ізотермічний термодинамічний процес.
13. Адіабатичний ізотермічний процес.
14. Політропний термодинамічний процес.
15. Другий закон термодинаміки. Термодинамічний аналіз циклів машин.
16. Термічний ККД та холодильний коефіцієнт.
17. Цикл Карно. Теорема Карно.
18. Реальний газ. Суміші газів.
19. Фазова PV-діаграма води і водяної пари.
20. Принципова схема паросилової установки. HS-діаграма.
21. Вологе повітря. HD-діаграма вологого повітря.
22. Термодинаміки потоку. Рівняння руху через трубопровід змінного перерізу.
23. Сопло Лавалля. Схема сопла Лавалля.

24. Дроселювання газів і парів.
25. Машини для стиску та розширення газів.
26. Одноступеневий поршневий компресор. Індикаторна діаграма.
27. Багатоступеневий поршневий компресор.
28. Теплові двигуни. Цикл теплових двигунів. Цикли поршневих ДВЗ.
29. Термодинамічний аналіз поршневого ДВЗ з підводом теплоти при сталому об'ємі (цикл Отто, цикл бензинового двигуна).
30. Цикл поршневого ДВЗ з підводом теплоти при $P=\text{const}$. Цикл Дизеля компресорного дизельного двигуна.
31. Цикл поршневого ДВЗ із змінним підводом теплоти. Цикл Трінклера.
32. Цикли газотурбінних установок (ГТУ). Термічний ККД.
33. Цикл реактивних двигунів.
34. Цикли холодильних машин і теплових насосів.
35. Теорія тепломасообміну. Теплопередача.
36. Температурне поле. Градієнт температури.
37. Теплопровідність. Закон Фур'є.
38. Конвективний теплообмін. Рівняння Ньютона-Ріхмана.
39. Конвективний теплообмін. Критерій Нуссельта.
40. Основи теорії подібності і моделювання. Критерій Рейнольда.
41. Основи теорії подібності і моделювання. Критерій Прандтля.
42. Основи теорії подібності і моделювання. Критерій Грасгофа.
43. Теплове випромінювання. Поглинаюча, відбиваюча та пропускаюча здатність тіла.
44. Закон Планка. Закон Стефана-Больцмана.
45. Закон Кірхгофа. Поглинаюча здатність сірого тіла.
46. Процеси теплопередачі. Теплопередача через циліндричну стінку.
47. Теплообмінні апарати. Тепловий розрахунок рекуперативного поверхневого теплообмінника.
48. Палива, що застосовуються в теплотехніці. Класифікація палив. Елементний склад палив.

Рекомендована література

1. Драганов Б. Х. Теплотехніка та використання теплоти в сільському господарстві / Б. Х. Драганов. – М. : Агропромвидат, 1990. – 463 с.
2. Дідур В. А. Теплотехніка, теплопостачання і використання теплоти в сільському господарстві / В. А. Дідур, М. І. Стручаєв. – К. : Аграрна освіта, 2008. – 233 с.
3. Жидков А. В. Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования / А. В. Жидков. – Нижний Новгород : НГУ, 2006. – 115 с.
4. Захаров А. А. Використання теплоти в сільському господарстві / А. А. Захаров. – М. : Агропромвидат, 1986. – 287 с.
5. Ілюхін М. С. Основи теплотехніки / М. С. Ілюхін, Ф. Т. Сидоренко. – М. : Агропромвидат, 1987. – 149 с.
6. Каплун А. Б. ANSYS в руках інженера: Практическое руководство / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
7. Панкратов Г. Ф. Сборник задач по теплотехнике / Г. Ф. Панкратов. – М. : Высш. шк., 1986. – 248 с.
8. Рабинович О. М. Сборник задач по технической термодинамике / О. М. Рабинович. – М. : Машиностроение, 1973. – 344 с.
9. Чигарев А. В. ANSYS для инженеров / А. В. Чигарев, А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 512 с.

Для нотаток

Для нотаток

Навчальне видання

ТЕПЛОТЕХНІКА

Методичні рекомендації

Укладач: **Кириченко** Олександр Сергійович

Формат 60×84 1/16. Ум. друк. арк. 3.

Тираж ___ прим. Зам. № ___

Надруковано у видавничому відділі
Миколаївського національного аграрного університету
54020, м. Миколаїв, вул. Паризької комуни, 9

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4490 від 20.02.2013 р.

