

Національний університет цивільного захисту України

Кафедра спеціальної хімії і хімічної технології

**Методичні розробки практичних занять**

з дисципліни

**ТЕРМОДИНАМІКА І ТЕПЛОПЕРЕДАЧА**

підготовки бакалаврів за спеціальністю 261 «Пожежна безпека»

Харків – 2017

## РОЗДІЛ 1. ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

Тема: Основні поняття та визначення термодинаміки. Закони ідеальних газів

Тема заняття: "Розрахунок характеристик газових сумішей."

- Цілі заняття:
1. Повторити та закріпити матеріал лекції "Газові суміші".
  2. Навчити курсантів розрахунку характеристик газових сумішей у зв'язку з задачами пожежовибухонебезпеки.
  3. Навчити курсантів застосуванню поняття теплоємність.

Час: 2 години (2\*40 хв.).

Місце проведення заняття: лабораторія термодинаміки та теплопередачі.

Матеріальне забезпечення: 1) картки контролю по темі "Закони ідеальних газів";

- 2) плакат по середній теплоємності;
- 3) довідники з нелінійними теплоємностями газів;
- 4) текст розрахункового завдання №1 (по газовим сумішам).

Література: 1. Рябова І.Б., Сайчук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі. -Харків: АПБУ, 2002.

2. А.Я. Шаршанов, І.В. Сайчук. Термодинаміка і теплопередача. Методичні вказівки до вивчення курсу та контрольні завдання. - Харків: УЦЗУ, 2007. - 165 с.
3. Лариков Н.Н. Теплотехника. . – М.: Стройиздат, 1985.
4. Буляндра О.Ф. Технічна термодинаміка. –Київ: Техніка, 2001.

### План заняття.

- |  |        |
|--|--------|
| 1. Організаційна частина.  | 5 хв.  |
| 2. Письмове опитування по карткам – теоретичні питання по темі "Закони ідеальних газів. Газові суміші" | 15 хв. |
| 3. Визначення задач по темам "Газові суміші. Теплоємність".  |        |
| 3.1 Розрахунок характеристик газових сумішей   |        |
| 3.1.1. Масові частки   | 15хв.  |
| 3.1.2. Об'ємні частки  | 15 хв. |
| 3.2. Теплоємність суміши   | 20 хв. |
| 4. Видача розрахункового завдання 1 (газові суміші і процеси)  | 5 хв.  |
| 5. Підведення підсумків ПЗ та завдання на самопідготовку.  | 5 хв.  |

Назва питання	Стислий зміст питання, що розглядається.	Метод. вказівки
1. Організаційна частина.	<p>Прийняти рапорт у чергового, перевірити зовнішній вигляд та наявність курсантів (слухачів) на заняттях.</p> <p>Перевірити забезпеченість заняття відповідною літературою.</p> <p>Назвати тему ПЗ, його мету. Об'явити порядок проведення заняття.</p>	
2. Письмове опитування по карткам – теоретичні питання по темі "Закони ідеальних газів. Газові суміші"	<p>Курсанти (студенти) отримують індивідуальні картки з задачами по питінням "Закони ідеальних газів. Газові суміші " і по листу чистого паперу для записування рішення.</p> <p>На виконання завдання дається 15 хвилин.</p>	Курсанти (студенти) самостійно без використання конспекту виконують завдання.
3.	3. Визначення задач по темам "Газові суміші. Теплоємність".	
	3.1. Розрахунок характеристик газових сумішей	
3.1.1. Масові частки	<p>Задача 1. У технологічному апараті об'ємом <math>10\text{ м}^3</math> під тиском 1 баар при температурі <math>20^\circ\text{C}</math> знаходиться газова суміш повітря з метиловим спиртом (<math>\text{CH}_3\text{OH}</math>). Вміст повітря у суміші 92% (по масі). Вважаючи пару метилового спирту ідеальним газом, визначити його масу. Чи може спалахнути суміш, якщо нижня концентраційна межа запалення суміші метилового спирту з повітрям складає 6% (об'ємних)?</p>	До дошки викликається курсант (слухач)
	<p><math>V=10\text{ м}^3</math>; <math>P=1\text{ бар}</math>; <math>t=20^\circ\text{C}</math>; <math>g_{\text{п}}=0,92</math>; <math>r_{\text{НКМЗ}}=0,06</math>; <math>\mu_{\text{п}}=29\text{ кг/кмоль}</math></p> <p><math>m_{\text{с}} - ?</math> <math>r_{\text{с}} - ?</math></p> <p>1) Визначимо масову частку пари спирту</p> $g_{\text{с}} = 1 - g_{\text{п}} = 1 - 0,92 = 0,08$ <p>2) Розрахуємо ефективну молярну масу суміші <math>\mu_{\text{сум}}</math> (<math>\mu_{\text{с}} = 12 + 16 + 4 \cdot 1 = 32\text{ кг/кмоль}</math>)</p> $\mu_{\text{сум}} \equiv \frac{1}{\sum_{i=1}^z \frac{g_i}{\mu_i}} = \frac{1}{\frac{g_{\text{п}}}{\mu_{\text{п}}} + \frac{g_{\text{с}}}{\mu_{\text{с}}}} = \frac{1}{\frac{0,92}{29} + \frac{0,08}{32}} = 29,2\text{ кг/кмоль}$ <p>3) Розрахуємо об'ємну частку спирту у суміші</p> $r_{\text{с}} = \frac{g_{\text{с}} \mu_{\text{сум}}}{\mu_{\text{с}}} = \frac{0,08 \cdot 29,2}{32} = 0,073.$	Курсанти (слухачі) роблять висно-

	<p>4) Визначимо питому газову сталю суміші</p> $R_{\text{сум}} \equiv \frac{R_0}{\mu_{\text{сум}}} = \frac{8314}{29.2} = 284.7 \text{ Дж/(кг К)}$ <p>5) Розрахуємо масу суміші</p> $P V = m R_{\text{сум}} T \Rightarrow m = \frac{P \cdot V}{R_{\text{сум}} T} = \frac{1 \cdot 10^5 \cdot 10}{284.7 \cdot (20 + 273)} = 12.0 \text{ кг}$ <p>6) Розрахуємо масу спирту</p> $m_c = m \cdot g_c = 12.0 \cdot 0.08 = 0.96 \text{ кг}$ <p>Приклад. У приміщенні об'ємом 10 м<sup>3</sup> розбилася літрова склянка з метиловим спиртом. Чи створилася у приміщенні вибухонебезпечна концентрація при повному випаровуванні?</p>	<p>вок о вибухонебезпечності</p> <p>До дошки викликається курсант (слухач)</p> <p>Вказується на співпадіння задач.</p>
<p>3.1.2. Об'ємні частки</p>	<p>Задача 2. Об'ємний склад паливного газу такий: CO – 10%, H<sub>2</sub> – 45%, CH<sub>4</sub> – 35%, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> – 4%, CO<sub>2</sub> – 3%, N<sub>2</sub> – 3%. Визначити середню молярну масу, густину, питомий об'єм суміші за нормальних умов, питому газову сталю та масову частку метану (CH<sub>4</sub>).</p>	<p>Викладається викладачем.</p>
	<p><math>r_{\text{CO}} = 0.10</math>; <math>\mu_{\text{CO}} = 12+16=28 \text{ кг/кмоль}</math>  <math>r_{\text{H}_2} = 0.45</math>; <math>\mu_{\text{H}_2} = 2 \cdot 1 = 2 \text{ кг/кмоль}</math>  <math>r_{\text{CH}_4} = 0.35</math>; <math>\mu_{\text{CH}_4} = 12+4 \cdot 1 = 16 \text{ кг/кмоль}</math>  <math>r_{\text{C}_2\text{H}_4} = 0.04</math>; <math>\mu_{\text{C}_2\text{H}_4} = 2 \cdot 12+4 \cdot 1 = 28 \text{ кг/кмоль}</math>  <math>r_{\text{CO}_2} = 0.03</math>; <math>\mu_{\text{CO}_2} = 12+2 \cdot 16 = 44 \text{ кг/кмоль}</math>  <math>r_{\text{N}_2} = 0.03</math>; <math>\mu_{\text{N}_2} = 2 \cdot 14 = 28 \text{ кг/кмоль}</math>  <u><math>P = 101 \text{ кПа}</math>; <math>t = 0^\circ\text{C}</math>.</u>  <math>\mu_{\text{сум}} - ?</math> <math>\rho - ?</math> <math>v - ?</math> <math>R_{\text{сум}} - ?</math> <math>g_{\text{CH}_4} - ?</math></p> <p>1) Розрахуємо ефективну молярну масу суміші</p> $\mu_{\text{сум}} \equiv \sum_{i=1}^z r_i \cdot \mu_i = 0.10 \cdot 28 + 0.45 \cdot 2 + 0.35 \cdot 16 + 0.04 \cdot 28 + 0.03 \cdot 44 + 0.03 \cdot 28 = 12.58 \text{ кг/кмоль}$ <p>2) Визначимо питому газову сталю суміші</p> $R_{\text{сум}} \equiv \frac{R_0}{\mu_{\text{сум}}} = \frac{8314}{12.58} = 661 \text{ Дж/(кг К)}$ <p>3) Розрахуємо густину суміші</p>	<p>До дошки викликається курсант (слухач)</p> <p>До дошки викликається курсант (слухач)</p>



	$c_{p, \text{сум}} \equiv \frac{C_{p, \text{сум}}}{m} = \frac{\sum_{i=1}^z C_{p,i}}{m} = \frac{\sum_{i=1}^z m_i \cdot c_{p,i}}{m} = \sum_{i=1}^z \frac{m_i}{m} c_{p,i} = \sum_{i=1}^z g_i \cdot c_{p,i} =$ $= g_{\text{CO}_2} \cdot c_{p, \text{CO}_2} + g_{\text{O}_2} \cdot c_{p, \text{O}_2} + g_{\text{CO}} \cdot c_{p, \text{CO}} + g_{\text{N}_2} \cdot c_{p, \text{N}_2} =$ $= 0.175 \cdot 0.82 + 0.074 \cdot 0.92 + 0.009 \cdot 1.04 + 0.742 \cdot 1.04 = 0.99 \text{ кДж}/(\text{кг К}).$	
<p>4. Видача розрахункового завдання 1</p>	<p>Пояснюється вибір варіанта: номер шифру за номером залікової книжки курсанта (слухача). Повідомляється, що 1) у бібліотеці є методичка з умовами і методикою виконання завдання; 2) без зданого завдання-1 заліку не буде; 3) завдання-1 складається з 3-х задач з термодинаміки і оформлюється у одному зошиті на 12 сторінок; 4) завдання робиться протягом семестру, і для першої атестації необхідно здати першу задачу.</p>	
<p>5. Підведення підсумків ПЗ та завдання на самопідготовку.</p>	<p>Оцінюється робота групи і окремих курсантів. Оцінки заносяться до учбового журналу групи. Завдання на СП: 1) вивчити гл. 1, стор. 20-26 у підручнику Рябова та ін.; 2) виконати 5 пунктів розрахункового завдання; 3) підготуватися до лабораторної роботи "Вимір ізобарної теплоємності повітря при атмосферному тиску" (См. л.р. №1 у лабораторному практикумі з дисципліни ТіТ). Заповнити журнал лабораторних робіт. 4) підготуватися до інд. письмового опитування по темі даного ПЗ.</p>	<p>Разом з курсантами формулює висновок по завданню.</p>

Тема: Термодинамічні властивості рідин і пари.

Тема заняття : **Розрахунок термодинамічних процесів зміни стану водяної пари (i-s-діаграма водяної пари.)**

Цілі заняття: 1. Повторити та закріпити матеріал лекції.

2. Навчити курсантів застосуванню i-s-діаграм водяної пари в термодинамічних процесах.

Час: 2 години.

Місце проведення заняття: лабораторія термодинаміки та теплопередачі.

Мат. забезпечення: 1) i-s-діаграм водяної пари;

2) тексти завдання по водяній парі.

Література: 1. Рябова І.Б., Сайчук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі. -Харків: АПБУ, 2002.

2. А.Я. Шаршанов, І.В. Сайчук. Термодинаміка і теплопередача. Методичні вказівки до вивчення курсу та контрольні завдання. - Харків: УЦЗУ, 2007. - 165 с.

3. Буляндра О.Ф. Технічна термодинаміка. –Київ: Техніка, 2001.

#### План заняття.

- |   |        |
|---|--------|
| 1. Організаційна частина.   | 5 хв.  |
| 2. Викладення нового теоретичного матеріалу по темі: "I-s-діаграма водяної пари".   |        |
| 2.1. Структура I-s-діаграми вологої пари.   | 10 хв. |
| 2.2. Застосування I-s-діаграми вологої пари для розрахунку зміни стану водяної пари у основних т/д процесах.                    | 10 хв. |
| 3. Рішення задачі по визначенню параметрів стану водяної пари у основних т/д процесах при допомозі I - s-діаграма водяної пари. |        |
| 3.1. Застосування I-s-діаграми для визначення параметрів стану  | 15 хв. |
| 3.2. Застосування I-s-діаграми при дослідженні ізотермічного процесу  | 20 хв. |
| 3.2. Застосування I-s-діаграми при дослідженні ізобарного процесу   | 15 хв. |
| 4. Підведення підсумків ПЗ та завдання на самопідготовку.   | 5 хв.  |

Назва питання	Стислий зміст питання, що розглядається.	Метод. вказівки
1. Організа-	Прийняти рапорт у чергового, перевірити зовнішній вигляд та наявність курсантів (слухачів) на за-	

ційна частина.	<p>няттях.</p> <p>Перевірити забезпеченість заняття відповідною літературою.</p> <p>Назвати тему ПЗ, його мету. Об'явити порядок проведення заняття.</p>	
2.	2. Викладення нового теоретичного матеріалу по темі: "I-s-діаграма водяної пари".	
2.1. Структура I-s-діаграми вологої пари.	<p>Для опису рівноважного стану речовини можна користуватися будь-якою парою термодинамічних параметрів. На початку ХХ-го сторіччя було запропоновано у технічних розрахунках використовувати <i>i-s</i>-діаграму. Справа в тому, що використання <i>P-v</i> та <i>T-s</i>-діаграм при обчисленні теплоти та роботи пов'язане із визначенням площ. Діаграма <i>i-s</i> у цих випадках вимагає виміру відрізків, що значно зручніше.</p> <p>На рисунку 1 схематично зображена <i>i-s</i>-діаграма водяної пари.</p> <p>Розглянемо особливості цієї діаграми. Критична точка <i>K</i> розміщена лівіше максимуму пограничної кривої <i>AKB</i>. Нижня погранична крива відповідає лінії <i>AK</i>. Верхня погранична крива <i>KB</i> закінчується у точці <i>B</i>. На діаграмі нанесено ізобару <i>OB</i> (<math>P = 0.00611</math> бар), яка відповідає тиску у потрійній точці. Область нижче відповідає двофазній суміші "пара - лід".</p> <p>Лінія <i>KB</i> відповідає стану сухої насиченої пари (<math>x=1</math>). Вона відокремлює області вологої насиченої і перегрітої пари.</p> <p>Область, обмежена ізобарою <i>OB</i> та пограничною кривою <i>OKB</i>, - область вологої насиченої пари. У цій області ізобароізотерми є прямими лініями, які віялом розбігаються від точки <i>O</i> до верхньої пограничної кривої. Це пов'язано саме з ізобароізотермічністю процесу пароутворення. При ньому тепло, яке отримано, з одного боку (ізобарного), дорівнює</p> $dq = di ,$ <p>а з іншого боку (ізотермічного) -</p> $dq = T_s(P) ds .$ <p>У результаті виконується співвідношення:</p> $di = T_s(P) ds ,$ <p>яке, внаслідок сталості множника <math>T_s(P)</math>, є рівнянням прямої у <i>i-s</i>-змінних. Тангенс кута нахилу цієї лінії співпадає із температурою кипіння <math>T_s(P)</math>. Таким чином:</p> $i = i'(P) + T_s(P) [s - s'(P)] , \tag{1}$ <p>де <math>i'(P)</math> і <math>s'(P)</math> є питомими ентальпією і ентропією рідинної води (<math>x=0</math>) за температури кипіння <math>T_s(P)</math>. Залежність (1) у <i>i-s</i>-координатах дає пряму лінію.</p>	Викладається викладачем.



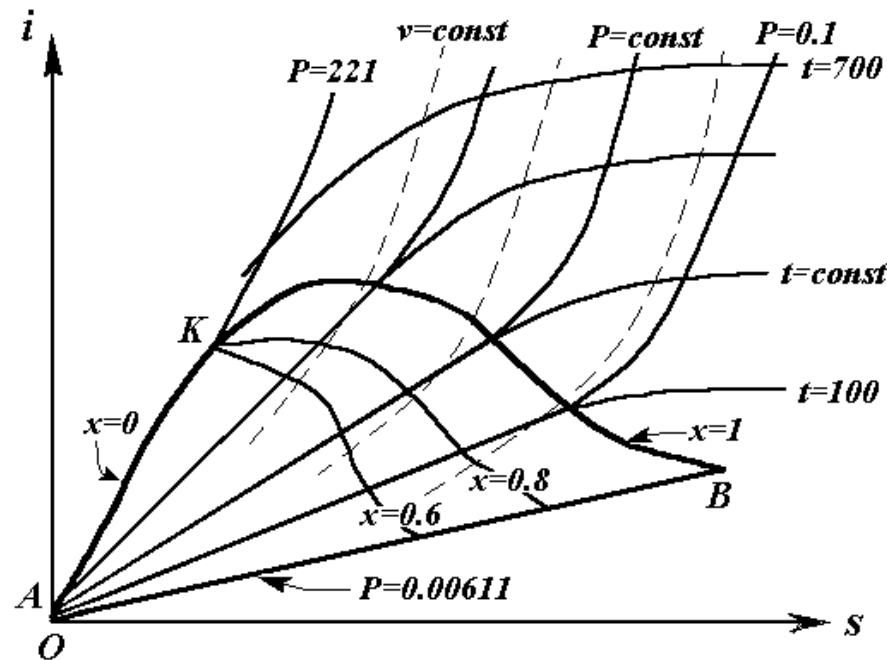


Рисунок 1 - Схематичне зображення  $i$ - $s$ -діаграми водяної пари  
Значення тиску  $P$  наводиться у барах, температури  $t$  – у градусах Цельсія, ступеня сухості  $x$  - у долях.

В області перегрітої пари, що розташована над верхньою пограничною кривою  $KB$ , ізобари підіймаються угору із опуклістю донизу. Ізотерми у цій області підіймаються угору із опуклістю угору. При цьому, віддаляючись від верхньої пограничної кривої, ізотерми асимптотично наближаються до горизонтальних ліній, що відповідає поведінню ідеального газу, ентальпія якого визначається температурою.

На діаграму також нанесено сітку ізохор ( $v=const$ ) - пунктирні лінії на рисунку 1. Ці криві підіймаються угору більш круто, ніж лінії ізобар. В області вологої насиченої пари наноситься також сітка ліній постійного ступеня сухості пари ( $x=const$ ), які сходяться у критичній точці  $K$ .

2.2. Застосування  $I$ - $s$ -діаграми вологої пари для розрахунку зміни

Розрахунок процесів зміни стану пари здійснюється за допомогою таблиць термодинамічних властивостей пари або за допомогою  $T$ - $s$  чи  $i$ - $s$ -діаграм стану. Ми розглянемо менш точний, але й менш трудомісткий метод розрахунку за допомогою  $i$ - $s$ -діаграми. Етапи цієї процедури викладено далі.

Спочатку за заданими даними на діаграмі треба збудувати графік процесу. У ході побудови, знаходячи ізокриві, що проходять крізь задані точки, можна визначити чисельні значення параметрів пари у відповідних станах.

Викладається викладачем.

<p>стану водяної пари у основних т/д процесах.</p>	<p>В будь-якій точці одразу ж можна прочитати рівноважні значення наступних термодинамічних величин: питомої ентальпії <math>i</math>, питомої ентропії <math>s</math>, питомого об'єму <math>v</math>, тиску <math>P</math>, температури <math>t</math>, а в області вологості насиченої пари ще й ступеня сухості пари <math>x</math>.</p> <p>Знаючи питому ентальпію, тиск та питомий об'єм, можна за загальною формулою обчислити питому внутрішню енергію у довільному стані:</p> $u = i - P v . \quad (3)$ <p>Формула (3) дозволяє визначити зміну внутрішньої енергії пари у будь-якому процесі <math>n \rightarrow k</math>:</p> $\Delta u_{n \rightarrow k} = u_k - u_n = i_k - i_n - (P_k v_k - P_n v_n) ,$ <p>Питома робота може бути розрахована на основі першого закону термодинаміки</p> $l_{n \rightarrow k} = q_{n \rightarrow k} - \Delta u_{n \rightarrow k} ,$ <p>де <math>q_{n \rightarrow k}</math> - питома теплота процесу.</p> <p>Теплоти процесів визначаються по відповідним формулам (дивися таблицю 1)</p> <p>Таблиця 1- Зв'язок енергетичних параметрів у процесах.</p>				
	<p>Процес <math>n \rightarrow k</math></p>	<p>Зміна внутрішньої енергії <math>\Delta u_{n \rightarrow k}</math></p>	<p>Теплота <math>q_{n \rightarrow k}</math></p>	<p>Робота <math>l_{n \rightarrow k}</math></p>	
	<p>Ізотермічний <math>T = T_n = T_k = const</math></p>	<p><math>i_k - i_n - (P_k v_k - P_n v_n)</math></p>	<p><math>T (s_k - s_n)</math></p>	<p><math>q_{n \rightarrow k} - \Delta u_{n \rightarrow k}</math></p>	
	<p>Ізобарний <math>P = P_n = P_k = const</math></p>	<p><math>i_k - i_n - P (v_k - v_n)</math></p>	<p><math>i_k - i_n</math></p>	<p><math>P (v_k - v_n)</math>, або <math>q_{n \rightarrow k} - \Delta u_{n \rightarrow k}</math></p>	
	<p>3.Рішення задачі по визначенню параметрів стану водяної пари у основних т/д процесах при допомозі I - s-діаграма водяної пари</p>				
<p>3.1. Застосування I-s-діаграми для визначення параметрів стану</p>	<p>Перейдемо безпосередньо до викладення методики використання <math>i</math>-<math>s</math>-діаграми водяної пари (остання є в додатках). Розрахунки будемо демонструвати на прикладі процесів, що розпочиналися із початкового стану з тиском <math>P_I = 1.5 \text{ МПа} = 1500 \text{ кПа}</math> і ступенем сухості <math>x_I = 0.94</math>, в ході яких до водяної пари підводилося <math>q = 490 \text{ кДж/кг}</math> тепла.</p> <p style="text-align: center;"><b>Порядок визначення параметрів початкового стану.</b></p> <p>Розрахунки всіх процесів починаються з визначення параметрів початкового стану системи. Для цього необхідно знайти точку на <math>i</math>-<math>s</math>-діаграмі, яка відповідає початковому стану (дивися, наприклад, точку <b>I</b> на рисунку 1). В нашій задачі початкова точка <b>I</b> визначається перетином ізобари <math>P = P_I</math> із лінією постійного</p>				<p>По кожному пункту ви-кликається</p>

	<p>ступеня сухості <math>x = x_1</math> .Порядок дії викладено далі.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Визначити точку, яка відповідає початковому стану на діаграмі. Для цього:       <ol style="list-style-type: none"> <li>1.1. визначити лінію, яка є ізобарою <math>P = P_1</math> (<math>P_1 = 1500</math> кПа);</li> <li>1.2. визначити лінію постійного ступеня сухості <math>x = x_1</math> (<math>x_1 = 0.94</math>).</li> </ol> <p>Точка перетину цих двох ліній і буде точкою <math>I</math>, що відповідає початковому стану системи.</p> </li> <li>2. Визначити значення термодинамічних параметрів (які прямо нанесені на сітку діаграми) у початковому стані <math>I</math>. Для цього необхідно визначити ізолінії, які перетинають точку <math>I</math>, тобто треба:       <ol style="list-style-type: none"> <li>2.1. для визначення питомого об'єму знайти, яка ізохора перетинає точку <math>I</math> (об'єм, що відповідає цій ізохорі, і буде давати <math>v_1</math> (<math>v_1 = 0.13</math> м<sup>3</sup>/кг);</li> <li>2.2. для визначення температури знайти, яка ізотерма перетинає точку <math>I</math> (температура, що відповідає цій ізотермі, і буде давати <math>t_1</math> (<math>t_1 = 200</math> °С));</li> <li>2.2. для визначення питомої ентропії знайти, яка лінія постійної ентропії (ізоентропа) перетинає точку <math>I</math> (для цього необхідно через точку <math>I</math> провести перпендикуляр до вісі ентропій; значення питомої ентропії на цьому перпендикулярі і буде давати <math>s_1</math> (<math>s_1 = 6.20</math> кДж/(кг*К)) );</li> <li>2.4. для визначення питомої ентальпії знайти, яка лінія постійної ентальпії (ізоентальпа) перетинає точку <math>I</math> (для цього необхідно через точку <math>I</math> провести перпендикуляр до вісі ентальпій; значення питомої ентальпії на цьому перпендикулярі і буде давати <math>i_1</math> (<math>i_1 = 2680</math> кДж/кг ) ).</li> </ol> </li> <li>3. Розрахувати значення питомої внутрішньої енергії у стані <math>I</math> (для чого скористатися загальним термодинамічним співвідношенням (1))</li> </ol> $u_1 = i_1 - P_1 v_1. ( u_1 = 2680 - 1500*0.13 = 2485 \text{ кДж/кг } )$	<p>новий курсант (слухач). Якщо він не може відповісти, викликається наступний курсант (слухач).</p> <p>Викладач контролює роботи з діаграмами на місцях.</p>
<p>3.2. Застосування I-s-діаграми при дослідженні ізотермічного процесу</p>	<p>Розрахунки будемо демонструвати на прикладі процесів, що розпочиналися із початкового стану з тиском <math>P_1 = 1.5</math> МПа = 1500 кПа і ступенем сухості <math>x_1 = 0.94</math> , в ході яких до водяної пари підводилося <math>q = 490</math> кДж/кг тепла.</p> <p style="text-align: center;"><b>Порядок визначення параметрів ізотермічного процесу.</b></p> <p>Графічним зображенням ізотермічного процесу є лінія <math>I \rightarrow 2</math> (дивіться рисунок 2).</p> <p>Нехай кінцева точка <math>2</math> ізотермічного процесу задається кількістю наданого тепла. Тоді вона розташована на перетині ізотерми <math>t = t_1</math> із ізоентропою <math>s = s_2</math>. Кінцеве значення питомої ентропії (<math>s_2</math>) розраховується із зв'язку питомої теплоти <math>q</math>, що надається тілу в ізотермічному процесі, із зміною ентропії –</p> $q = T^*(s_2 - s_1) \Rightarrow s_2 = s_1 + q/T_1.$	<p>Викладач нагадує умови задачі.</p> <p>Пояснюється викладачем</p>

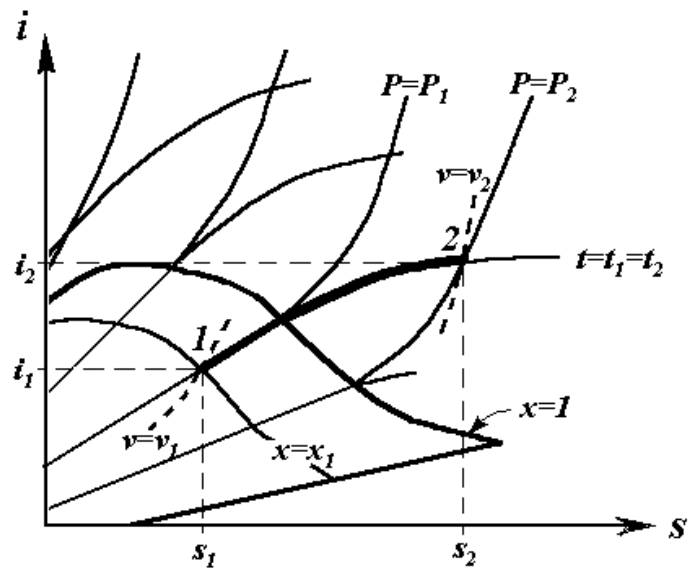


Рисунок 2. Схематичне зображення ізотермічного процесу на  $i$ - $s$ -діаграмі.

У зв'язку з сказаним розрахунок йде по наступній схемі.

1. Визначити кінцеву точку ізотермічного процесу. Для цього:

1.1. розрахувати ентропію кінцевого стану ізотермічного процесу

$$s_2 = s_1 + q/T_1 = s_1 + q/(t_1 + 273) ;$$

$$(s_2 = 6.20 + 490/(200 + 273) = 7.24 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}))$$

1.2 знайти лінію, яка є ізентропою  $s = s_2$  (це вертикаль, що перетинає вісь ентропій у точці  $s_2$  ( $s_2 = 7.24$  кДж/(кг\*К) ));

1.3. знайти точку перетину ізентропи  $s = s_2$  з ізотермою  $t = t_2$  ( $t_2 = t_1 = 200$  °С); це і є кінцева точка 2.

2. Дотримуючись методики пункту 2, визначити у точці 2 значення термодинамічних параметрів, які безпосередньо нанесено на діаграму:

2.1. для визначення питомого об'єму знайти, яка ізохора перетинає точку 2 (об'єм, що відповідає цій ізохорі, і буде давати  $v_2$  ( $v_2 = 0.60$  м<sup>3</sup>/кг);

2.2. для визначення тиску знайти, яка ізобара перетинає точку 2 (тиск, що відповідає цій ізобарі, і буде давати  $P_2$  ( $P_2 = 370$  кПа);

2.3. для визначення питомої ентальпії знайти, яка лінія постійної ентальпії (ізоентальпа) перетинає точку 2 (для цього необхідно через точку 2 провести перпендикуляр до вісі ентальпій; значення питомої ентальпії

На кожний пункт ви-кликається новий курсант (слухач). Якщо він не може відповісти викликається (за бажанням) наступний курсант (слухач), або пояснення дає викладач.

	<p>пії на цьому перпендикулярі і буде давати <math>i_2</math> (<math>i_2 = 2865</math> кДж/кг )).</p> <p>3. Розрахувати значення питомої внутрішньої енергії у стані <b>2</b> (для чого скористатися загальним термодинамічним співвідношенням <math>i \equiv u + P v</math>)</p> $u_2 = i_2 - P_2 v_2. ( u_2 = 2865 - 370 \cdot 0.60 = 2640 \text{ кДж/кг } )$ <p>4. Розрахувати значення енергетичних параметрів у процесі:</p> <p>4.1. зміна внутрішньої енергії дорівнює</p> $\Delta u_{1 \rightarrow 2} = u_2 - u_1 ( \Delta u_{1 \rightarrow 2} = 2640 - 2485 = 155 \text{ кДж/кг } );$ <p>4.2. зміна ентальпії дорівнює</p> $\Delta i_{1 \rightarrow 2} = i_2 - i_1 ( \Delta i_{1 \rightarrow 2} = 2865 - 2680 = 185 \text{ кДж/кг } );$ <p>4.3. зміна ентропії дорівнює</p> $\Delta s_{1 \rightarrow 2} = s_2 - s_1 ( \Delta s_{1 \rightarrow 2} = 7.24 - 6.20 = 1.04 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К) } );$ <p>4.4. робота поширення дорівнює</p> $l_{1 \rightarrow 2} = q_{1 \rightarrow 2} - \Delta u_{1 \rightarrow 2} ( l_{1 \rightarrow 2} = 490 - 155 = 335 \text{ кДж/кг } ).$	
<p>3.3. Застосування I-s-діаграми при дослідженні ізобарного процесу</p>	<p style="text-align: center;"><b>Порядок визначення параметрів ізобарного процесу.</b></p> <p>Графічним зображенням ізобарного процесу є лінія <math>1 \rightarrow 3</math> (дивіться рисунок 3). Нехай кінцева точка <b>3</b> ізобарного процесу задається кількістю наданого тепла. Тоді вона розташована на перетині ізобари <math>P = P_1</math> із ізоентальпою <math>i = i_3</math>. Кінцеве значення питомої ентальпії (<math>i_3</math>) розраховується із зв'язку питомої теплоти <math>q</math>, що надається тілу в ізобарному процесі, із зміною ентальпії –</p> $q = i_3 - i_1 \Rightarrow i_3 = i_1 + q.$ <p>У зв'язку з сказаним розрахунок йде по наступній схемі.</p> <p>5. Визначити кінцеву точку ізобарного процесу. Для цього:</p> <p>5.1. розрахувати ентальпію кінцевого стану ізобарного процесу</p> $i_3 = i_1 + q ( i_3 = 2680 + 490 = 3170 \text{ кДж/кг } );$ <p>5.2. знайти лінію, яка є ізоентальпою <math>i = i_3</math> (це горизонталь, що перетинає вісь ентальпій у точці <math>i_3</math> (<math>i_3 = 3170</math> кДж/(кг*К) ));</p> <p>5.3. знайти точку перетину ізоентальпи <math>i = i_3</math> з ізобарою <math>P = P_3</math> (<math>P_3 = P_1 = 1500</math> кПа); це і є кінцева точка <b>3</b>.</p>	

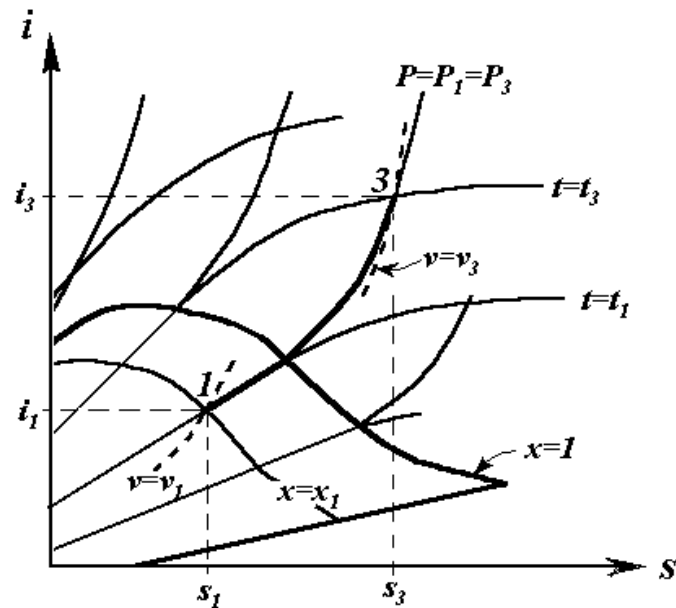


Рисунок 3. Схематичне зображення ізобарного процесу на  $i$ - $s$ -діаграмі.

6. Дотримуючись методики пункту 2, визначити у точці 3 значення термодинамічних параметрів, які безпосередньо нанесено на діаграму:

6.1. для визначення питомого об'єму знайти, яка ізохора перетинає точку 3 (об'єм, що відповідає цій ізохорі, і буде давати  $v_3$  ( $v_3 = 0.20 \text{ м}^3/\text{кг}$ );

6.2. для визначення температури знайти, яка ізотерма перетинає точку 3 (температура, що відповідає цій ізотермі, і буде давати  $t_3$  ( $t_3 = 360 \text{ }^\circ\text{C}$ ));

6.3. для визначення питомої ентропії знайти, яка лінія постійної ентропії (ізоентропа) перетинає точку 3 (для цього необхідно через точку 3 провести перпендикуляр до вісі ентропій; значення питомої ентропії на цьому перпендикулярі і буде давати  $s_3$  ( $s_3 = 7.15 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ ));

7. Розрахувати значення питомої внутрішньої енергії у стані 3 (для чого скористатися загальним термодинамічним співвідношенням (1))

$$u_3 = i_3 - P_3 v_3. \quad (u_3 = 3170 - 1500 \cdot 0.20 = 2870 \text{ кДж}/\text{кг})$$

8. Розрахувати значення енергетичних параметрів у процесі:

8.1. зміна внутрішньої енергії дорівнює

	$\Delta u_{1 \rightarrow 3} = u_3 - u_1 \quad (\Delta u_{1 \rightarrow 3} = 2870 - 2485 = 385 \text{ кДж/кг});$ <p>8.2. зміна ентальпії дорівнює</p> $\Delta i_{1 \rightarrow 3} = i_3 - i_1 = q \quad (\Delta i_{1 \rightarrow 3} = 3170 - 2680 = 490 \text{ кДж/кг});$ <p>8.3. зміна ентропії дорівнює</p> $\Delta s_{1 \rightarrow 3} = s_3 - s_1 \quad (\Delta s_{1 \rightarrow 3} = 7.15 - 6.20 = 0.95 \text{ кДж/(кг*К)});$ <p>8.4. робота поширення дорівнює</p> $l_{1 \rightarrow 3} = q_{1 \rightarrow 3} - \Delta u_{1 \rightarrow 3} \quad (l_{1 \rightarrow 3} = 490 - 385 = 105 \text{ кДж/кг}),$ <p>що у даному випадку повинно збігатися з</p> $l_{1 \rightarrow 3} = P_1 (v_3 - v_1) \quad (l_{1 \rightarrow 3} = 1500 * (0.20 - 0.13) = 105 \text{ кДж/кг}).$	
<p>4. Підведення підсумків ПЗ та завдання на СП</p>	<p>Оцінюється робота, оцінки повідомляються та виставляються до журналу групи.</p> <p>Завдання на СП:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Розрахувати процеси свого варіанту задачі 2 у РР-1;</li> <li>2. Повторити тему по       <ol style="list-style-type: none"> <li>1) конспекту;</li> <li>2) Рябова І.Б., Сайчук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі. -Харків: АПБУ, 2002.</li> <li>3). Буляндра О.Ф. Технічна термодинаміка -Київ: Техніка, 1987.</li> <li>4) А.Я. Шаршанов, І.В. Сайчук. Термодинаміка і теплопередача. Методичні вказівки до вивчення курсу та контрольні завдання. - Харків: УЦЗУ, 2007. - 165.</li> </ol> </li> </ol>	

## РОЗДІЛ 2. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Тема: Основні поняття теплопередачі. Стаціонарна теплопровідність.

Тема заняття: **Теплопровідність крізь одношарові стінки.**

Цілі заняття: 1. Повторити та закріпити матеріал лекції ” Осн. поняття теплопередачі Стац. теплопровідність”.

2. Навчити курсантів застосуванню законів стаціонарної теплопровідності при вирішенні задач пожежної безпеки.

Час: 2 години.

Місце проведення заняття: лабораторія термодинаміки та теплопередачі.

Мат. забезпечення: 1) Картки з питаннями по темі “Стаціонарна теплопровідність”.

Література: 1. Рябова І.Б., Сайчук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі. -Харків: АПБУ, 2002.

### План заняття.

- |   |        |
|---|--------|
| 1. Організаційна частина.   | 5 хв.  |
| 2. Контрольне опитування по карткам (теор. питання) по темі "Основні поняття теплопередачі" | 10хв.  |
| 3. Рішення задач по темі "Теплопровідність"   |        |
| 3.1. Розрахунок температур у одношаровій плоскій стінці                                     |        |
| 3.1.1. Коеф. теплопровідності не залежить від температури                                   | 10 хв. |
| 3.1.2. Коеф. теплопровідності залежить від температури                                      | 20 хв. |
| 3.2. Розрахунок втрат тепла кріс циліндричний шар   | 20 хв. |
| 4. Підведення підсумків ПЗ та завдання на самопідготовку.                                   | 5 хв.  |

Назва питання	Стислий зміст питання, що розглядається.	Метод. вказівки
1. Організаційна частина.	Прийняти рапорт у чергового, перевірити зовнішній вигляд та наявність курсантів (слухачів) на заняттях. Перевірити забезпеченість заняття відповідною літературою. Назвати тему ПЗ, його мету. Об'явити порядок проведення заняття.	
2. Контрольне опитування	Курсанти (слухачі) письмово відповідають на теоретичні питання з індивідуальних карток по темі "Основні поняття теплопередачі" .	Надає уточн. пояснення



	3. Рішення задач по темі "Теплопровідність"	
3.1. Розрахунок температур у одношаровій плоскій стінці	<p>У випадку плоскої стінки основний закон стаціонарної теплопровідності (закон Фур'є) має вид:</p> $q = -\lambda(t) \cdot dt/dx, \quad (1)$ <p>де <math>q</math> - питомий тепловий потік крізь стінку, Вт/м<sup>2</sup>; коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки, Вт/(м·К); <math>dt/dx</math> – градієнт від температури <math>t</math> по відстані <math>x</math> в глибину стінки.</p> <p>Якщо проінтегрувати співвідношення (1) по координаті <math>x</math> в межах від поверхні стінки <math>t(x=0) = t_1</math> до глибини <math>x</math>, де <math>t(x) = t_x</math>, то можна (враховуючи незмінність <math>q</math>) отримати співвідношення</p> $q = \frac{\lambda_{x, \text{сеп}}}{x} (t_1 - t_x), \text{ Вт/м}^2, \quad (2)$ <p>де</p> $\lambda_{x, \text{сеп}} \equiv \frac{1}{t_1 - t_x} \int_{t_x}^{t_1} \lambda(t) \cdot dt, \text{ Вт/(м·К)}. \quad (3)$ <p>- середнє на відповідному інтервалі температур значення теплопровідності.</p> <p>У випадку стінки товщиною <math>\delta</math> формула (2) приймає вид</p> $q = \frac{\lambda_{\text{сеп}}}{\delta} (t_1 - t_2), \text{ Вт/м}^2, \quad (4)$ <p>де <math>t_2 = t(x=\delta)</math> - температура на другій поверхні плоскої стінки.</p> <p>Якщо коефіцієнт теплопровідності лінійно залежить від температури, тобто <math>\lambda(t) = \lambda_0 + \beta \cdot t</math>, Вт/(м·К), де величини <math>\lambda_0</math> і <math>\beta</math> не залежать від температури і являють собою, відповідно, значення (при <math>t = 0</math>) та температурний коефіцієнт коефіцієнта теплопровідності. У такому випадку, згідно з формулою (3),</p> $\lambda_{x, \text{сеп}} = \lambda_0 + \beta \cdot (t_1 + t_x)/2 = \lambda((t_1 + t_x)/2), \text{ Вт/(м·К)}, \quad (5)$ <p>тобто середнє на ділянці шару значення коефіцієнта теплопровідності дорівнює його значенню за середньої температури. При цьому через появу залежності <math>\lambda_{\text{сеп}}</math> від <math>t_x</math> у багатьох випадках при вирішенні задач необхідно використовувати наближенні методи обчислень.</p>	Викладач нагадує новий матеріал.

<p>3.1.1. Ко- еф. тепло- провіднос- ті не зале- жить від темпера- тури</p>	<p>Задача1. Визначити температуру на зовнішній поверхні бетонної плити в умовах тривалої пожежі. Товщина плити 220 мм. На гарячій поверхні встановилася температура 550°C. Питомий тепловий потік крізь стінку дорівнює 2,21 кВт/м<sup>2</sup>. Коефіцієнт теплопровідності бетону дорівнює 1,23 Вт/(м К). До якої глибини плита прогрівається понад критичну температуру арматури 470°C?</p> <p><math>t_1 = 550^\circ\text{C}</math>, <math>q = 2.21 \text{ кВт/м}^2</math>, <math>\delta = 220 \text{ мм}</math>, <math>t_k = 470^\circ\text{C}</math>, <math>\lambda = 1,23 \text{ Вт/(м К)}</math></p> <p>-----</p> <p><math>t_2 - ?</math> <math>x - ?</math></p>	<p>До дошки виклика- ється кур- сант (сту- дент)</p>
	<p>1) температура на зовнішній поверхні визначається за формулою (4)</p> $t_2 = t_1 - q \cdot \delta / \lambda_{\text{сер}} = 550 - 2210 \cdot 0,22 / 1,23 = 155^\circ\text{C}$ <p>2) для визначення перетину, у якому температура дорівнює <math>t_k</math>, скористаємося формулою (2) з <math>t_x = t_k</math></p> $x = \lambda_{\text{сер}} \cdot (t_1 - t_k) / q = 1,23 \cdot (550 - 470) / 2210 = 0,045 \text{ м}$	
<p>3.1.2. Ко- еф. тепло- провіднос- ті зале- жить від темпера- тури</p>	<p>Задача2. Визначити температуру на зовнішній поверхні печі, яку встановлено у житловому будинку. Стінку печі має товщину 25 см і зроблена із шамотної цегли. Температура на гарячій поверхні стінки дорівнює 900°C, а густина потоку тепло крізь стінку дорівнює 3500 Вт/м<sup>2</sup>. Чи можна поблизу такої стіни зберігати деревину, температура самозаймання якої дорівнює 120°C?</p> <p><math>t_1 = 900^\circ\text{C}</math>, <math>q = 3500 \text{ Вт/м}^2</math>, <math>\delta = 25 \text{ см}</math>, <math>t_k = 120^\circ\text{C}</math>, <math>\lambda = (0,835 + 0,00058 \cdot t) \text{ Вт/(м К)}</math></p> <p>-----</p> <p><math>t_2 - ?</math></p>	<p>До дошки виклика- ється кур- сант (сту- дент)</p>
	<p>Через те, що залежить від температури <math>t_2</math>, яка саме шукається у задачі, рішення знаходимо методом послідовних наближень.</p> <p>Спочатку задається значення <math>t_2</math>, а потім із даним <math>t_2</math> визначається середня температура шару <math>t_{\text{сер}} = (t_1 + t_2) / 2</math> та відповідний середній коефіцієнт теплопровідності</p> $\lambda_{\text{сер}} = 0,835 + 0,00058 \cdot t_{\text{сер}}, \text{ Вт/(м К)}$ <p>Далі, маючи його, визначаємо більш точне значення температури <math>t_2 = t_1 - q \cdot \delta / \lambda_{\text{сер}}</math></p> <p>Останнє використовується у якості початкового у наступному циклі обчислень.</p> <p>У якості нульового наближення візьмемо</p>	

	<p>0) <math>t_2 = 200^\circ\text{C}</math>  <math>t_{\text{сер}} = (900+100)/2 = 500^\circ\text{C}</math>, <math>\lambda_{\text{сер}} = 0,835+0,00058*500 = 1,125</math>, Вт/(м К)</p> <p>1) <math>t_2 = 900-3500*0,25/1,125 = 122^\circ\text{C}</math>  <math>t_{\text{сер}} = (900+122)/2 = 511^\circ\text{C}</math>, <math>\lambda_{\text{сер}} = 0,835+0,00058*511 = 1,131</math>, Вт/(м К)</p> <p>2) <math>t_2 = 900-3500*0,25/1,131 = 126^\circ\text{C}</math>  <math>t_{\text{сер}} = (900+126)/2 = 513^\circ\text{C}</math>, <math>\lambda_{\text{сер}} = 0,835+0,00058*513 = 1,133</math>, Вт/(м К)</p> <p>3) <math>t_2 = 900-3500*0,25/1,133 = 127,7^\circ\text{C}</math></p> <p>Різниця між останньою та передостанньою температурами складає <math>(127,7-126)/126=0,013</math>, тому можна стверджувати, що з точністю 1,3% <math>t_2 = 128^\circ\text{C} &gt; 120^\circ\text{C}</math>.  Таким чином деревину небезпечно зберігати у дотик із даною піччю.</p>	
<p>3.2. Розрахунок втрат тепла крізь циліндричний шар</p>	<p>У випадку циліндричної симетрії рівняння стаціонарної теплопровідності (закон Фур'є ) набуває вид</p> $\frac{q_l}{2\pi \cdot r} = -\lambda(t) \cdot \frac{dt}{dr}$ <p>де <math>q_l</math> – лінійний питомий тепловий потік крізь циліндричну стінку стінку, Вт/м; <math>\lambda(t)</math> - коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки, Вт/(м К); <math>dt/dr</math> – похідна від температури <math>t</math> по радіусу <math>r</math> (яка у даному випадку співпадає за величиною із градієнтом температури).</p> <p>Якщо проінтегрувати останнє рівняння за умови незмінності <math>q_l</math>, від <math>r_1</math> до <math>r_2</math>, то воно набуває вид</p> $q_l = \frac{2\pi \cdot \lambda_{\text{сер}}}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} (t_1 - t_2) \quad (6)$ <p>де <math>t_1</math> і <math>t_2</math> – температура у точках із радіусами <math>r_1</math> та <math>r_2</math>, відповідно (дивись рисунок), а <math>\lambda_{\text{сер}}</math> - середнє значення коефіцієнта теплопровідності на інтервалі температур від <math>t_1</math> до <math>t_2</math></p>	<p>Викладач нагадує новий матеріал.</p>

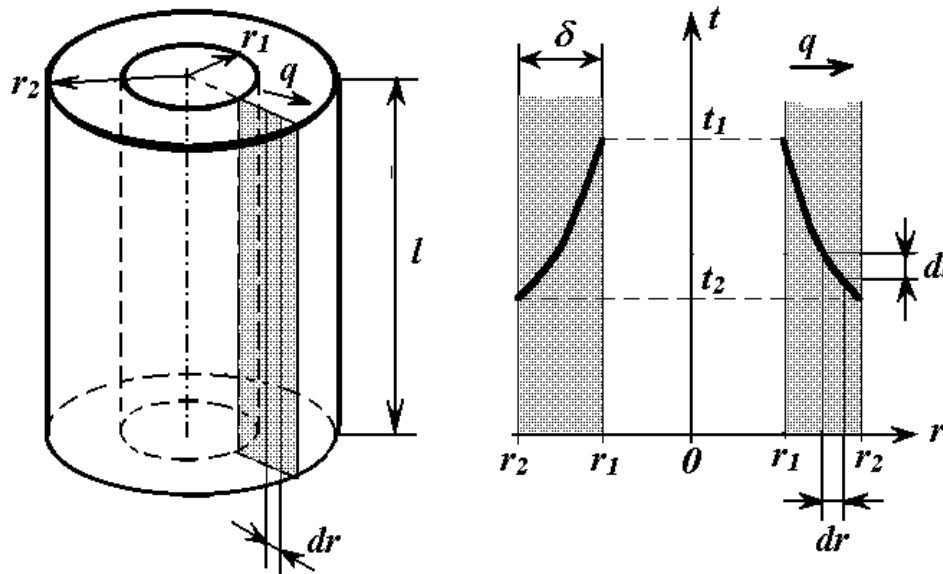


Рисунок - Схема циліндричної стінки та графік залежності температури  $t$  стінки від відстані  $r$  від осі:  
 $l$  – довжина стінки;  $r_1$  та  $r_2$  – радіуси внутрішньої та зовнішньої поверхонь стінки;  $\delta = r_2 - r_1$  - товщина стінки;  $t_1$  та  $t_2$  – температури на внутрішній та зовнішній поверхнях стінки;  $dt$  - зміна температури шару, яка відповідає зміні відстані  $dr$ ; стрілкою  $q$  показано напрямок теплового потоку.

Задача3. Розрахувати товщину циліндричного теплоізоляційного шару з скловати на паропроводі діаметром 20 см, якщо температура поверхні паропроводу досягає 200°C, температура на зовнішній поверхні теплоізоляції не повинна перевищувати 90°C, а теплові втрати складають 40 Вт/м.

$$t_1 = 200^\circ\text{C}, \quad t_2 = 90^\circ\text{C}, \quad q_1 = 40 \text{ Вт/м}, \quad d_1 = 20 \text{ см}, \quad \lambda = 0,055 \text{ Вт/(м К)}$$

-----  
 $\delta$  - ?

З рівняння (6) отримуємо

$$r_2 = r_1 \cdot \exp\left[\frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda}{q_1} \cdot (t_1 - t_2)\right] = \frac{0.20}{2} \cdot \exp\left[\frac{2 \cdot 3.14 \cdot 0.055}{40} (200 - 90)\right] = 0.26 \text{ м}$$

Таким чином товщина шару теплоізоляції із скловати складатиме

До дошки викликається курсант (студент)

	$\delta = r_2 - r_1 = 0,26 - 0,10 = 0,16 \text{ м.}$	
4. Підведення підсумків ПЗ та завдання на СП	<p>Оцінюється робота, оцінки повідомляються та виставляються до журналу групи.</p> <p>Завдання на СП:</p> <p>Повторити тему по</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Рябова І.Б., Сайчук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі. - Харків: АПБУ, 2002. (Глава 8).</li> <li>2) Підготуватися до письмового опитування (задача) по темі "Стационарна теплопровідність крізь одношарові стінки".</li> </ol>	

Тема: Конвекційний теплообмін.

Тема заняття: "Теплообмін при вільній конвекції в задачах пожежної безпеки."

Мета заняття: 1. Повторити та закріпити матеріал лекції "Теплообмін при вільній конвекції".

2. Навчити застосуванню законів теплообміну при вільній конвекції при рішенні задач ПБ.

Час: 2 години (2\*40 хв.).

Місце проведення заняття: лабораторія термодинаміки та теплопередачі.

Матеріальне забезпечення: 1) картки індивідуального контролю (задача) по темі "Теплопровідність";

2) Таблиці властивостей рідин і таблиці критеріальних рівнянь.

Література: 1. Рябова І.Б., Сайчук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі. -Харків: АПБУ, 2002.

2. Башкирцев М.П. Задачник по теплопередаче в пожарном деле. -М.: ВИПТШ МВД СССР.

3. Краснощеков Е.А., Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче. -М.: Энергия.

4. А.Я. Шаршанов, І.В. Сайчук. Термодинаміка і теплопередача. Методичні вказівки до вивчення курсу та контрольні завдання. - Харків: УЦЗУ, 2007. - 165 с.

#### Загальні методичні вказівки

1. Прийняти рапорт у чергового, перевірити наявність курсантів (слухачів) на заняттях.
2. Перевірити забезпеченість заняття відповідною літературою.
3. Назвати тему ПЗ, його мету. Об'явити порядок проведення заняття.
4. Перед вирішенням задач по новому матеріалу викладач опитуванням з'ясовує основні теоретичні положення по ньому.
5. Задачі вирішуються курсантами (слухачами) паралельно у дошки і на місцях. По ходу розв'язання для розгляду кожного нового пункту задачі до дошки викликається новий курсант (слухач). Одночасно курсантам (слухачам) задаються питання, що пов'язані із вирішенням задачі.
6. Рішення пов'язуються з виконанням ст.5 Закону України "Про правові засади цивільного захисту", а саме з задачами прогнозування розвитку, профілактика та подолання НС.
7. По кожному із пунктів рішення викладач дає необхідні пояснення, оцінює дії курсантів (слухачів).
8. Перед закінченням заняття викладач підводить підсумки роботи, оцінює відповіді окремих курсантів (слухачів) і видає завдання на самопідготовку.

#### План заняття

- |  |        |
|--|--------|
| 1. Організаційна частина.  | 5 хв.  |
| 2. Письмове опитування по індивідуальним карткам за темою „Конвекційний теплообмін”. | 10 хв. |
| 3. Закріплення матеріалу та рішення задач по темі „Конвекційний теплообмін”.         |        |
| 3.1. Нагадування матеріалу „Критеріальні рівняння теплообміну при вільній конвекції” | 15 хв. |

- 3.2. Розрахунок тепловіддачі при пожежі у приміщенні (вільна конвекція у великому об'ємі, площа) 15 хв.
- 3.3. Розрахунок тепловіддачі у системі підігріву води у пожежному автомобілі (вільна конвекція у великому об'ємі, труба) 15 хв.
- 3.4. Розрахунок тепловіддачі крізь протипожежну відступку печі (вільна конвекція в обмеженому об'ємі) 15 хв.
5. Підведення підсумків ПЗ та завдання на СП. 5 хв.

Назва питання	Стислий зміст питання, що розглядається				Метод. вказівки
1	2				3
1. Організаційна частина.	Прийняти доповідь в чергового. Перевірити зовнішній вигляд та наявність студентів. Оголосити порядок проведення заняття.				
2. Письмове опитування по індивідуальним карткам.	10 хвилин на одну задачу по темі „Теплопровідність”. При рішенні дозволяється використувати номограму для визначення ступеню опромінюваності (у підручнику).				Рішення без використання конспектів
<b>3. Закріплення матеріалу та рішення задач по темі „Конвекційний теплообмін”.</b>					
3.1. Критеріальні рівняння теплообміну при вільній конвекції	<p>Теплообмін описується, спираючись на критеріальні рівняння вільної конвекції, які визначають критерій Нуссельта через критерії Грасгофа та Прантля. Він визначається характером руху рідини, який у випадку вільної конвекції залежить від чисельного значення добутку <math>(Gr \cdot Pr)</math>. Кожен з визначених параметрів є функцією геометрії процесу теплообміну та температур рідини <math>t_f</math> та стінки <math>t_w</math>.</p> <p>Критеріальне рівняння для розрахунку середнього коефіцієнту тепловіддачі по середній температурі має вид</p> $Nu_m = C \cdot (Gr \cdot Pr)_m^n$				Нагадується викладачем.
	$(Gr \cdot Pr)_m$	Режим руху	C	n	
	$<10^{-3}$	плівковий	0,5	0	
	$10^{-3}-5 \cdot 10^2$	перехідний	1,18	1/8	
	$5 \cdot 10^2-2 \cdot 10^7$	ламінальний	0,54	1/4	
	$2 \cdot 10^7-10^{13}$	турбулентний	0,135	1/3	
	У якості характерного розміру беруться : d-діаметр горизонтальної труби ; b-мінімальний змір горизонтальної плити, стіни, труби.				

<p>У випадку горизонтальної плити отримане значення коефіцієнта тепловіддачі увзбільшують 30%, якщо тепло передається догори (теплообмін посилює рух рідини), умзменьшують на 30% и тепловіддачі тепла додолу(якщо теплообмін не сприяє посиленню руху рідини).</p> <p>Індекси вказують на те, що за визначальну температуру прийнято середню температуру <math>f -</math> рідини, <math>w</math>-стінки, <math>m</math>-средня між рідиною та стінкою (<math>t_m = (t_f + t_w)/2</math>).</p> <p>Критеріальне рівняння для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі по температурі рідини и конвекції у великому об'ємі .</p> $Nu_f = C*(Gr*Pr)_f^n*(Pr_f/Pr_w)^{0,25}$									
	$(Gr*Pr)_f$	Режим руху	C	n	Об'єкт	Характерн. розмір	Вид Nu	Додаткові вимоги	
	$10^3 - 10^9$	ламінарний	0,50	0,25	горизонт. труба	d-зовн. діаметр	середній		
			0,76	0,25		вертик. стіна, труба	h - висота	середній	$t_w = const$
			0,55	0,25		х – поточна відстань	місцевий	$t_w = const$	$q = const$
			0,60						
	$10^9 - 10^{10}$	перехідний		0,25					
	$>6*10^{10}$	турбулент.	0,15	0,33		х – поточна відстань	місцевий	$t_w = const$	
<p>Критеріальне рівняння для розрахунку множника <math>\epsilon</math> для отримання ефективного коефіцієнта теплопровідності при вільній конвекції в плоскому зазорі має вид :</p> $\epsilon = C*(Gr*Pr)_f^n$									
	$(Gr*Pr)_f$		C		n		Примітки		



	$< 10^3$	1	0	
	$10^3-10^6$	0,105	0,3	
	$10^6-10^{10}$	0,4	0,2	
	$10^3-10^{10}$	0,18	0,25	наближ. формула
	<p>За характерний розмір приймається ширина зазору <math>h</math>. За характерну температуру рідини - середнє арифметичне значення між температурами (<math>t_1</math> и <math>t_2</math>) протилежних ітомий ю стінок, що обмежують зазор. За температурний напір приймають (<math>t_1-t_2</math>), питомий тепловий потік дорівнює :</p> $q=(\epsilon*\lambda/h)*(t_2-t_1),$ <p>де <math>\lambda</math>-коефіцієнт теплопровідності рідини.</p>			
3.2. Розрахунок тепловіддачі при пожежі у приміщенні (плоска стінка)	<p>Задача 1. Визначити тепловий потік, що віддається димовими газами стінам, стелі та підлозі приміщення при пожеж. Внутрішні розміри приміщення: ширина <math>b=4</math> м, довжина <math>L=6</math>м, висота <math>h=3,5</math> м. Середня температура димових газів <math>t_f=100</math> °С, температура поверхонь огорожуючи конструкцій <math>t_w=45</math>°С.</p> <p><math>b=4</math> м , <math>L=6</math>м, <math>h=3,5</math> м  <math>t_f=100</math> °С, <math>t_w=45</math>°С.</p> <p>1) З додатку виписуємо фізичні параметри димових газів при визначальній температурі <math>t_f=100</math> °С:  <math>\lambda = 3,12 \cdot 10^{-2} \text{ Bm} / (\text{m} \cdot \text{K}), \nu = 21,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{c}, \text{Pr}_f = 0.69</math></p> <p>2) Характерний лінійний розмір для стін є висота <math>l= h=3,5</math> м.</p> <p>3) Добуток визначаючих критеріїв Грасгофа та Прантля  <math display="block">\text{Gr}_f \cdot \text{Pr}_f = \frac{\beta \cdot g \cdot \Delta t \cdot l^3}{\nu^2} \text{Pr}_f = \frac{9.8 \cdot (100 - 45) \cdot 3.5^3}{(273 + 100) \cdot (21.5 \cdot 10^{-6})^2} \cdot 0.69 = 9.08 \cdot 10^{10} &gt; 6 \cdot 10^{10}</math>, тобто режим руху турбулентний.</p> <p>4) Середнє значення критерія подібності Нуссельта  <math display="block">\text{Nu}_f = 0.15(\text{Gr}_f \cdot \text{Pr}_f)^{0.33} = 0.15 \cdot (9.08 \cdot 10^{10})^{0.33} = 664.</math></p> <p>5) Середній коефіцієнт теплообміну  <math display="block">\alpha = \text{Nu}_f \cdot \lambda / l = 664 \cdot 3.12 \cdot 10^{-2} / 3.5 = 5.92 \text{ Bm} / (\text{m}^2 \text{K})</math></p> <p>6) Площа поверхні теплообміну  <math display="block">F = 2(b + L)h = 2(4 + 6) \cdot 3.5 = 70 \text{ m}^2.</math></p> <p>7) Тепловий потік крізь стіни</p>			<p>Викликається курсант (студент).</p> <p>На кожному пункті рішення задачі викликається курсант (студент).</p> <p>При складнощях задаються питання студента.</p>

	$Q_{стл} = \alpha \cdot F \cdot (t_f - t_w) = 5.92 \cdot 70(100 - 45) = 22792 \text{ Вт}.$ <p>8) Характерний лінійний розмір для стелі та полу <math>l = b = 4 \text{ м}</math>  9) Добуток визначаючих критеріїв Грасгофа та Прантля</p> $Gr_f \cdot Pr_f = \frac{\beta \cdot g \cdot \Delta t \cdot l^3}{\nu^2} Pr_f = \frac{9.8 \cdot (100 - 45) 4^3}{(273 + 100) \cdot (21.5 \cdot 10^{-6})^2} \cdot 0.69 = 1.36 \cdot 10^{11} > 6 \cdot 10^{10} \text{ тобто режим руху турбулентний.}$ <p>10) Середнє значення критерія подібності Нуссельта</p> $Nu_f = 0.15 (Gr_f \cdot Pr_f)^{0.33} = 0.15 \cdot (1.36 \cdot 10^{11})^{0.33} = 759.$ <p>11) Середній коефіцієнт теплообміну</p> $\alpha = Nu_f \cdot \lambda / l = 759 \cdot 3.12 \cdot 10^{-2} / 4 = 5.92 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \text{ К})$ <p>12) Для стелі коефіцієнт тепловіддачі збільшується на 30% через те, що розтошування поверхонь сприяє руху рідини</p> $\alpha_{стл} = 1.3\alpha = 1.3 \cdot 5.92 = 7.70 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \text{ К})$ <p>13) Тепловий потік крізь стелю дорівнює</p> $Q_{стл} = \alpha_{стл} \cdot F_{стл} \cdot (t_f - t_w) = 7.7 \cdot 24(100 - 45) = 99780 \text{ Вт}.$ $F_{стл} = b \cdot L = 4 \cdot 6 = 24 \text{ м}^2$ <p>14) Для підлоги коефіцієнт тепловіддачі зменшується на 30% через те, що розташування поверхонь не сприяє руху рідини</p> $\alpha_{підл} = 0.7\alpha = 0.7 \cdot 5.92 = 4.14 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \text{ К}).$ <p>15) Площа поверхні підлоги дорівнює площі поверхні стелі</p> $F_{підл} = b \cdot L = 4 \cdot 6 = 24 \text{ м}^2$ <p>16) Тепловий потік крізь підлогу дорівнює</p> $Q_{підл} = \alpha_{підл} \cdot F_{підл} \cdot (t_f - t_w) = 4.14 \cdot 24(100 - 45) = 53650 \text{ Вт}.$	<p>дентам на місцях.</p> <p>Викликається курсант (студент).</p>
<p>3.3. Розрахунок тепловіддачі у системі підігріву води у пожежному автомобілі.</p>	<p>Задача 2. В цистерні пожежного автомобіля для підігріву води вихлопними газами змонтовано трубопровід діаметром <math>d = 53 \text{ мм}</math>. Температура води у цистерні <math>t_f = 10 \text{ }^\circ\text{C}</math>, температура зовнішньої поверхні трубопроводу <math>t_w = 20 \text{ }^\circ\text{C}</math>. Визначити кількість тепла, яка передається до води з одного метру трубопроводу.</p> <p><math>t_f = 10 \text{ }^\circ\text{C}</math>,  <math>t_w = 20 \text{ }^\circ\text{C}</math></p> <p>1) З додатку виписуємо фізичні параметри води при температурі <math>t_f = 10 \text{ }^\circ\text{C}</math>: <math>\lambda_f = 57.5 \cdot 10^{-2} \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{ }^\circ\text{C})</math>, <math>\nu_f = 1.31 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}</math>, <math>Pr_f = 9.52</math></p>	<p>На кожний пункт рішення задачі виклика-</p>

	<p><math>d = 53\text{мм}</math> <math>\beta_f = 0,7 \cdot 10^{-4} / \hat{E}</math>.</p> <p>Критерій Прантля при температурі поверхні труби</p> <p><math>Q_l - ?</math> <math>t_w = 20^\circ\text{C}</math> дорівнює <math>Pr_w = 7.02</math>.</p> <p>2) Визначимо вид критеріального рівняння. Для цього розрахуємо добуток визначаючих</p> $Gr_f \cdot Pr_f = \frac{\beta \cdot g \cdot \Delta t \cdot d^3}{\nu^2} Pr_f = \frac{0,7 \cdot 10^{-4} \cdot 9,8 \cdot (20 - 10) \cdot 0,053^3}{(1,31 \cdot 10^{-6})^2} \cdot 9,52 = 5,67 \cdot 10^6 > 10^9.$ <p>3) Середнє значення критерія подібності Нуссельта</p> $Nu_f = 0,5 (Gr_f \cdot Pr_f)^{0,25} \cdot \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25} = 0,5 \cdot (5,67 \cdot 10^6)^{0,25} \cdot \left( \frac{9,52}{7,02} \right)^{0,25} = 26,3.$ <p>4) Середній коефіцієнт тепловіддачі</p> $\alpha = Nu_f \cdot \lambda / d = 26,3 \cdot 57,5 \cdot 10^{-2} / 0,053 = 267 \hat{\text{A}} \delta / (\hat{\text{i}}^2 \hat{E}).$ <p>5) Тепловий потік з одного метра труби</p> $Q_l = \alpha \cdot F \cdot (t_f - t_w) = \alpha \cdot \pi \cdot d \cdot (t_f - t_w) = 267 \cdot 3,14 \cdot 0,053 (20 - 10) = 444 \text{Вт} / \text{м}.$	<p>ється курсант (студент).</p>
<p>3.4. Розрахунок тепловіддачі крізь протипожежну відступку</p>	<p>Задача 3. Протипожежна закрита відступка печі має товщину <math>\delta = 130\text{мм}</math>. Визначити густину теплового потоку від поверхні печі до поверхні, що згоряє, у конвекційному теплообміні за умови, що температура поверхні, що згоряє <math>t_{w1} = 50^\circ\text{C}</math>, а температура поверхні печі <math>t_{w2} = 110^\circ\text{C}</math>.</p> <p><math>\delta = 130\text{мм}</math> <math>t_{w1} = 50^\circ\text{C}</math> <math>t_{w2} = 110^\circ\text{C}</math>.</p> <p>1) Визначимо температуру повітря у прошарку</p> $t_m = \frac{t_{w1} + t_{w2}}{2} = \frac{110 + 50}{2} = 80^\circ\text{C}.$ <p>2) Фізичні параметри повітря при температурі <math>t_m</math></p> $\lambda = 3,04 \cdot 10^{-2} \text{Вт} / (\text{м} \cdot \text{К}), \nu = 21,1 \cdot 10^{-6} \text{м}^2 / \text{с}, Pr_f = 0,69.$ <p><math>q - ?</math></p> <p>3) Добуток визначаючих критеріїв дорівнює</p> $(Gr \cdot Pr)_m = \frac{\beta \cdot g \cdot \Delta t \cdot \delta^3}{\nu^2} Pr_f = \frac{9,8 \cdot (110 - 50) \cdot 0,13^3}{(273 + 80) \cdot (21,1 \cdot 10^{-6})^2} \cdot 0,69 = 5,67 \cdot 10^6 > 10^6,$ <p>таким чином коефіцієнт конвекції дорівнює</p> $\varepsilon = 0,4 \cdot (Gr \cdot Pr)_m^{0,2} = 0,4 \cdot (5,67 \cdot 10^6)^{0,2} = 8,97.$ <p>4) Еквівалентний коефіцієнт теплопровідності дорівнює</p> $\lambda_{екв} = \lambda \cdot \varepsilon = 3,04 \cdot 10^{-2} \cdot 8,97 = 0,273 \text{Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$	<p>На кожний пункт рішення задачі викликається курсант (студент).</p>

	<p>5) Густина теплового потоку дорівнює</p> $q = \lambda_{екв} / \delta \cdot (t_{w1} - t_{w2}) = 0.273 / 0.13 \cdot (110 - 50) = 126 \text{ Вт} / \text{м}^2.$	
<p>4. Підведення підсумків заняття та завдання на самопідготовку.</p>	<p>Оцінюється робота курсантів (студентів), оцінки оголошуються та виставляються до журналу групи. Нагадується порядок здачі заборгованостей.</p> <p>Повторити тему по:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Конспекту лекцій.</li> <li>2. І.Б.Рябова, І.В.Сайчук, А.Я.Шаршанов Термодинаміка та теплопередача упожежній справі. – Харків: АПБУ, 20002. – 352 с.</li> <li>3. Підготуватися до лабораторної роботи "Визначення критеріального рівняння теплообміну повітря навколо горизонтальної труби.</li> </ol>	

Тема: Конвекційний теплообмін.

Тема заняття: **"Розрахунок теплообміну при вимушеній конвекції в задачах пожежної безпеки."**

Мета заняття: 1. Повторити та закріпити матеріал лекції "Теплообмін при вимушеній конвекції".  
2. Навчити застосуванню законів теплообміну при вимушеній конвекції при рішенні задач ПБ.

Час: 2 години (2\*40 хв.).

Місце проведення заняття: лабораторія термодинаміки та теплопередачі.

Матеріальне забезпечення: 1) картки індивідуального контролю (задача) по темі "Теплообмін при вільній конвекції";  
2) методичні вказівки та контрольне завдання з дисципліни "Термодинаміка та теплопередача";  
3) довідникові таблиці властивостей рідин та критеріальних рівнянь.

Література: 1. Рябова І.Б., Сайчук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі. -Харків: АПБУ, 2002.

2. Башкирцев М.П. Задачник по теплопередаче в пожарном деле. -М.: ВИПТШ МВД СССР.

3. Краснощеков Е.А., Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче. -М.: Энергия.

4. А.Я. Шаршанов, І.В. Сайчук. Термодинаміка і теплопередача. Методичні вказівки до вивчення курсу та контрольні завдання. - Харків: УЦЗУ, 2007. - 165 с.

#### План заняття.

- |  |        |
|--|--------|
| 1. Організаційна частина.  | 5 хв.  |
| 2. Контрольне опитування по карткам (задачі по темі "Теплообмін при вільній конвекції")      | 25 хв. |
| 3. Закріплення матеріалу та рішення нових задач по темі "Теплообмін при вимушеній конвекції" |        |
| 3.1. Загальні положення теорії подібності у випадку вимушеної конвекції                      | 5 хв.  |
| 3.2. Розрахунок тепловіддачі при русі димових газів у димарі (вимушена конвекція у каналі)   |        |
| 3.2.1 Перехідний режим руху  | 20 хв. |
| 3.2.2 Турбулентний режим руху  | 10 хв. |
| 3.3. Розрахунок тепловіддачі у вогнеперешкоджувачі (ламінарна конвекція у каналі)            | 10 хв. |
| 4. Підведення підсумків ПЗ та завдання на самопідготовку.                                    | 5 хв.  |

Назва питання	Стислий зміст питання, що розглядається.	Метод. вказівки
1. Органі-	Прийняти рапорт у чергового, перевірити зовнішній вигляд та наявність курсантів	

заційна частина.	(слухачів) на заняттях. Перевірити забезпеченість заняття відповідною літературою. Назвати тему ПЗ, його мету. Об'явити порядок проведення заняття.		
2. Контрольне опитування	Курсанти (слухачі) письмово розв'язують індивідуальні задачі по карткам (по темі "Теплообмін при вільній конвекції")		Надає уточн. пояснення
	Закріплення матеріалу та рішення нових задач по темі "Теплообмін при вимушеній конвекції"		
3.1. Загальні положення теорії подібності у випадку вимушеної конвекції	У випадку вільної конвекції сильніше за все залежить від критерію Рейнольдса ( $Re = w \cdot l / \nu$ , де $w$ - характерна швидкість руху рідини, $l$ - характерний розмір процесу, $\nu$ - коефіцієнт кінематичної в'язкості рідини). Через це за даних умов теплообмін описується критеріальними рівняннями, у яких число Нуссельта визначається через критерії Рейнольдса та Прандтля. Визначаючі параметри залежать від геометрії теплообміну, орієнтації по відношенню до напрямку руху рідини, температур рідини $t_f$ та стінки $t_w$ . Індокси "f" та "w" вказують на те, яка температура прийнята за визначаючу. Конкретний вигляд критеріальних залежностей наведено у довідникових таблицях		Викладач нагадує новий матеріал.
3.2. Розрахунок тепловіддачі при русі димових газів у димарі (вимушена конвекція у каналі)	<p>Задача 1. Визначити питомий тепловий потік від димових газів до поверхні димаря із перерізом <math>0,125 \times 0,25</math> м. Димові газ рухаються із швидкістю 3 м/с. Температура газів <math>400^\circ\text{C}</math>, температура поверхні димаря <math>310^\circ\text{C}</math>.</p> <p>Що зміниться, якщо швидкість руху становитиме 6 м/с.</p> <p><math>a \cdot b = 0,125 \cdot 0,25</math> м</p> <p><math>w = 3</math> м/с (<math>w = 6</math> м/с)</p> <p><math>t_f = 400^\circ\text{C}</math> <math>t_w = 470^\circ\text{C}</math></p> <p><b>q - ?</b></p>	<p>1) Характерний лінійний розмір задачі становить</p> $l = d_{\text{екв}} = \frac{4F}{U} = \frac{4 \cdot a \cdot b}{2 \cdot (a + b)} = \frac{4 \cdot 0,125 \cdot 0,25}{2 \cdot (0,125 + 0,25)} = 0,167 \text{ м.}$	До дошки викликається курсант
3.2.1 Перехідний режим ру-	<p>2) Фізичні параметри димових газів при визначаючій температурі <math>t_f = 400^\circ\text{C}</math>:</p> $\lambda_f = 5,70 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м К)}; \nu_f = 60,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; Pr_f = 0,64; Pr_w = 0,65.$		У разі зупинки викликається

ху	<p>3) Критерій Рейнольдса</p> $Re_f = \frac{w * l}{\nu_f} = \frac{3 * 0.167}{60.4 * 10^{-6}} = 8290$ <p>4) Через те, що <math>2300 &lt; Re_f = 8290 &lt; 10000</math>, режим течії перехідний і тому критеріальне рівняння має вид</p> $Nu_f = K_0 * Pr_f^{0.43} * \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0.25}$ <p>У випадку течії газів можна нехтувати останнім множником</p> $\left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0.25} = \left( \frac{0.64}{0.65} \right)^{0.25} = 0.996 \approx 1,$ <p>Згідно з таблицею <math>K_0(8290)=28</math>, що для числа Нуссельта дає значення</p> $Nu_f = K_0 * Pr_f^{0.43} = 28 * 0.64^{0.43} = 23.1$ <p>5) Коефіцієнт тепловіддачі при конвекційному теплообміні становить</p> $\alpha = Nu_f \frac{\lambda_f}{d_{екв}} = 23.1 * \frac{5.70 * 10^{-2}}{0.167} = 7.88 \frac{Вт}{м^2 К}.$ <p>6) Питомий тепловий потік складає</p> $\mathbf{q} = \alpha * (t_f - t_w) = 7.88 * (400 - 310) = \mathbf{710 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}}.$	наступний курсант (слухач).
3.2.2 Турбулентний режим ру-	<p>Задача2. Попередня задача за тих саме умов з швидкістю збільшеною у два рази: <math>w = 6 \text{ м/с}</math></p> <p>3) У разі збільшення швидкості у два рази критерій Рейнольдса також збільшиться у два рази і становитиме</p>	До дошки викликається кур-

ху	<p style="text-align: center;"><math>Re_f = 8300 * 2 = 16600</math></p> <p>4) Через те, що <math>10000 &lt; Re_f = 16600</math>, режим течії турбулентний і тому згідно таблиць критеріальне рівняння дає</p> $Nu_f = C * Re_f^n * Pr_f^m * Gr_f^k * \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0.25} \quad \varepsilon_L = 0.021 * 16600^{0.8} * 0.64^{0.43} * 1 * 1 * 1 = 41.3$ <p>5) Коефіцієнт тепловіддачі при конвекційному теплообміні становить</p> $\alpha = Nu_f \frac{\lambda_f}{d_{екв}} = 43.1 * \frac{5.70 * 10^{-2}}{0.167} = 14.7 \frac{Вт}{м^2 К}$ <p>6) Питомий тепловий потік складає</p> $\mathbf{q} = \alpha * (t_f - t_w) = 14,7 * (400 - 310) = \mathbf{1320 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}}.$ <p>Отримана густина теплового потоку може бути використана для розрахунку протипожежних розділок.</p>	<p>сант (слухач)</p> <p>У разі зупинки викликається наступний курсант (слухач).</p>
3.3. Розрахунок тепловіддачі у вогнеперешкоджувачі (ламінарна конвекція у каналі)	<p>Задача 3. Визначити коефіцієнт теплообміну між димовими газами та поверхнею каналів вогнеперешкоджувача. Еквівалентний діаметр каналів становить 4 мм. Середня температура димових газів <math>900^\circ\text{C}</math>, швидкість їх руху по каналу 10 м/с. Середня температура стінок <math>400^\circ\text{C}</math>. Відношення довжини каналів до еквівалентного діаметру перевищує 50. (Рух крізь вогнеперешкоджувач розглядати, як течію у трубі.)</p> <p><math>d = 3 \text{ мм}; \quad w = 10 \text{ м/с} \quad t_f = 900^\circ\text{C}; \quad t_w = 400^\circ\text{C}</math></p> <p>-----</p> <p><math>\alpha - ?</math></p>	
	<p>1) Характерний розмір <math>l = d = 0.04 \text{ м}</math>.</p> <p>2) Фізичні параметри димових газів при визначаючій температурі <math>t_f = 900^\circ\text{C}</math>:</p> $\lambda_f = 9,98 * 10^{-2} \text{ Вт/(м К)}; \quad \nu_f = 152,5 * 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \quad Pr_f = 0.59.$	<p>До дошки викликається курсант (слухач)</p>



	<p>3) Критерій Рейнольдса</p> $Re_f = \frac{w * l}{\nu_f} = \frac{10 * 0.004}{152.5 * 10^{-6}} = 262$ <p>4) Через те, що <math>Re_f = 1970 &lt; 2300</math>, режим течії ламінарний і для подальшого уточнення слід розрахувати добуток критеріїв Грасгофа і Прандтля</p> $Gr_f \cdot Pr_f = \frac{\beta_f \cdot g \cdot \Delta t \cdot l^3}{\nu_f^2} Pr_f = \frac{9.8 \cdot (900 - 400) \cdot (4 \cdot 10^{-3})^3}{(273 + 900) \cdot (152.5 \cdot 10^{-6})^2} \cdot 0.59 = 6.8 < 8 \cdot 10^5,$ <p>тобто режим ламінарно-в'язкістий і</p> $Nu_f = C * Re_f^n * Pr_f^m * Gr_f^k * \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0.25} \quad \varepsilon_L = 3.66 * Re_f^0 * Pr_f^0 * Gr_f^0 * \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^0 \quad 1 = 3.66$ <p>5) Коефіцієнт тепловіддачі при конвекційному теплообміні становить</p> $\alpha = Nu_f \frac{\lambda_f}{l} = 3.66 * \frac{9.98 * 10^{-2}}{0.004} = 91.3 \frac{Вт}{м^2 К}.$	<p>хач)</p> <p>У разі зупинки ви-кликається наступний курсант (слухач).</p>
<p>4. Підведення підсумків ПЗ та завдання на СП</p>	<p>Оцінюється робота, оцінки повідомляються та виставляються до журналу групи.</p> <p>Завдання на СП:</p> <p>Повторити тему по</p> <p>2) Дорахувати та оформити задачі.</p> <p>Повторити тему "Теплообмін при вимушеній конвекції" по посібнику Рябова І.Б., Сайчук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі. -Харків: АПБУ, 2002. (Глава 9).</p>	

Тема: Конвекційний теплообмін.

Тема заняття: "Розрахунок теплообміну при вимушеній конвекції."

Мета заняття: 1. Повторити та закріпити матеріал лекції "Теплообмін при вимушеній конвекції".  
2. Навчити застосуванню законів теплообміну при вимушеній конвекції при рішенні задач ПБ.

Час: 2 години (2\*40 хв.).

Місце проведення заняття: лабораторія термодинаміки та теплопередачі.

Матеріальне забезпечення: 1) методичні вказівки та контрольне завдання з дисципліни "Термодинаміка та теплопередача";

2) довідникові таблиці властивостей рідин та критеріальних рівнянь.

Література: 1. Рябова І.Б., Сайчук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі. -Харків: АПБУ, 2002.

2. Башкирцев М.П. Задачник по теплопередаче в пожарном деле. -М.: ВИПТШ МВД СССР.

3. Краснощеков Е.А., Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче. –М.: Энергия.

4. А.Я. Шаршанов, І.В. Сайчук. Термодинаміка і теплопередача. Методичні вказівки до вивчення курсу та контрольні завдання. - Харків: УЦЗУ, 2007. - 165 с.

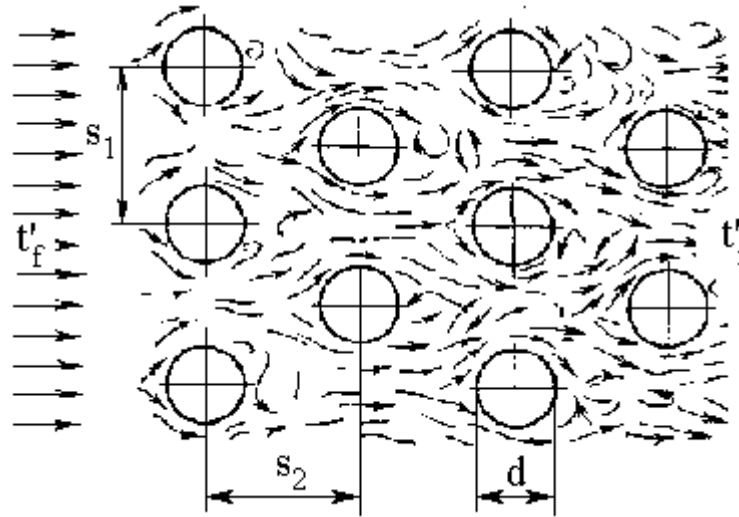
#### План заняття.

- |  |        |
|--|--------|
| 1. Організаційна частина.  | 5 хв.  |
| 2. Закріплення матеріалу та рішення нових задач по темі "Теплообмін при вимушеній конвекції" |        |
| 2.1. Загальні положення теорії подібності у випадку вимушеної конвекції                      | 5 хв.  |
| 2.2 Теплообмін при поперечному обтіканні поодинокі труби (охолодження рукава на морозі)      | 20 хв. |
| 2.3. Теплообмін при обтіканні пучка труб   | 25 хв. |
| 2.4. Розрахунок тепловіддачі охолодженні стіни повітрям (вимушена конвекція)                 | 20 хв. |
| 3. Підведення підсумків ПЗ та завдання на самопідготовку.                                    | 5 хв.  |

Назва питання	Стислий зміст питання, що розглядається.	Метод. вказівки
1. Організаційна частина.	Прийняти рапорт у чергового, перевірити зовнішній вигляд та наявність курсантів (слухачів) на заняттях. Перевірити забезпеченість заняття відповідною літературою.	

	Назвати тему ПЗ, його мету. Об'явити порядок проведення заняття.		
2	Закріплення матеріалу та рішення нових задач по темі "Теплообмін при вимушеній конвекції"		
2.1. Загальні положення теорії подібності у випадку вимушеної конвекції	У випадку вільної конвекції сильніше за все залежить від критерію Рейнольдса ( $Re=w \cdot l / \nu$ , де $w$ - характерна швидкість руху рідини, $l$ – характерний розмір процесу, $\nu$ – коефіцієнт кінематичної в'язкості рідини). Через це за даних умов теплообмін описується критеріальними рівняннями, у яких число Нуссельта визначається через критерії Рейнольдса та Прандтля. Визначаючи параметри залежать від геометрії теплообміну, орієнтації по відношенню до напрямку руху рідини, температур рідини $t_f$ та стінки $t_w$ . Індокси "f" та "w" вказують на те, яка температура прийнята за визначаючу. Конкретний вигляд критеріальних залежностей наведено у довідникових таблицях		Викладач нагадує новий матеріал.
2.2. Теплообмін при поперечному обтіканні поодинокій труби	Задача 1. Рукавна лінія діаметром 66 мм поперечно обдувається повітрям, що має швидкість 5 м/с. Температура повітря становить $t_f = -20^\circ\text{C}$ . Температура на зовнішній поверхні рукавної лінії складає $t_w = 0^\circ\text{C}$ . Визначити коефіцієнт теплообміну і втрати тепла з 1 м рукавної лінії. Як зміниться коефіцієнт тепловіддачі, якщо повітря омиває рукав під кутом у $60^\circ$ .	До дошки викликається курсант (слухач)	
	$d = 66 \text{ мм}; w = 5 \text{ м/с}$ $t_f = -20^\circ\text{C}; t_w = 0^\circ\text{C}$ $\psi = 60^\circ$	1) Характерний розмір $l = d = 0.066 \text{ м}$ . 2) Фізичні параметри повітря при визначаючій температурі $t_f = -20^\circ\text{C}$ : $\lambda_f = 2,28 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м К)}; \nu_f = 12,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; Pr_f = 0.716$ .	
	$\alpha - ? q_l - ? \alpha_\psi - ?$		
	3) Критерій Рейнольдса $Re_f = \frac{w \cdot l}{\nu_f} = \frac{5 \cdot 0.066}{12.8 \cdot 10^{-6}} = 25800$ 4) Через те, що $1 \cdot 10^3 < Re_f = 25800 < 2 \cdot 10^5$ критеріальне рівняння згідно таблиць має вид $Nu_f = C \cdot Re_f^n \cdot Pr_f^m \cdot \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0.25} = 0.25 \cdot 25800^{0.6} \cdot 0.716^{0.38} = 97.7$ 5) Коефіцієнт тепловіддачі при конвекційному теплообміні становить		У разі зупинки викликається наступний курсант (слухач)

	$\alpha = Nu_f \frac{\lambda_f}{d} = 97.7 \cdot \frac{2.28 \cdot 10^{-2}}{0.066} = 33.8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ К}}$ <p>6) Лінійний питомий тепловий потік складає</p> $q_l = \pi \cdot d \cdot \alpha \cdot (t_w - t_f) = 3.14 \cdot 0.066 \cdot 33.8 \cdot (0 - (-20)) = \underline{140 \text{ Вт/м}}$ <p>7) При обтіканні поодинокого циліндра під кутом <math>\psi</math>, що відрізняється від <math>90^\circ</math>, коефіцієнт тепловіддачі дорівнює</p> $\alpha_\psi = \alpha_{90} \cdot \varepsilon_\psi, \text{ де } \varepsilon_\psi = 1 - 0,54 \cdot \cos^2(\psi),$ <p>а <math>\alpha_{90}</math>- коефіцієнт тепловіддачі при поперечному обтіканні, тобто за умови <math>\psi = 90^\circ</math>. Таким чином</p> $\alpha_\psi = 33,8 \cdot [1 - 0,54 \cdot \cos^2(60^\circ)] = 33.8 \cdot 0.865 = 29.2 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$					
<p>2.3. Теплообмін при обтіканні пучка труб</p>	<p>Задача 2. Визначити середній коефіцієнт тепловіддачі поміж поперечним потоком димових газів та стінками труб котельного пучку. Труби діаметром <math>d = 80</math> мм розташовані у шаховому порядку. Середня швидкість потоку газів у вузькому перетині пучку <math>10</math> м/с. У напрямку руху потоку газів у пучку розташовано 4 рядки труб з однаковою поверхнею. Відстань між осями труб поперек потоку складає <math>s_1 = 2 \cdot d</math>, а вздовж потоку - <math>s_2 = 1.5 \cdot d</math>. Температура газів перед пучком дорівнює <math>t_f' = 1100^\circ\text{C}</math>, <math>t_f'' = 900^\circ\text{C}</math>.</p>	<p>До дошки викликається курсант (слухач)</p>				
	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td data-bbox="376 1050 790 1225"> <math>d = 80 \text{ мм}; w = 10 \text{ м/с}</math>  <math>t_f' = 1100^\circ\text{C}; t_f'' = 900^\circ\text{C}</math>  <math>s_1 = 2 \cdot d, s_2 = 1.5 \cdot d</math>  <math>n = 4</math> </td> <td data-bbox="790 1050 1899 1225"> <p>1) Характерний розмір <math>l = d = 0.080 \text{ м}</math>. Характерна температура димових газів</p> <math display="block">t_f = (t_f' + t_f'')/2 = (1100 + 900)/2 = 1000^\circ\text{C}</math> </td> </tr> <tr> <td data-bbox="376 1225 790 1273"> <math>\alpha_{\text{сеп}} - ?</math> </td> <td data-bbox="790 1225 1899 1273"></td> </tr> </table>	$d = 80 \text{ мм}; w = 10 \text{ м/с}$ $t_f' = 1100^\circ\text{C}; t_f'' = 900^\circ\text{C}$ $s_1 = 2 \cdot d, s_2 = 1.5 \cdot d$ $n = 4$	<p>1) Характерний розмір <math>l = d = 0.080 \text{ м}</math>. Характерна температура димових газів</p> $t_f = (t_f' + t_f'')/2 = (1100 + 900)/2 = 1000^\circ\text{C}$	$\alpha_{\text{сеп}} - ?$		
$d = 80 \text{ мм}; w = 10 \text{ м/с}$ $t_f' = 1100^\circ\text{C}; t_f'' = 900^\circ\text{C}$ $s_1 = 2 \cdot d, s_2 = 1.5 \cdot d$ $n = 4$	<p>1) Характерний розмір <math>l = d = 0.080 \text{ м}</math>. Характерна температура димових газів</p> $t_f = (t_f' + t_f'')/2 = (1100 + 900)/2 = 1000^\circ\text{C}$					
$\alpha_{\text{сеп}} - ?$						
	<p>2) Фізичні параметри димових газів при визначаючій температурі <math>t_f = 1000^\circ\text{C}</math>:</p> $\lambda_f = 10,9 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м К)}; \nu_f = 174 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; Pr_f = 0.58.$	<p>У разі зупинки викликається наступний</p>				



3) Критерій Рейнольдса

$$Re_f = \frac{w \cdot l}{\nu_f} = \frac{10 \cdot 0.080}{174 \cdot 10^{-6}} = 4600$$

4) Через те, що  $2 \cdot 10^2 < Re_f = 4600 < 2 \cdot 10^5$  критеріальне рівняння згідно таблиць має вид

$$Nu_f = C \cdot Re_f^n \cdot Pr_f^m \cdot \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0.25} \cdot \epsilon_s = 0.41 \cdot 4600^{0.6} \cdot 0.58^{0.33} \cdot 1 \cdot \left( \frac{2}{1.5} \right)^{1/6} = 56.6$$

5) Коефіцієнт тепловіддачі для третього і подальшого рядків труб становить

$$\alpha = Nu_f \frac{\lambda_f}{d} = 56.6 \cdot \frac{10.9 \cdot 10^{-2}}{0.080} = 77.1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}$$

6) Згідно таблиць у випадку шахової компановки середній коефіцієнт тепловіддачі дорівнює

	$\alpha_{\text{сер}} = \alpha \frac{0.6 + 0.7 + n - 2}{n} = 77.1 * \frac{0.6 + 0.7 + 4 - 2}{4} = 77.1 * 0.825 = 63.6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ К}}$	
<p>2.4. Розрахунок тепловіддачі охолодження стіни повітрям (вимушена конвекція)</p>	<p>Задача 3. Поверхня стіни будівлі при пожежі нагрілася до температури 160°C. Ця поверхня обтикається повздовжнім потоком повітря із швидкістю 10 м/с і температурою -10°C. Довжина стіни у напрямку руху потоку складає 6 м. Визначити середній питомий тепловий потік від стіни до повітря у конвекційному теплообміні.</p> <p><math>L = 6 \text{ м}; w = 10 \text{ м/с}; t_f = -10^\circ\text{C}; t_w = 160^\circ\text{C}</math></p> <p>-----</p> <p><math>q - ?</math></p> <p>1) Характерний розмір <math>l = L = 6 \text{ м}</math>.</p> <p>2) Фізичні параметри повітря при визначаючій температурі <math>t_f = -10^\circ\text{C}</math>:</p> <p><math>\lambda_f = 2,36 * 10^{-2} \text{ Вт/(м К)}; \nu_f = 12,43 * 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \text{Pr}_f = 0.712</math>.</p> <p>3) Критерій Рейнольдса <math>\text{Re}_a = \text{Re}_f = \frac{w * l}{\nu_f} = \frac{10 * 6}{12.43 * 10^{-6}} = 4.83 * 10^6</math></p> <p>4) Через те, що <math>\text{Re}_a = \text{Re}_f = 4.83 * 10^6 &gt; 5 * 10^5</math> і ми шукаємо середній питомий потік, критеріальне рівняння згідно таблиць має вид</p> <p><math>\text{Nu}_f = \text{Nu}_a = C * \text{Re}_a^n = 0.032 * (4.83 * 10^6)^{0.8} = 7120</math></p> <p>5) Коефіцієнт тепловіддачі при конвекційному теплообміні становить</p> <p><math display="block">\alpha = \text{Nu}_f \frac{\lambda_f}{d} = 7120 * \frac{2.36 * 10^{-2}}{6} = 28 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ К}}</math></p>	<p>До дошки викликається курсант (слухач)</p>

	<p>6) Питомий тепловий потік складає</p> $q = \alpha \cdot (t_w - t_f) = 28 \cdot (160 - (-10)) = 4760 \text{ Вт/м}^2.$	
<p>3. Підведення підсумків ПЗ та завдання на СП</p>	<p>Оцінюється робота, оцінки повідомляються та виставляються до журналу групи. Завдання на СП: Повторити тему по</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>3) Дорахувати та оформити задачі.</li> <li>4) Розрахувати другу задачу у другій розрахунковій роботі (умови у метод вказівках для заочників).</li> <li>5) Повторити тему "Теплообмін при вимушеній конвекції" по посібнику Рябова І.Б., Сайчук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі. - Харків: АПБУ, 2002. (Глава 9).</li> </ol> <p>Підготуватися до письмового контролю по темі "Конвекційний теплообмін".</p>	

Тема: Теплопередача

Тема заняття: "Розрахунок характеристик процесу теплопередачі"

Мета заняття: 1. Повторити та закріпити матеріал лекції "Теплопередача".

2. Навчити застосуванню законів теплопередачі при рішенні задач ПБ.

Час: 2 години (2\*40 хв.).

Місце проведення заняття: лабораторія термодинаміки та теплопередачі.

Матеріальне забезпечення: 1) картки індивідуального контролю (задача) по темі "Стационарна теплопровідність";

2) Методичні вказівки та контрольне завдання з дисципліни "Термодинаміка та теплопередача".

Література: 1. Рябова І.Б., Сайчук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі. -Харків: АПБУ, 2002.

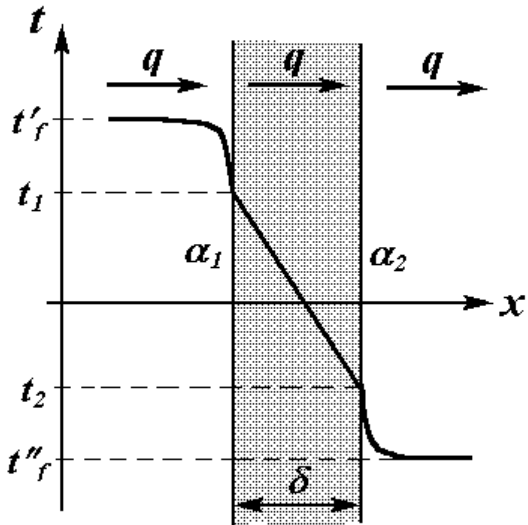
2. А.Я. Шаршанов, І.В. Сайчук. Термодинаміка і теплопередача. Методичні вказівки до вивчення курсу та контрольні завдання. - Харків: УЦЗУ, 2007. - 165 с.

#### План заняття.

1. Організаційна частина. 5 хв.
2. Контрольне опитування по карткам (задача) по темі " Стационарна теплопровідність" 15 хв.
3. Рішення задач по темі "Теплопередача"
  - 3.1. Розрахунок товщину шару теплоізоляції при теплопередачі крізь плоску стінку
    - 3.1.1. одношарову 20 хв.
    - 3.1.2. трьохшарову 15 хв.
  - 3.2. Розрахунок характеристик процесу теплопередачі у циліндричній стінці 20 хв.
4. Підведення підсумків ПЗ та завдання на самопідготовку. 5 хв.

Назва питання	Стислий зміст питання, що розглядається.	Метод. вказівки
1. Організаційна частина.	Прийняти рапорт у чергового, перевірити зовнішній вигляд та наявність курсантів (слухачів) на заняттях. Перевірити забезпеченість заняття відповідною літературою. Назвати тему ПЗ, його мету. Об'явити порядок проведення заняття.	
2. Контрольне опитування	Курсанти (слухачі) письмово вирішують задачі з індивідуальних карток по темі "Стационарна теплопровідність"	Надає уточню-



тування		ючі пояснення
	3. Рішення задач по темі "Теплопередача"	
<p>3.1. Розрахунок товщини шару теплоізоляції при теплопередачі крізь плоску стінку</p>	<p>Розглянемо теплопередачу крізь одношарову стінку товщиною <math>\delta</math>, коефіцієнтом теплопровідності матеріалу <math>\lambda</math>. Температури теплоносіїв та коефіцієнти тепловіддачі по різні боки стінки <math>t'_f</math> та <math>t''_f</math> і <math>\alpha_1</math> та <math>\alpha_2</math>, відповідно (див. рис.1).</p>  <p>Рисунок 1 - Схема розподілу температури при теплопередачі крізь однорідну плоску стінку (Область, що відповідає стінці, заштрихована).</p> <p>У цьому випадку основне рівняння теплопередачі має вид</p> $q = K \cdot \Delta t = \frac{t'_f - t''_f}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda_{\text{сер}}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (1)$ <p>(де <math>\lambda_{\text{сер}}</math> - середнє по температурі шару значення <math>\lambda</math>) тобто коефіцієнт теплопередачі одношарової плоскої стінки дорівнює:</p>	<p>Викладач нагадує новий матеріал.</p>

$$K = \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda_{\text{сер}}} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1} . \quad (2)$$

Якщо використати поняття - *термічний опір тепловіддачі*:

$$R_{\alpha} \equiv 1/\alpha , \quad (3)$$

та *термічний опір теплопровідності*

$$R_{\lambda} \equiv \delta/\lambda_{\text{сер}} , \quad (4)$$

то легко побачити, що термоопір теплопередачі  $R=1/K$  крізь одношарову плоску стінку дорівнює сумі термічних опорів всіх послідовних процесів передачі тепла від однієї рідини до іншої. Таким чином, згідно з формулою (2.):

$$R = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} = R_{\alpha 1} + R_{\lambda} + R_{\alpha 2} , \text{ м}^2 \text{ К/Вт.} \quad (5)$$

Для визначення температур (  $t_1$  та  $t_2$  ) на поверхнях стінки необхідно підставити знайдене значення питомого потоку  $q$  у вихідні закони передачі тепла (Ньютона-Ріхмана та Фур'є):

$$t_1 = t'_f - q/\alpha_1 \quad \text{або} \quad t_1 = t'_f - q R_{\alpha 1} ,$$

$$t_2 = t_1 - q \delta / \lambda = t'_f - q (1/\alpha_1 + \delta / \lambda) \quad \text{або} \quad t_2 = t_1 - q R_{\lambda} = t'_f - q (R_{\lambda} + R_{\alpha 1}) .$$

3.1.1. Теп-  
лопереда-  
ча крізь

Задача 1. Визначити необхідну товщину стінок печі з тим, щоб температура на зовнішній поверхні її не перевищувала 90°C. Температура середовища у печі 1000°C, коефіцієнт тепловіддачі від нього до стінки печі дорівнює 116 Вт/(м<sup>2</sup> К). Температура зовнішнього повітря

До дошки  
виклика-  
ється ку-

одношарову стінку	<p>20°C, коефіцієнт тепловіддачі від повітря до поверхні печі 18,6 Вт/(м<sup>2</sup> К). Коефіцієнт теплопровідності матеріалу печі залежить від температури згідно з співвідношенням <math>\lambda(t)=(0.835+0.00058*t)</math> Вт/(м К).</p> <p><math>t_f' = 1000^\circ\text{C}</math>; <math>t_f'' = 20^\circ\text{C}</math>; <math>t_2 = 90^\circ\text{C}</math>; <math>\alpha_1 = 116</math> Вт/(м<sup>2</sup> К); <math>\alpha_2 = 18,6</math> Вт/(м<sup>2</sup> К)  <math>\lambda(t)=(0.835+0.00058*t)</math> Вт/(м К)</p> <hr/> <p><math>\delta - ?</math></p> <p>1) Визначимо густину теплового потоку <math>q = \alpha_2 (t_2 - t_f'') = 18,6*(90-20) = 1302</math> Вт/м<sup>2</sup>.</p> <p>2) Визначимо температуру на внутрішній поверхні плити</p> $t_1 = t_f' - q/\alpha_1 = 1000 - 1302/116 = 989^\circ\text{C}.$ <p>3) Визначимо середнє по температурі стінки значення коефіцієнта теплопровідності. Через лінійний характер залежності <math>\lambda(t)</math></p> $\lambda_{\text{сер}} = \lambda((t_1+t_2)/2) = 0.835+0.00058*(898+90)/2 = 1,15$ Вт/(м К). <p>4) З рівняння теплопередачі визначимо необхідну товщину стінки</p> $q = \frac{t_f' - t_f''}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda_{\text{сер}}} + \frac{1}{\alpha_2}} \Rightarrow \delta = \lambda \cdot \left[ \frac{t_f' - t_f''}{q} - \frac{1}{\alpha_1} - \frac{1}{\alpha_2} \right] = 1.15 \cdot \left[ \frac{1000 - 20}{1302} - \frac{1}{116} - \frac{1}{18.6} \right] = 0.79$ м <p>Використовувати стіни такої товщини не доцільно, краще зробити багатошарову стінку з теплоізоляційним прошарком.</p>	рсант (студент)
-------------------	---	-----------------

<p>3.1.2. Теплопередача крізь трьохшарову стінку</p>	<p>Задача 2. Визначити необхідну товщину середнього теплоізоляційного шару трьохшарової стінки з тим, щоб температура на її зовнішній поверхні не перевищувала 90°C. Основні параметри процесу такі ж, як у попередній задачі. Додатково задається товщина зовнішніх (цегляних) шарів стінки – по 12,5 см. Коефіцієнти теплопровідності зовнішніх цегляних шарів прийmemo по 1,15 Вт/(м<sup>2</sup> К), коефіцієнти теплопровідності теплоізоляції (жаротривкого перлітобетону) візьmemo 0,12 Вт/(м<sup>2</sup> К).</p> <p><math>t_f' = 1000^\circ\text{C}</math>; <math>t_f'' = 20^\circ\text{C}</math>; <math>t_4 = 90^\circ\text{C}</math>; <math>\alpha_1 = 116 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})</math>; <math>\alpha_2 = 18,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})</math>  <math>\lambda_1 = \lambda_3 = 1,15 \text{ Вт}/(\text{м К})</math>; <math>\lambda_2 = 0,12 \text{ Вт}/(\text{м К})</math>; <math>\delta_1 = \delta_3 = 12,5 \text{ см}</math>.</p> <hr/> <p><math>\delta_2 - ?</math></p> <p>1) Як і в попередній задачі визначимо питомий тепловий потік у системі</p> $q = \alpha_2 (t_4 - t_f'') = 18,6 \cdot (90 - 20) = 1302 \text{ Вт}/\text{м}^2.$ <p>4) З рівняння теплопередачі визначимо необхідну товщину стінки</p> $q = \frac{t_f' - t_f''}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2}} \Rightarrow$ $\delta_2 = \lambda_2 \left[ \frac{t_f' - t_f''}{q} - \frac{1}{\alpha_1} - \frac{\delta_1}{\lambda_1} - \frac{\delta_3}{\lambda_3} - \frac{1}{\alpha_2} \right] = 0,12 \cdot \left[ \frac{1000 - 20}{1302} - \frac{1}{116} - \frac{0,125}{1,15} - \frac{0,125}{1,15} - \frac{1}{18,6} \right] = 0,056 \text{ м}$ <p>Таким чином використання багатошаровості приводить до зменшення товщини стінки на 0,79 - (0,125+0,125+0,056)=0,48 м.</p>	<p>До дошки викликається курсант (студент)</p>
<p>3.2. Розрахунок характеристик</p>	<p>Аналогічно до випадку площинної симетрії, у системах з циліндричною симетрією має сенс використовувати поняття <b>лінійного термічного опору теплопровідності циліндричного шару і лінійного термічного опору тепловіддачі на циліндричній поверхні</b>. Перший до-</p>	<p>Викладач нагадує новий</p>

процесу теплопередачі у циліндричній стінці

рівнює (див. рис.2)

$$R_{1,\lambda} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi \cdot \lambda_{\text{сер}}}, \text{ м}\cdot\text{К/Вт}. \quad (6)$$

де  $r_1$  і  $r_2$  та  $\lambda_{\text{сер}}$  - відповідно, зовнішній і внутрішній радіуси та середнє за температурою значення коефіцієнту теплопровідності матеріалу відповідного циліндричного шару.

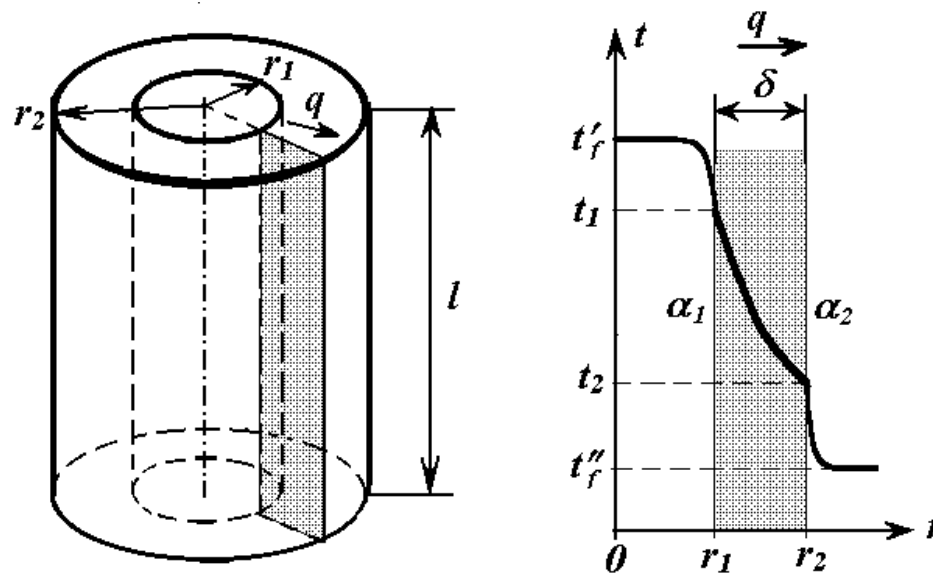


Рисунок 2 - Схема циліндричної стінки та графік залежності температури  $t$  від відстані  $r$  від осі в умовах теплопередачі крізь стінку

$l$  – довжина ділянки стінки;  $r_1$  та  $r_2$  – радіуси внутрішньої та зовнішньої поверхні стінки;  $\delta = r_2 - r_1$  - товщина стінки;  $t'_f$ ,  $t''_f$  і  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – температури теплоносіїв та коефіцієнти тепловіддачі з відповідних боків стінки;  $t_1$  та  $t_2$  – температури на внутрішній та зовнішній поверхнях стінки; стрілкою  $q$  показано напрямок теплового потоку.

Другий дорівнює

матеріал.

$$R_{1,\alpha} = \frac{1}{\pi \cdot d \cdot \alpha}, \text{ м}\cdot\text{К/Вт} . \quad (7)$$

де  $d$  та  $\alpha$  діаметр відповідної циліндричної поверхні та коефіцієнт тепловіддачі на ній.

Такий хід дозволяє надати рівнянню стаціонарної теплопровідності вигляду, який, як і співвідношення (1), нагадує закон Ома:

$$q_1 = \frac{\Delta t}{R_1}, \text{ Вт/м} . \quad (8)$$

де

$$R_1 = \frac{1}{\pi \cdot d_1 \cdot \alpha_1} + \frac{1}{2\pi\lambda} \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) + \frac{1}{\pi \cdot d_2 \cdot \alpha_2} = R_{1,\alpha_1} + R_{1,\lambda} + R_{1,\alpha_2} . \quad (9)$$

Знаючи лінійну густину теплового потоку  $q_1$  не складно визначити температури на поверхнях труби

$$t_1 = t'_f - q_1 \cdot R_{1,\alpha_1}, \text{ або } t_1 = t'_f - \frac{q_1}{\pi \cdot d_1 \cdot \alpha_1},$$

$$t_2 = t_1 - q_1 \cdot R_{1,\lambda} = t'_f - q_1 \cdot (R_{1,\alpha_1} + R_{1,\lambda}),$$

або

$$t_2 = t''_f + q_1 \cdot R_{1,\alpha_2}, \text{ або } t_2 = t''_f + \frac{q_1}{\pi \cdot d_2 \cdot \alpha_2} .$$

Якщо стінка складається з  $n$  циліндричних шарів (дивись рисунок 3), то лінійна густина потоку теплопередачі крізь неї розраховується за загальною формулою (8). При цьому, у порівнянні з одношаровою стінкою, змінюється тільки загальний лінійний термічний опір теплопровідності стінки  $R_{l,\lambda,\Sigma}$ . Аналогічно площинній ситуації такий опір дорівнює сумі лінійних термоопорів усіх шарів, що складають стінку. З урахуванням викладених обставин повний лі-

нійний термоопір теплопередачі крізь таку стінку складає:

$$R_1 = R_{1,\alpha_1} + R_{1,\lambda,\Sigma} + R_{1,\alpha_2} = \frac{1}{\pi d_1 \alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\pi \lambda_i} \ln \left( \frac{d_{i+1}}{d_i} \right) + \frac{1}{\pi d_2 \alpha_2} . \quad (10)$$

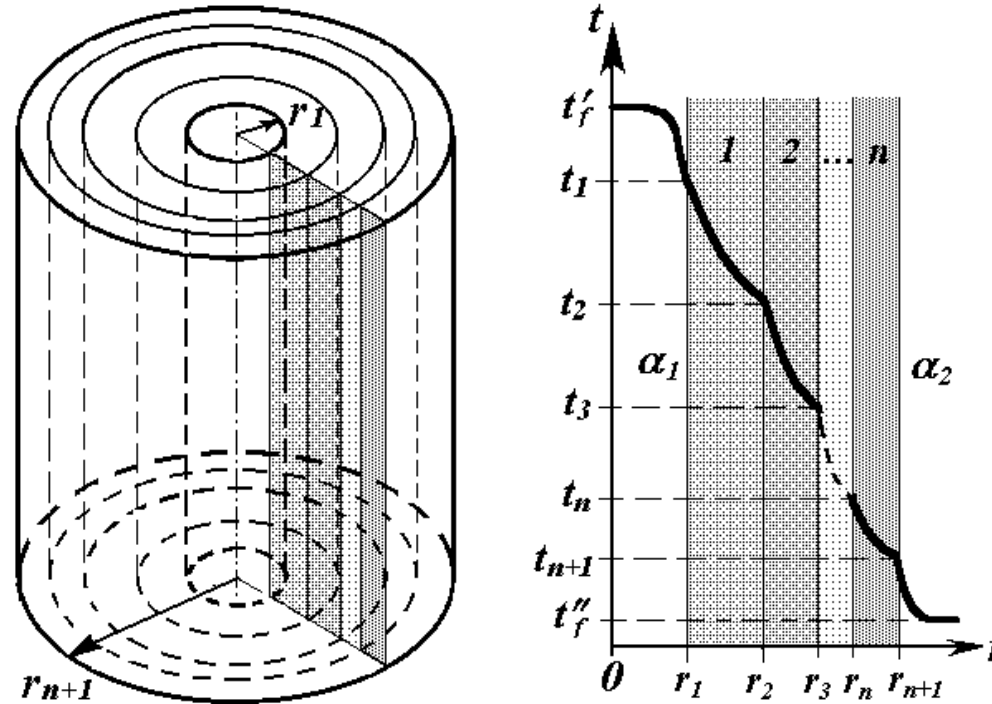


Рисунок 3 - Схема теплопередачі крізь багатошарову циліндричну стінку та графік залежності температури  $t$  від відстані  $r$  від осі циліндра

$t'_f, t''_f$  і  $\alpha_1, \alpha_2$  – температури теплоносіїв та коефіцієнти тепловіддачі з відповідних боків стінки; 1, 2, 3, ..., n – номери шарів;  $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n, r_{n+1}$  – радіуси границь шарів;  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n, t_{n+1}$  – температури на відповідних границях шарів ( $t_i, t_{i+1}$  – температура на поверхнях  $i$ -го шару;  $i = 1, 2, \dots, n$ )

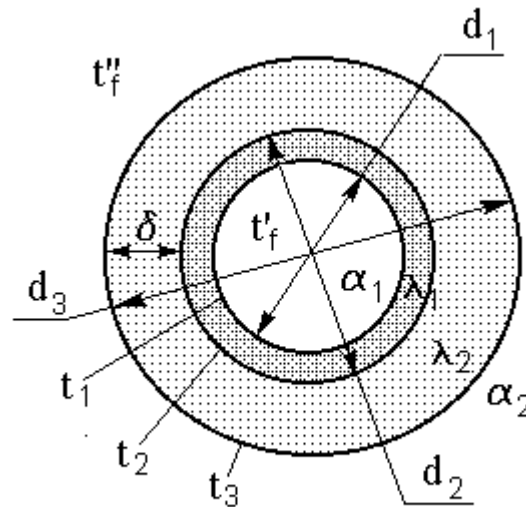
Температури в системі знаходять аналогічно площинному випадку. Відповідні параметри можна розрахувати, замінивши звичайні величини на лінійні. Так, температура на зовнішній

	<p>поверхні <math>k</math>-го шару стінки (<math>k = 1, 2, \dots, n</math>) дорівнює:</p> $t_{k+1} = t_k - q_1 \cdot R_{1,\lambda,k} = t'_f - q_1 \cdot \left( R_{1,\alpha 1} + \sum_{i=1}^k R_{1,\lambda,i} \right). \quad (11)$ <p>Температури на границях стінки з теплоносіями можна розраховувати за формулами: (при <math>k = 0</math>)</p> $t_1 = t'_f - q_1 \cdot R_{1,\alpha 1} = t'_f - \frac{q_1}{\pi \cdot d_1 \cdot \alpha_1};$ <p>(при <math>k = n</math>)</p> $t_{n+1} = t''_f + q_1 \cdot R_{1,\alpha 2} = t''_f + \frac{q_1}{\pi \cdot d_{n+1} \cdot \alpha_2}.$ <p>Тут</p> $R_{l,i} = \frac{l}{2\pi \cdot \lambda_{сеп,i}} \ln \left( \frac{r_{i+1}}{r_i} \right) \quad (12)$ <p>- <b>лінійний термічний опір <math>i</math>-го циліндричного шару</b>, в якому <math>\lambda_{сеп,i}</math> - середній коефіцієнт теплопровідності матеріалу цього шару в інтервалі температур від <math>t_i</math> до <math>t_{i+1}</math>.</p>	
Задача 3.	<p>Задача 3. По сталевому трубопроводу тече перегріта водяна пара при температурі <math>320^\circ\text{C}</math>. На трубопровід накладено теплоізоляцію (скляна вата) товщиною 80 мм. Визначити лінійний питомий тепловий потік і температуру на внутрішній та зовнішній поверхнях сталевого трубопроводу, а також температуру на зовнішній поверхні ізоляції. Зробити практичний висновок. Прийняти, що внутрішній діаметр трубопроводу складає 280 мм, зовнішній – 300 мм. Коефіцієнт теплообміну між парою і поверхнею трубопроводу дорівнює <math>500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})</math>, між поверхнею ізоляції і повітрям - <math>12 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})</math> Температура повітря <math>20^\circ\text{C}</math>, коефіцієнт теплопровідності сталі <math>\lambda_1 = 40 \text{ Вт}/(\text{м К})</math>, ізоляції - <math>\lambda_2 = 0,12 \text{ Вт}/(\text{м К})</math>.</p>	До дошки викликається курсант (студент)



$t_f' = 320^\circ\text{C}$ ;  $t_f'' = 20^\circ\text{C}$ ;  $\alpha_1 = 500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ ;  $\alpha_2 = 12 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$   
 $\lambda_1 = 40 \text{ Вт}/(\text{м К})$ ;  $\lambda_2 = 0,12 \text{ Вт}/(\text{м К})$ ;  $\delta = 80 \text{ мм}$ .  $d_1 = 280 \text{ мм}$ ,  $d_2 = 300 \text{ мм}$

$q_1 - ?$   $t_1, t_2, t_3 - ?$



1) Спочатку визначимо зовнішній діаметр ізоляції  $d_3 = d_2 + 2 \delta = 0,3 + 2 \cdot 0,08 = 0,46 \text{ м}$ .

2) Згідно з основним рівнянням теплопередачі лінійна густина теплового потоку дорівнює

$$q_1 = \frac{t_f' - t_f''}{\frac{1}{\pi \cdot d_1 \cdot \alpha_1} + \frac{1}{2\pi\lambda_1} \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) + \frac{1}{2\pi\lambda_2} \cdot \ln\left(\frac{d_3}{d_2}\right) + \frac{1}{\pi \cdot d_3 \cdot \alpha_2}} =$$

$$= \frac{320 - 20}{\frac{1}{3,14 \cdot 0,28 \cdot 500} + \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 40} \cdot \ln\left(\frac{30}{28}\right) + \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,12} \cdot \ln\left(\frac{46}{30}\right) + \frac{1}{3,14 \cdot 0,46 \cdot 12}} = 478 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$$

До дошки

	<p>3) Визначимо температуру на внутрішній поверхні труби</p> $t_1 = t'_f - \frac{q_1}{\pi \cdot d_1 \cdot \alpha_1} = 320 - \frac{478}{3.14 \cdot 0.28 \cdot 500} = 318.9^\circ \text{C}$ <p>4) Визначимо температуру на зовнішній поверхні труби</p> $t_2 = t_1 - \frac{q_1}{2\pi\lambda_1} \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) = 318.9 - \frac{478}{2 \cdot 3.14 \cdot 40} \ln\left(\frac{30}{28}\right) = 318.8^\circ \text{C}$ <p>Висновок: Температура на внутрішній та зовнішній поверхнях металу практично співпадають. =&gt; За наявності інших термічних опорів опором металу у співвідношеннях (10), (11) можна нехтувати.</p> <p>5) Визначимо температуру на зовнішній поверхні теплоізоляції</p> $t_3 = t''_f + \frac{q_1}{\pi \cdot d_3 \cdot \alpha_2} = 20 + \frac{478}{3.14 \cdot 0.46 \cdot 12} = 47.6^\circ \text{C}.$ <p>Висновок: Шар теплоізолятора має достатню товщину.</p>	<p>викликається курсант (студент)</p> <p>Курсанти (студенти) роблять висновок про можливість нехтувати термічним опором металевих шарів.</p>
<p>4. Підведення підсумків ПЗ та завдання на СП</p>	<p>Оцінюється робота, оцінки повідомляються та виставляються до журналу групи.</p> <p>Завдання на СП: 1) Повторити тему по посібнику Рябова І.Б., Сайчук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі. -Харків: АПБУ, 2002. (Глава 12).</p> <p>2) Підготуватися до лабораторної роботи №5 у лабораторному практикумі з ТіТ "Стационарна теплопередача крізь бетонну плиту".</p> <p>3) Зробити задачу 2 у розрахунковій роботі №2.</p>	

Тема: Променистий теплообмін.

Тема заняття: "**Розрахунок променистого потоку тепла.**"

Мета заняття: 1. Повторити та закріпити матеріал лекції про променистий теплообмін.  
2. Навчити застосуванню законів променистого теплообміну при рішенні задач ПБ.

Час: 2 години (2\*40 хв.).

Місце проведення заняття: лабораторія термодинаміки та теплопередачі.

Матеріальне забезпечення: 1) плакати по темі "Променистий теплообмін";  
2) довідникові таблиці властивостей речовин і матеріалів.

Література: 1. Рябова І.Б., Сайчук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі. -Харків: АПБУ, 2002.

2. Башкирцев М.П. Задачник по теплопередаче в пожарном деле. -М.: ВИПТШ МВД СССР.

3. Краснощекоев Е.А., Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче. –М.: Энергия.

4. Термодинаміка та теплопередача. Методичні вказівки до вивчення курсу та контрольне завдання.- Харків: УЦЗУ, 2007.

#### План заняття.

- |  |        |
|--|--------|
| 1. Організаційна частина.  | 5 хв.  |
| 2. Закріплення або викладення нового матеріалу та рішення задач по темі "Теплообмін випромінюванням" |        |
| 2.1. Теплообмін випромінюванням між двома плоско-паралельними площинами                              | 15 хв. |
| 2.2 Розрахунок відбивального екрану  |        |
| 2.2.1 викладення нового матеріалу  | 15 хв. |
| 2.2.2 рішення задачі   | 10 хв. |
| 2.3. Розрахунок системи відбивальних екранів   |        |
| 2.3.1 викладення нового матеріалу  | 20 хв. |
| 2.3.2 рішення задачі   | 10 хв. |
| 3. Підведення підсумків ПЗ та завдання на самопідготовку.  | 5 хв.  |

Назва питання	Стислий зміст питання, що розглядається.	Метод. вказівки
1. Організаційна	Прийняти рапорт у чергового, перевірити зовнішній вигляд та наявність курсантів (слухачів) на заняттях.	

частина.	Перевірити забезпеченість заняття відповідною літературою. Назвати тему ПЗ, його мету. Об'явити порядок проведення заняття.	
2	Закріплення або викладення нового матеріалу та рішення задач по темі "Теплообмін випромінюванням"	
2.1. Теплообмін випромінюванням між двома плоскопаралельними площинами	<p>Задача 1. Металеву піч встановлено поблизу дерев'яної стіни, так що поверхні печі та стіни можна розглядати у якості двох нескінчених паралельних площин. Температура на зовнішній сталевій поверхні печі становить <math>600^{\circ}\text{C}</math>, температура самозаймання деревини дорівнює <math>250^{\circ}\text{C}</math>. Визначити величину результуючого питомого променистого теплового потоку. Зробити висновок про можливість самозаймання деревини.</p> <p><math>t_1 = 600^{\circ}\text{C}</math>; <math>t_2 = 250^{\circ}\text{C}</math>,  <math>q</math> - ?</p> <p>1) Із довідника візьмемо ступені чорноти сталі <math>\varepsilon_1 = 0,6</math> і деревини <math>\varepsilon_2 = 0,9</math>, а також значення критичної густини теплового потоку для деревини <math>q_{\text{кр}} = 12800 \text{ Вт/м}^2</math>.</p> <p>2) Розрахуємо зведений ступінь чорноти системи двох поверхонь.</p> $\varepsilon_{\text{зв}} = \varepsilon_{1-2} = \left[ \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right]^{-1} = \left[ \frac{1}{0,6} + \frac{1}{0,9} - 1 \right]^{-1} = 0,563.$ <p>3) Розрахуємо питомий променистий потік</p> $q = \varepsilon_{\text{зв}} C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = 0,563 \cdot 5,67 \cdot \left[ \left( \frac{873}{100} \right)^4 - \left( \frac{523}{100} \right)^4 \right] = 16200 \text{ Вт/м}^2.$ <p>4) Порівнюємо отримане значення питомого потоку з критичним</p> <p><math>q = 16200 \text{ Вт/м}^2 &gt; 12800 \text{ Вт/м}^2 \Rightarrow</math> ситуація пожежонебезпечна.</p>	<p>До дошки ви-кликається курсант (слухач)</p> <p>Курсанти (слухачі) роблять висновок про небезпеку процесу.</p>
	Теплові екрани – пристрої, які розміщують між джерелом випромінювання і об'єктом, що	Курсан-

2.2 Розрахунок відбивального екрану  
2.2.1. викладення нового матеріалу

опромінюється, для захисту останнього від впливу теплового потоку.  
Екрани бувають поглинаючі та відбиваючі.  
Реалізація відбиваючого екрану – не прозора ( $D=0$ ) тонка (з малим термічним опором) стінка.

ти (слухачі) конспектують матеріал

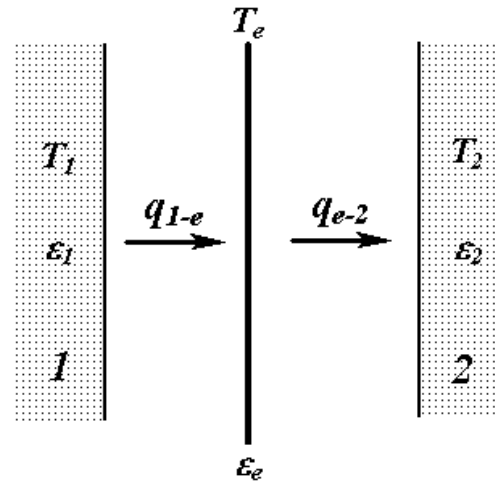


Рисунок 1- Схема системи з одиночним екраном

При розрахунку результуючого стаціонарного потоку тепла в такій системі треба скористатися непрозорістю екрану. Вона дозволяє незалежно розглянути променисті потоки між поверхнею 1 і екраном та між екраном і поверхнею 2.

Таким чином, питомий результуючий потік від поверхні 1 до екрану дорівнює:

$$q_{1-e} = \varepsilon_{1-e} \cdot C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_e}{100} \right)^4 \right], \text{ Вт/м}^2, \quad (1)$$

де величина  $\varepsilon_{1-e}$  - зведений ступінь чорноти системи цих поверхонь. Він дорівнює

$$\varepsilon_{1-e} = \left[ \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_e} - 1 \right]^{-1}.$$

Аналогічно питомий результуючий потік від екрану до поверхні 2 розраховується за формулою:

$$q_{e-2} = \varepsilon_{e-2} \cdot C_0 \left[ \left( \frac{T_e}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \text{ Вт/м}^2, \quad (2)$$

де

$$\varepsilon_{e-2} = \left[ \frac{1}{\varepsilon_e} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right]^{-1}.$$

При стаціонарному тепловому режимі існує збереження потоку. Це означає, що в разі наявності екрану результуючий питомий потік  $q_{1-e-2}$  між поверхнями 1 та 2 задовольняє співвідношенням:

$$q_{1-e-2} = q_{1-e} = q_{e-2}.$$

Об'єднавши останню рівність із формулами (1), (2), неважко знайти температуру екрану:

$$T_e = \sqrt[4]{\frac{\varepsilon_{1-e} \cdot T_1^4 + \varepsilon_{e-2} \cdot T_2^4}{\varepsilon_{1-e} + \varepsilon_{e-2}}},$$

а також формулу розрахунку питомого потоку між плоско-паралельними тілами при установці між ними екрану:

$$q_{1-e-2} = \varepsilon_{1-e-2} \cdot C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \text{ Вт/м}^2. \quad (3)$$

	<p>Тут величина</p> $\varepsilon_{1-e-2} = \frac{\varepsilon_{1-e} \cdot \varepsilon_{e-2}}{\varepsilon_{1-e} + \varepsilon_{e-2}} \quad (4)$ <p>є зведеним ступенем чорноти такої системи.</p> <p>Розглянемо дію одиночного екрану. З цією метою приймемо, що <math>\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_e = \varepsilon</math>. В такому разі</p> $\varepsilon_{1-e} = \varepsilon_{e-2} = \left[ \frac{2}{\varepsilon} - 1 \right]^{-1},$ <p>і формула (3) приймає вид:</p> $q_{1-e-2} = \frac{q_{1-2}}{2},$ <p>де <math>q_{1-2}</math> - питомий потік в системі без екрану. Таким чином, в цій ситуації екран зменшує потік у два рази.</p> <p>Інший варіант реалізується, коли поверхні екрану добре відбивають випромінювання, тобто коли <math>\varepsilon_1 \gg \varepsilon_e</math> і <math>\varepsilon_2 \gg \varepsilon_e</math>. В цьому разі <math>\varepsilon_{1-e} \approx \varepsilon_{e-2} \approx \varepsilon_e</math>, тобто <math>\varepsilon_{1-e-2} \approx \varepsilon_e/2</math>, що спрощує формулу питомого потоку (30) до виду:</p> $q_{1-e-2} = \frac{\varepsilon_e}{2} \cdot C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \text{ Вт/м}^2.$ <p>Порівняння останнього виразу з формулою ситуації без екрана вказує на значне послаблення питомого потоку в разі застосування екранів з малим <math>\varepsilon_e</math>:</p> $\frac{q_{1-2}}{q_{1-e-2}} = \frac{\varepsilon_{1-2}}{\varepsilon_{1-e-2}} = \frac{2 \cdot \varepsilon_{1-2}}{\varepsilon_e} \gg 1.$	
2.2.2 рі-	Задача 2. Знайти густини теплового потоку випромінювання між двома плоскими поверх-	До дош-

<p>шення задачі</p>	<p>нями, що відокремлені екраном із альфоля, якщо ступінь чорноти обох поверхонь екрану становить <math>\varepsilon_e = 0,07</math>. Вихідні поверхні взяти із попередньої задачі (тобто їх температури становлять <math>t_1 = 600^\circ\text{C}</math>; <math>t_2 = 250^\circ\text{C}</math>, а ступені чорноти - <math>\varepsilon_1 = 0,6</math>, <math>\varepsilon_2 = 0,9</math>)</p> <p><math>t_1 = 600^\circ\text{C}</math>; <math>t_2 = 250^\circ\text{C}</math>, <math>\varepsilon_e = 0,07</math>, <math>\varepsilon_1 = 0,6</math>, <math>\varepsilon_2 = 0,9</math>  <math>q_{1-e-2} - ?</math></p> <p>1) Визначимо ступінь чорноти систем поверхня-екран:</p> $\varepsilon_{1-e} = \left[ \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_e} - 1 \right]^{-1} = \left[ \frac{1}{0,6} + \frac{1}{0,07} - 1 \right]^{-1} = 0,0669$ $\varepsilon_{e-2} = \left[ \frac{1}{\varepsilon_e} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right]^{-1} = \left[ \frac{1}{0,07} + \frac{1}{0,9} - 1 \right]^{-1} = 0,0695$ <p>2) Визначимо ступінь чорноти системи поверхня-екран-поверхня:</p> $\varepsilon_{1-e-2} = \frac{\varepsilon_{1-e} \cdot \varepsilon_{e-2}}{\varepsilon_{1-e} + \varepsilon_{e-2}} = \frac{0,0669 \cdot 0,0695}{0,0669 + 0,0695} = 0,0341$ <p>3) Розрахуємо питомий променистий потік системи з екраном</p> $q_{1-e-2} = \varepsilon_{1-e-2} \cdot C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = 0,0341 \cdot 5,67 \cdot \left[ \left( \frac{873}{100} \right)^4 - \left( \frac{532}{100} \right)^4 \right] = 980 \text{ Вт/м}^2.$ <p>Неважко побачити, що введення екрану зменшило тепловий потік у</p> $\frac{q_{1-2}}{q_{1-e-2}} = \frac{\varepsilon_{1-2}}{\varepsilon_{1-e-2}} = \frac{0,563}{0,0341} = 16,5 \gg 1 \text{ раз.}$	<p>ки викликається курсант (слухач)</p> <p>У разі зупинки викликається наступний курсант (слухач)</p>
<p>2.3. Розрахунок системи</p>	<p>Розглянемо ситуацію, в якій дві паралельні нескінченні поверхні 1 та 2 (що мають температури <math>T_1</math> та <math>T_2</math> і ступені чорноти <math>\varepsilon_1</math> та <math>\varepsilon_2</math>) відокремлені одна від одної екраном, який складається</p>	<p>Курсанти (слухачі)</p>



відбивальних екранів  
2.3.1 викладення нового матеріалу

із  $n$  плоских тонких відбиваючих екранів. Позначимо  $T_{ei}$  та  $\varepsilon'_{ei}$ ,  $\varepsilon''_{ei}$  - температуру та ступені чорноти різних поверхонь  $i$ -го екрану (індекс  $i$  позначає екрани і приймає значення від 1 до  $n$ ) (дивись рисунок 2).

конспектують матеріал

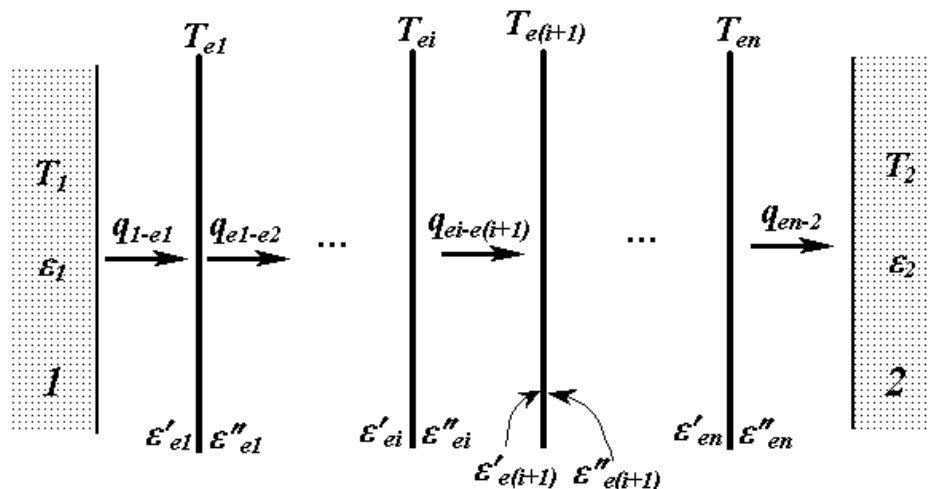


Рисунок 2 - Схема системи з  $n$ -шаровим екраном

При розрахунку результуючого питомого потоку  $q_{1-ne-2}$ , як і у випадку одношарового екрану, скористаємося тим, що екрани непрозорі. Це дозволяє незалежно розглядати випромінювання між кожною парою сусідніх поверхонь. Таким чином запишемо систему з  $n+1$ -го рівняння:

$$\begin{aligned}
 q_{1-e1} \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon'_{e1}} - 1 \right) &= C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{e1}}{100} \right)^4 \right], \\
 q_{e1-e2} \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon''_{e1}} + \frac{1}{\varepsilon'_{e2}} - 1 \right) &= C_0 \left[ \left( \frac{T_{e1}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{e2}}{100} \right)^4 \right], \\
 &\dots\dots\dots, \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$q_{ei-e(i+1)} \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon''_{ei}} + \frac{1}{\varepsilon'_{e(i+1)}} - 1 \right) = C_0 \left[ \left( \frac{T_{ei}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{e(i+1)}}{100} \right)^4 \right],$$

$$\dots, \\ q_{en-2} \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon''_{en}} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) = C_0 \left[ \left( \frac{T_{en}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right].$$

де  $q_{ei-e(i+1)}$  - питомий потік між  $i$ -им та  $(i+1)$ -им одиночним екраном.

Далі, виходячи зі стаціонарності ситуації, запишемо умову незмінності потоку:

$$q_{1-e1} = q_{e1-e2} = q_{e2-e3} = \dots = q_{e(n-1)-en} = q_{en-2}.$$

Останні співвідношення дозволяють, склавши окремо ліві та праві частини рівнянь системи (5), отримати шукану величину:

$$q_{1-ne-2} = \varepsilon_{1-ne-2} \cdot C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \text{ Вт/м}^2. \quad (6)$$

де  $\varepsilon_{1-ne-2}$  - зведений ступінь чорноти системи з  $n$ -шаровим екраном:

$$\varepsilon_{1-ne-2} = \left[ \frac{1}{\varepsilon_{1-2}} + \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{\varepsilon'_{ei}} + \frac{1}{\varepsilon''_{ei}} - 1 \right) \right]^{-1},$$

в якому  $\varepsilon_{1-2}$  - зведений ступінь чорноти системи без екранів.

Останні формули дозволяють розрахувати послаблюючу дію екранів. З'ясуємо її для ситуації, коли екрануючі поверхні мають однакові ступені чорноти, тобто коли для усіх  $n$  екраную-

	<p>чих пластин виконуються рівності <math>\varepsilon'_{ei} = \varepsilon''_{ei} = \varepsilon_e</math>. У цьому разі</p> $\frac{q_{1-2}}{q_{1-ne-2}} = \frac{\varepsilon_{1-2}}{\varepsilon_{1-ne-2}} = 1 + \varepsilon_{1-2} \cdot n \cdot \left( \frac{2}{\varepsilon_e} - 1 \right). \quad (7)$ <p>Формула (7) наочно демонструє, що послаблююча здатність складного екрану прямо пропорційна кількості шарів та обернено пропорційні ступеню чорноти екрануючої поверхні <math>\varepsilon_e</math>. Це означає, наприклад, що для захисту від променистого потоку бажано використовувати щити, що складаються з максимально можливої кількості полірованих з обох боків (тоді <math>\varepsilon_e \ll 1</math>) металевих листів.</p>	
<p>2.3.2 рішення задачі</p>	<p>Задача 3. Визначити кількість листів полірованого алюмінію, яка необхідна для створення екранних щитів, що застосовуються для захисту людей при тривалій роботі по гасінню пожежі газового фонтану. Температура факелу складає <math>1400^\circ\text{C}</math>: Ступінь чорноти полум'я – 0,3. Ступінь чорноти шкіри людини 0,95, а температура – <math>37^\circ\text{C}</math>. Ступінь чорноти полірованого алюмінію – 0,045.</p> <p><math>t_1 = 1400^\circ\text{C}</math>; <math>t_2 = 37^\circ\text{C}</math>, <math>\varepsilon_e = 0,045</math>, <math>\varepsilon_1 = 0,3</math>, <math>\varepsilon_2 = 0,95</math>  <math>n - ?</math></p> <p>1) Визначимо густину променистого потоку без екранів.  У цьому випадку зведений ступінь чорноти дорівнює</p> $\varepsilon_{зв} = \varepsilon_{1-2} = \left[ \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right]^{-1} = \left[ \frac{1}{0,3} + \frac{1}{0,95} - 1 \right]^{-1} = 0,295$ <p>Таким чином густина потоку тепла складає</p>	<p>До дошки викликається курсант (слухач)</p> <p>У разі зупинки викликається наступний ку-</p>

	$q_{1-2} = \varepsilon_{зв} C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = 0.295 \cdot 5.67 \cdot \left[ \left( \frac{1673}{100} \right)^4 - \left( \frac{310}{100} \right)^4 \right] = 131000 \text{ Вт/м}^2.$ <p>2) Якщо в системі з екранами потік приймає критичне значення <math>q_{1-e-2} = q_{кр}</math>, то співвідношення (7) набуває виду</p> $\frac{q_{1-2}}{q_{кр}} = 1 + \varepsilon_{1-2} \cdot n \cdot \left( \frac{2}{\varepsilon_e} - 1 \right);$ <p>звідки для пожежного у бойовому одязі (<math>q_{кр} = 4200 \text{ Вт/м}^2</math>)</p> $n = \frac{\frac{q_{1-2}}{q_{1-ne-2}} - 1}{\varepsilon_{1-2} \cdot \left( \frac{2}{\varepsilon_e} - 1 \right)} = \frac{\frac{131000}{4200} - 1}{0.295 \cdot \left( \frac{2}{0.045} - 1 \right)} \approx 2.4 \Rightarrow 3,$ <p>для тривалого опромінення незахищеної шкіри (<math>q_{кр} = 560 \text{ Вт/м}^2</math>)</p> $n = \frac{\frac{q_{1-2}}{q_{1-ne-2}} - 1}{\varepsilon_{1-2} \cdot \left( \frac{2}{\varepsilon_e} - 1 \right)} = \frac{\frac{131000}{560} - 1}{0.295 \cdot \left( \frac{2}{0.045} - 1 \right)} \approx 18.2 \Rightarrow 19.$	рсант (слухач)
3. Підведення підсумків ПЗ та завдання на СП	<p>Оцінюється робота, оцінки повідомляються та виставляються до журналу групи.</p> <p>Завдання на СП:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Повторити тему по конспекту</li> <li>2) Дорахувати та оформити задачі.</li> <li>3) Розрахувати другу задачу у другій розрахунковій роботі (умови у метод вказівках для заочників).</li> <li>4) Підготуватися до письмового контролю по даній темі.</li> </ol>	

Тема: Променистий теплообмін”

Тема заняття: "Розрахунок променистого теплообміну при горінні"

Мета заняття: 1. Повторити та закріпити матеріал лекції про променистий теплообмін.

2. Навчити курсантів розраховувати променисті потоки тепла, які супроводжують горіння, визначати протипожежні розриви та безпечні відстані.

Час: 2 години (2\*40 хв.).

Місце проведення заняття: лабораторія термодинаміки та теплопередачі.

Матеріальне забезпечення: 1) плакати по темі “Променистий теплообмін”;

2) довідникові таблиці фізичних властивостей речовин та матеріалів.

Література: 1. Рябова І.Б., Сайчук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі. -Харків: АПБУ, 2002.

2. Башкирцев М.П. Задачник по теплопередаче в пожарном деле. -М.: ВИПТШ МВД СССР.

3. Термодинаміка та теплопередача. Методичні вказівки до вивчення курсу та контрольне завдання.- Харків: УЦЗУ, 2007.

4. ПБН 360-92\*. Містобудування, планування та забудова міських та сільських поселень.

#### План заняття

- |   |        |
|---|--------|
| 1. Організаційна частина  | 5 хв.  |
| 2. Контрольне опитування по карткам (задача) по темі "Променистий теплообмін між паралельними площинами"  | 10 хв. |
| 3. Закріплення матеріалу та рішення задач по темі „Теплообмін випромінюванням, який супроводжує горіння”: |        |
| 3.1. Визначення ПБ за величиною теплового потоку  | 20 хв. |
| 3.2. Розрахунок протипожежних розривів між спорудами  | 35 хв. |
| 4. Завдання задачі другого розрахункового завдання  | 5 хв.  |
| 5. Підведення підсумків ПЗ та завдання на СП.   | 5 хв.  |

Назва питання	Стислий зміст питання, що розглядається	Метод. вказівки
1. Організаційна частина.	Прийняти доповідь в чергового. Перевірити зовнішній вигляд та наявність курсантів (слухачів). Оголосити порядок проведення заняття.2	
2. Контрольне опитування по карткам	Курсанти (слухачі) письмово вирішують задачі з індивідуальних карток по темі "Променистий теплообмін між паралельними площинами"	Надає уточнюючі пояснення
3.	Закріплення матеріалу та рішення задач по темі „Теплообмін випромінюванням, який супроводжує горіння”	
3.1. Визначення ПБ	Задача 1.Визначити величину результуючого теплового потоку між факелом нафтового фонта-	До дошки ви-

за величиною теп-  
лового потоку

ну та елементарною площиною, що знаходиться на рівні гирла свердловини на відстані 50 м від неї. Зведена до прямокутника поверхня факелу має розміри 5\*80 м. Температура факелу 1200°C, його ступінь чорноти 0.85. Температура елементарної площини (деревини) 250°C, його ступінь чорноти 0.9.

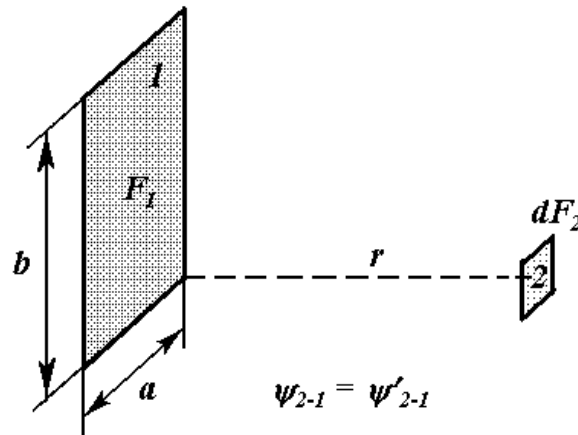
$t_1 = 1200^\circ\text{C}$ ;  $t_2 = 250^\circ\text{C}$ ,  $\varepsilon_1 = 0,85$ ,  $\varepsilon_2 = 0,9$ ,  
 $r = 50$  м,  $d \cdot h = 5 \cdot 80$  м

$q$  - ?

Питомий тепловий потік розраховується за формулою

$$q = \varepsilon_{зв} \cdot C_0 \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot \Psi_{21}$$

1. Розрахуємо зведену ступінь чорноти  $\varepsilon_{зв} = \varepsilon_1 \varepsilon_2 = 0,85 \cdot 0,9 = 0,765$ .
2. Розрахуємо коефіцієнт опромінюваності елементарної частини факелу



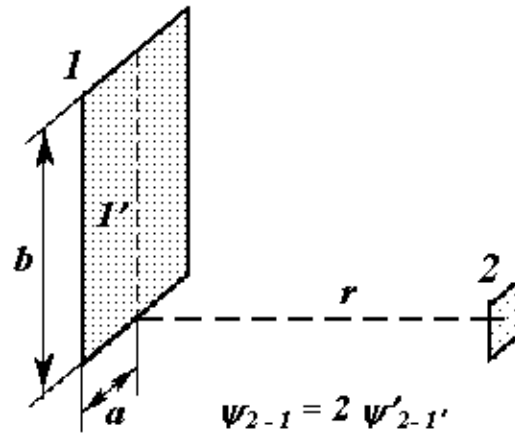
( $a = d / 2 = 5 / 2 = 2,5$  м,  $b = 80$  м).

$$\psi'_{21} = \frac{1}{360} \left[ \frac{a}{\sqrt{r^2 + a^2}} \arctg \frac{b}{\sqrt{r^2 + a^2}} + \frac{b}{\sqrt{b^2 + r^2}} \arctg \frac{a}{\sqrt{b^2 + r^2}} \right] =$$

кликається ку-  
рсант (слухач).

$$= \frac{1}{360} \left[ \frac{2.5}{\sqrt{2.5^2 + 50^2}} \operatorname{arctg} \frac{80}{\sqrt{2.5^2 + 50^2}} + \frac{80}{\sqrt{80^2 + 50^2}} \operatorname{arctg} \frac{2.5}{\sqrt{80^2 + 50^2}} \right] = 0,0116$$

3. Розрахуємо коефіцієнт опромінюваності всього факелу



$$\psi_{21} = 2 * \psi'_{21} = 2 * 0.0116 = 0.0232.$$

4. Розрахуємо питомий потік на дерев'яну площину

$$\begin{aligned} q &= \varepsilon_{зв} C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \psi_{21} = \\ &= 0.765 \cdot 5.67 \cdot \left[ \left( \frac{1200 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{250 + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot 0.0232 = 4660 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}. \end{aligned}$$

5. Розрахуємо питомий тепловий потік у випадку шкіри людини ( $t_2 = 37^0 \text{C}$ ,  $\varepsilon_2 = 0,95$ )

$$\varepsilon_{зв} = \varepsilon_1 \varepsilon_2 = 0,85 * 0,95 = 0,81.$$

До дошки ви-  
кликається но-  
вий курсант  
(слухач).

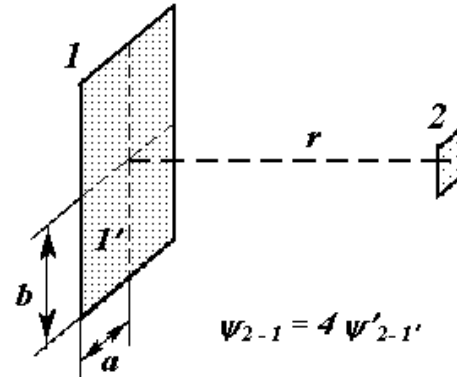
	$q = \varepsilon_{зв} C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \Psi_{21} =$ $= 0.81 \cdot 5.67 \cdot \left[ \left( \frac{1200 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{37 + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot 0.0232 = 5000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$ <p>Згідно з довідником керівника гасіння пожежі критичні значення величини теплового потоку випромінювання складають  4,2 кВт/м<sup>2</sup> - у бойовому одязі без обмеження часу (без одягу непереносний біль через 20 с);  7,0 кВт/м<sup>2</sup> - у бойовому одязі на протязі 5 хв. (без – непереносний біль миттєво) =&gt; потрібен додатковий захист від теплового випромінювання.</p>	Курсанти (слухачі) роблять висновок про безпеку
3.2. Розрахунок протипожежних розривів між спорудами	<p>Задача 2. Визначити величину протипожежного розриву між двома дерев'яними будівлями, якщо можливі розміри полум'я <math>d \cdot h = 8 \text{ м} \cdot 12 \text{ м}</math>, температура його <math>t_1 = 1100^\circ\text{C}</math>, ступінь чорноти полум'я <math>\varepsilon_1 = 0,7</math>. Температура само спалахування деревини <math>t_2 = 405^\circ\text{C}</math> а ступінь чорноти <math>\varepsilon_2 = 0,85</math>. Приймаємо, що коефіцієнт безпеки дорівнює 1,5.</p> <p><math>t_1 = 1100^\circ\text{C}; t_2 = 405^\circ\text{C}, d \cdot h = 8 \text{ м} \cdot 12 \text{ м}, \beta = 1,5, \varepsilon_1 = 0,7, \varepsilon_2 = 0,85, q_{кр} = 12800 \text{ Вт/м}^2</math>  <math>r_{кр} - ?</math></p> <p>Для рішення задачі необхідно використатися умовою пожежної безпеки</p> $\beta \cdot q = \beta \cdot \varepsilon_{зв} \cdot C_0 \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot \Psi_{21} \leq q_{кр},$ <p>у якому <math>\varepsilon_{зв} = \varepsilon_1 \varepsilon_2</math> - зведена ступінь чорноти відкритої системи двох тіл.  Останньому співвідношенню можна надати вигляду</p> $\Psi_{21} \leq \Psi_{кр} \equiv q_{кр} / (\beta \cdot q_{\max})$ <p>де</p>	До дошки викликається курсант (слухач).



$$q_{\max} = \varepsilon_{\text{зв}} \cdot C_0 \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

або

$$\psi'_{21} \leq \psi'_{\text{кр}} \equiv q_{\text{кр}} / (4 \cdot \beta \cdot q_{\max}).$$



1. Розрахуємо критичне значення коефіцієнта опромінюваності елементарної площини

1.1. Спочатку розрахуємо  $q_{\max}$

$$\begin{aligned} q_{\max} &= \varepsilon_{\text{зв}} \cdot C_0 \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = \\ &= 0.7 * 0.85 * 5.67 * \left[ \left( \frac{1100 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{405 + 273}{100} \right)^4 \right] = 112800 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \end{aligned}$$

1.2. В результаті отримаємо  $\psi'_{\text{кр}}$

$$\psi'_{\text{кр}} \equiv \frac{q_{\text{кр}}}{4 \cdot \beta \cdot q_{\max}} = \frac{12800}{4 * 1.5 * 112800} = 0,0189 \approx 0,019.$$

2. Для знаходження безпечної відстані скористаємося номограмою.

2.1. Визначимо розміри елементарного прямокутника

$$a = \frac{d}{2} = \frac{8}{2} = 4 \text{ м}, \quad b = \frac{h}{2} = \frac{12}{2} = 6 \text{ м}$$

2.2. Проведемо пряму, що проходить крізь початок координат (0, 0) і точку

$$\frac{r}{a} = \frac{24}{4} = 6, \quad \frac{r}{b} = \frac{24}{6} = 4 \text{ тобто точку } (6, 4)$$

2.3. Знайдемо точку перетину цієї прямої і лінії  $\psi'_{кр} = 0.019$ . Координати шуканої точки

$$\frac{r_{кр}}{a} = 4.8, \quad \frac{r_{кр}}{b} = 3.2$$

2.4. Розрахуємо безпечну відстань

$$r_{кр} = \frac{r_{кр}}{a} * a = 4.8 * 4 = 19.2 \text{ м, або } r_{кр} = \frac{r_{кр}}{b} * b = 3.2 * 6 = 19.2 \text{ м}$$

Зробимо аналогічні розрахунки для випадку соснової деревини пофарбованої масляною фарбою, тобто при  $q_{кр} = 17450 \text{ Вт/м}^2$

У такому разі

$$\psi'_{кр} \equiv \frac{q_{кр}}{4 \cdot \beta \cdot q_{\max}} = \frac{17450}{4 * 1.5 * 112800} = 0,0258 \approx 0,026.$$

Шукана точка має координати

$$\frac{r_{кр}}{a} = 4.0, \quad \frac{r_{кр}}{b} = 2.7$$

Безпечна відстань дорівнює

$$r_{кр} = \frac{r_{кр}}{a} * a = 4.0 * 4 = 16.0 \text{ м, або } r_{кр} = \frac{r_{кр}}{b} * b = 2.7 * 6 = 16.2 \text{ м}$$

Звертається увага на те, що ця методика покладена в основу розробки нормативних документів для визначення протипожежних розривів:

- 1) СНиП-11-89-90. Генплани и промпредприятия.
- 2) ПБН 360-92\*. Містобудування, планування та забудова міських та сільських поселень.

При необхідності за допомогою побудованого нами графіка можна визначити безпечні ві-

До дошки ви-  
кликається ку-  
рсант (слухач).

Звертається  
увага на розхо-  
дження, пов'я-  
зане з точніс-  
тю.

	<p>дстані для роботи пожежних підрозділів. При цьому критичні значення потоку беруться з довідника „Справочник РТП”.</p>	
<p>Робиться при наявності часу.</p>	<p>Задача 3. Металеву піч встановлено на відстані 0,5 м від дерев'яної стіни. Бокова (сталеві) поверхня печі має розміри 0,8*0,6 м. Температура на зовнішній поверхні печі становить 600°C, температура самозаймання деревини дорівнює 250°C. Визначити величину питомого променистого теплового потоку на поверхні деревини. Зробити висновок про можливість самозаймання деревини. Знайти безпечну відстань печі від стіни.</p> <p><math>t_1 = 600^\circ\text{C}; t_2 = 250^\circ\text{C}, h*d = 0,8*0,6 \text{ м.}, r = 0,5 \text{ м.}, \varepsilon_1 = 0,6, \varepsilon_2 = 0,9, q_{кр} = 12800 \text{ Вт/м}^2</math></p> <p><math>q - ? r_{кр} - ?</math></p> <p>1. Спочатку розрахуємо <math>q_{\max}</math></p> $q_{\max} = \varepsilon_{зв} \cdot C_0 \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] =$ $= 0,6 * 0,9 * 5,67 * \left[ \left( \frac{600 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{250 + 273}{100} \right)^4 \right] = 15490 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ <p>2. Визначимо розміри елементарного прямокутника</p> $a = \frac{d}{2} = \frac{0,6}{2} = 0,3 \text{ м}, \quad b = \frac{h}{2} = \frac{0,8}{2} = 0,4 \text{ м}$ <p>3. Визначимо координати точки <math>r = 0,5 \text{ м}</math> на номограмі</p> $\frac{r}{a} = \frac{0,5}{0,3} = 1,67, \quad \frac{r}{b} = \frac{0,5}{0,4} = 1,25$ <p>4. На номограмі знайдемо точку (1,67, 1,25) і визначимо відповідну величину <math>\psi'</math></p> $\psi' = 0,095$ <p>5. Розрахуємо коефіцієнт опромінення</p>	<p>До дошки ви-кликається курсант (слухач).</p>

	$\psi_{2-1} = 4 \cdot \psi' = 4 \cdot 0.095 = 0.38$ <p>6. Розрахуємо питомий потік</p> $q = q_{\max} \cdot \psi_{21} = 15490 \cdot 0.38 = 5890 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$ <p>Для визначення безпечної відстані</p> <p>7. Розрахуємо <math>\psi'_{\text{кр}}</math> (за умови <math>\beta = 1</math>)</p> $\psi'_{\text{кр}} \equiv \frac{q_{\text{кр}}}{4 \cdot \beta \cdot q_{\max}} = \frac{12800}{4 \cdot 1 \cdot 15490} = 0,207 \approx 0,21$ <p>8. Проведемо пряму, що проходить крізь початок координат (0, 0) і точку</p> $\frac{r}{a} = \frac{1.2}{0.3} = 4, \quad \frac{r}{b} = \frac{1.2}{0.4} = 3 \quad \text{тобто точку (4, 3)}$ <p>9. Знайдемо точку перетину цієї прямої і лінії <math>\psi'_{\text{кр}} = 0.21</math>. Координати шуканої точки</p> $\frac{r_{\text{кр}}}{a} = 0.53, \quad \frac{r_{\text{кр}}}{b} = 0.40$ <p>10. Розрахуємо безпечну відстань</p> $r_{\text{кр}} = \frac{r_{\text{кр}}}{a} * a = 0.53 * 0.3 = 0.16 \text{ м}, \text{ або } r_{\text{кр}} = \frac{r_{\text{кр}}}{b} * b = 0.40 * 0.4 = 0.16 \text{ м}$	<p>До дошки ви- кликається ку- рсант (слухач).</p>
<p>4. Завдання задачі другого розрахункового завдання</p>	<p>Курсанти (слухачі) визначають свої варіанти (шифр - останні дві цифри номера залікової книжки).</p> <p>Завдання. Визначити мінімальну безпечну відстань, що забезпечує безпеку об'єкта, сусіднього з об'єктом, що горить, при наступних вихідних даних: проекція факелу полум'я, що горить має форму прямокутника з розмірами <math>d * l</math>, його температура <math>T_{\phi}</math>, ступінь чорноти <math>\varepsilon_{\phi}</math>; на поверхні об'єкта, що не горить значення температури <math>T_{\epsilon}</math>, значення густини теплового потоку</p>	

	<p>дорівнює критичному <math>q_{кр}</math>, ступінь чорноти <math>\varepsilon</math>.</p> <p>З'ясуйте безпечну відстань від факела для особового складу. Що працює на пожежі без засобів захисту від теплового впливу за умови: а) короткочасного перебування <math>q_{кр}=1120</math> Вт/м<sup>2</sup>; б) тривалої роботи <math>q_{кр}=560</math> Вт/м<sup>2</sup>. При рішенні враховувати тільки теплообмін випромінюванням. Коефіцієнт безпеки прийняти рівним <math>\beta</math>.</p> <p>При розрахунках коефіцієнту опромінюваності можна користуватися, як розрахунковою формулою так і номограмою.</p> <p>Крім того, якщо <math>r \gg a</math> та <math>r \gg b</math>, то <math>x \ll 1</math> і тому <math>arctgx = x</math>,</p> $\psi' = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{b}{r} \cdot \frac{a}{r} + \frac{a}{r} \cdot \frac{b}{r} \right] = \frac{2ab}{2\pi r^2} = \frac{ab}{\pi r^2}$	
<p>4. Підведення підсумків ПЗ та завдання на СП.</p>	<p>Оцінюється робота курсантів (слухачів), оцінки оголошуються та виставляються до журналу групи. Нагадується порядок здачі заборгованостей.</p> <p>Оцінюється робота, оцінки повідомляються та виставляються до журналу.</p> <p>Завдання на СП:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Розрахувати та оформити задачу розрахункового завдання</li> <li>2. Підготуватися до лабораторної роботи та письмового контролю по темі „Променистий теплообмін”.</li> <li>3. Повторити тему по конспекту та посібнику І.Б.Рябова, І.В.Сайчук, А.Я.Шаршанов. Термодинаміка та теплопередача у пожежній справі. – Харків: АПБУ, 20002. – 352 с.</li> </ol>	

Тема: Нестационарна теплопровідність.

Тема заняття (1) : **Розрахунок температур у тілах обмежених розмірів.**

- Цілі заняття: 1. Навчити курсантів (студентів) застосуванню законів нестационар. теплопров. щодо тіл обмеж. розмірів.  
2. Показати значення цього питання для вирішенні задач ПБ.  
3. Закріпити матеріал відповідної лекції по нестационарній теплопровідності.

Час: 2 години.

Місце проведення заняття: лабораторія термодинаміки та теплопередачі.

Мат. забезпечення: 1) плакати по темі "Нестационарна теплопровідність";

2) номограми для визначення відносних температур у задачах 3-го роду – 10 штук.

Література: 1. Рябова І.Б., Сайчук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі.  
-Харків: АПБУ, 2002.

2. Башкирцев М.П. Задачник по теплопередаче в пожарном деле.

#### План заняття

- |  |        |
|--|--------|
| 5. Організаційна частина   | 5 хв.  |
| 6. Закріплення матеріалу по темі "Нестационарна теплопровідність в тілах обмежених розмірів" | 10 хв. |
| 7. Рішення задач по темі "Нестационарна теплопровідність в тілах обмежених розмірів":        |        |
| 3.1. Нестационарна теплопровідність необмеженої пластини                                     | 25 хв. |
| 3.2. Нестационарна теплопровідність необмеженого циліндра                                    | 35 хв. |
| 4. Підведення підсумків ПЗ та завдання на СП.  | 5 хв.  |

Назва питання	Стислий зміст питання, що розглядається	Метод. вказівки
1. Організаційна частина.	Прийняти доповідь в чергового. Перевірити зовнішній вигляд та наявність курсантів (студентів). Оголосити порядок проведення заняття.2	
2. Закріплення матеріалу по темі "Нестационарна теплопровідність в тілах обмежених розмірів"	З'ясовуються питання по темі "Нестационарна теплопровідність" <b>Питання:</b> "Що таке нестационарна теплопровідність?" Теплопровідність в умовах, коли температура змінюється у часі. <b>Питання:</b> "Яким рівнянням описується температура при нестационарній теплопровідності?"	Для відповіді на кожне запитання викликається новий курсант (студент)

У одновимірному випадку це рівняння має вид  $\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$ , де  $t(x, \tau)$  – температура у точці  $x$  координатою "x" в момент часу  $\tau$ ,  $a$  – коефіцієнт теплопровідності.

**Питання:** "За якою формулою розраховується коефіцієнт теплопровідності?"

$$a \equiv \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho}, \text{ м}^2/\text{с},$$

де  $\rho$  - густина,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ,  $c_p$  - питома масова ізобарна теплоємність,  $\text{Дж}/(\text{кг К})$ ,  $\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності матеріалу нерухомого середовища, що розглядається,  $\text{Вт}/(\text{м К})$ .

Якщо у формулах, що наводяться, час вимірюється в годинах, то коефіцієнт теплопровідності необхідно вимірювати у  $\text{м}^2/\text{год}$ . Якщо теплоємність  $c_p$  виражена у  $\text{кДж}/(\text{кг К})$ , густина  $\rho$  - у  $\text{кг}/\text{м}^3$ , а коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$  - у  $\text{Вт}/(\text{м К})$ , то розрахункова формула для коефіцієнта теплопровідності має вид:

$$a = \frac{3.6 \cdot \lambda}{c_p \cdot \rho}, \text{ м}^2/\text{год},$$

**Питання:** "Які бувають задачі нестационарної теплопровідності за граничними умовами?"

1) Ситуація, коли на межі тіла задана його температура, називається *граничною задачею 1-го роду*. Її можна інтерпретувати як збіг температури тіла на його границі з заданою температурою  $t_w$  (якою, зокрема, може бути температура навколишнього середовища  $t_f$ ):

$$t|_{\text{гр}} = t_w.$$

(Тут і далі значок  $|_{\text{гр}}$  вказує, що значення величини береться на границі тіла.)

2) Варіант, у якому задано потік тепла на границі, називається *граничною задачею 2-го роду*.

Відповідна умова виражається співвідношенням:

$$-\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial n}|_{\text{гр}} = q_w.$$

Тут  $q_w$  – задана функція, яку можна інтерпретувати як нормальну до граничної поверхні компоненту питомого теплового потоку, а  $\frac{\partial t}{\partial n}|_{\text{гр}}$  - складова градієнта температури по нормалі до поверхні тіла (нагадуємо, що у тілі, згідно із рівнянням Фур'є, питомий тепловий потік дорівнює  $\mathbf{q} = -\lambda \text{ grad } t$ ).

3) Ситуація, коли неперервний потік тепла на границі тіла задається законом Ньютона-Ріхмана із відомим коефіцієнтом тепловіддачі ( $\alpha$ ) та заданою температурою середовища  $t_f$ , що омиває

тіло, – це *гранична задача 3-го роду*. У цьому випадку температура тіла поблизу його границі задовольняє умові:

$$-\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_{\text{гр}} = \alpha \cdot (t|_{\text{гр}} - t_f)$$

Неважко помітити, що при  $\alpha L \rightarrow \infty$  задача 3-го роду переходить у 1-ий, в якому температура на границі  $t_w$  співпадає із температурою зовнішнього середовища  $t_f$ .

Далі ми будемо розглядати задачу 3-го роду.

**Питання:** "Які критерії подібності визначають характер протікання процесів нестационарної теплопровідності?"

Перший параметр:

$$Fo \equiv \frac{a \cdot \tau}{L^2} \quad \left( Fo \equiv \frac{\tau}{\tau_{\text{хар}}} \right)$$

(де  $L$  -деякий його характерний розмір тіла) називається *критерієм Фур'є*. Ця змінна має значення обезрозміреного часу. Згідно з останньою формулою, це час, віднормований на характерний час розповсюдження зміни температури крізь тіло  $\tau_{\text{хар}} \equiv L^2/a$ .

Другий безрозмірний параметр називається *критерієм Біо*. Ця величина задається формулою:

$$Bi \equiv \frac{\alpha \cdot L}{\lambda}$$

і співпадає з відношенням характерного термоопору теплопровідності тіла ( $L/\lambda$ ) до термоопору тепловіддачі на межі тіла з середовищем ( $1/\alpha$ ).

**Питання:** "Як вирішуються задачі при довільних значеннях критеріїв Фур'є та Біо?"

Аналітично, або при допомозі номограм, визначаючи відносну надлишкову температуру

$$\theta \equiv \frac{t_f - t}{t_f - t_0} \quad (\text{де } t_0 - \text{початкова температура тіла}), \text{ як функцію } Fo \text{ та } Bi.$$

**Питання:** "Як веде себе температура при малих числах Біо?"

Вона змінюється за законом

$$t = t_f - (t_f - t_0) \exp(-m \tau) \quad (\text{або } \theta = - \exp(-m \tau))$$

в якому використана величина, яка називається *темпом нагріву (охолодження)*:



	$m \equiv \frac{\alpha}{\rho \cdot c_p} \frac{F}{V}, \text{ c}^{-1},$ <p>де <math>F</math> - площа поверхні теплообміну, <math>V</math> - об'єм тіла.</p>	
3.	Рішення задач по темі "Нестационарна теплопровідність в тілах обмежених розмірів":	
3.1. Нестационарна теплопровідність необмеженої пластини (довільні числа Біо)	<p>Задача 1. Перегородку товщиною 0,1 м виготовлено з перлітобетону. Одна поверхня перегородки добре теплоізольована. Початкова температура перегородки 20°C. В умовах пожежі температура навколишнього середовища з боку нетеплоізольованої поверхні швидко зросла до 800°C і у подальшому залишається сталою. Визначити температуру обох поверхонь перегородки через 1 годину теплового впливу. З'ясувати межу вогнестійкості перегородки, якщо критична температура з теплоізольованого боку перегородки становить 150°C.</p> <p><math>\delta = 0,1 \text{ м}; t_f = 800^\circ\text{C}; t_0 = 20^\circ\text{C}; t_{кр} = 150^\circ\text{C}; \tau = 1 \text{ год};</math>  <math>t_n - ? \quad t_c - ? \quad \tau_{кр} - ?</math></p> <p>1) Визначимо середню температуру перегородки за весь час прогрівання</p> $t_{\text{сеп}} = \frac{t_f + t_0}{2} = \frac{800 + 20}{2} = 410^\circ\text{C}$ <p>характерний розмір при односторонньому прогріві <math>L = \delta = 0.1 \text{ м}</math></p> <p>2) Розрахуємо середні характеристики перегородки (використавши довідник)</p> <p>коефіцієнт теплопровідності перлітобетону  <math>\lambda = 0,29 + 1,16 \cdot 10^{-4} \cdot t = 0,29 + 1,16 \cdot 10^{-4} \cdot 410 = 0,338 \text{ Вт/(м К)}</math></p> <p>питома теплоємність  <math>c_p = 0,84 + 5,8 \cdot 10^{-4} \cdot t = 0,84 + 5,8 \cdot 10^{-4} \cdot 410 = 1,08 \text{ кДж/(кг К)}</math></p> <p>густина  <math>\rho = 1090 \text{ кг/м}^3;</math></p> <p>коефіцієнт температуропровідності</p> $a = \frac{3.6 \cdot \lambda}{c_p \cdot \rho} = \frac{3.6 \cdot 0.338}{1.08 \cdot 1090} = 1.03 \cdot 10^{-3}, \text{ м}^2/\text{год},$ <p>3) Розрахуємо коефіцієнт теплообміну  <math>\alpha = 11,63 \cdot \exp(0,0023 \cdot t_f) = 11,63 \cdot \exp(0,0023 \cdot 800) = 73.2 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}</math></p> <p>4) Визначаємо критерій Біо</p>	<p>Відмітити зв'язок з пож. проф. у будівництві.</p> <p>До дошки ви-кликається курсант (слухач).</p>

	$Bi \equiv \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} = \frac{73.2 \cdot 0.1}{0.338} = 21.7$ <p>5) Визначимо критерій Фур'є</p> $Fo \equiv \frac{a \cdot \tau}{L^2} = \frac{1.03 \cdot 10^{-3} \cdot 1}{0.1^2} = 0.103$ <p>6) По номограмі (Рис.6.6) визначимо спочатку відносну надлишкову температуру на нетеплоізованій поверхні при <b>Bi=21,7</b> і <b>Fo=0.103</b>, а далі розрахуємо цю температуру</p> $\theta_n \equiv \frac{t_n - t_0}{t_f - t_0} = 0.92 \Rightarrow t_n = t_0 + \theta_n (t_f - t_0) = 20 + 0.92 \cdot (800 - 20) = 738^\circ\text{C}.$ <p>7) По номограмі (Рис.6.10) визначимо спочатку відносну надлишкову температуру на теплоізованій поверхні при <b>Bi=21,7</b> і <b>Fo=0.103</b>, а далі розрахуємо цю температуру</p> $\theta_{\text{ц}} \equiv \frac{t_{\text{ц}} - t_0}{t_f - t_0} = 0.04 \Rightarrow t_{\text{ц}} = t_0 + \theta_{\text{ц}} (t_f - t_0) = 20 + 0.04 \cdot (800 - 20) = 51^\circ\text{C}.$ <p>8) Розрахуємо час втрати несучої здатності</p> <p>8.1) Розрахуємо критичне значення відносної надлишкової температури на теплоізованій поверхні</p> $\theta_{\text{кр}} \equiv \frac{t_{\text{кр}} - t_0}{t_f - t_0} = \frac{150 - 20}{800 - 20} = 0.17$ <p>8.2) По номограмі (Рис.6.10) при <b>Bi=21,7</b> і <b><math>\theta_{\text{кр}} = 0,17</math></b> визначимо критичне значення критерію Фур'є: <b>Fo=0.18</b></p> <p>8.3) Виходячи з визначення критерію Фур'є, розрахуємо критичний час</p> $\tau_{\text{кр}} = Fo_{\text{кр}} \frac{L^2}{a} = 0.18 \cdot \frac{0.1^2}{1.03 \cdot 10^{-3}} = 1.75 \text{ г.} = 1 \text{ г. } 45 \text{ хв.}$	<p>До дошки ви-кликається новий курсант (слухач).</p> <p>До дошки ви-кликається новий курсант (слухач).</p>
<p>3.1. Нестационарна теплопровідність необмеженої пластини (малі числа Біо)</p>	<p>Задача 2. Стінки сталеві балки мають товщину <math>\delta = 2</math> см. Висота і довжина балки малі у порівнянні з товщиною. Початкова температура балки <math>20^\circ\text{C}</math>. В умовах пожежі температура навколишнього середовища швидко зростає до <math>800^\circ\text{C}</math> і у подальшому залишається сталою. Визначити температуру на поверхні та в середині балки через 15 хв. теплового впливу. З'ясувати можливість руйнування балки, якщо її критична температура <math>400^\circ\text{C}</math>. Визначити час руйнування.</p> <p><math>\delta = 2</math> см; <math>t_f = 800^\circ\text{C}</math>; <math>t_0 = 20^\circ\text{C}</math>; <math>t_{\text{кр}} = 400^\circ\text{C}</math>; <math>\tau = 15</math> хв;</p>	<p>Відмітити зв'язок з пожеж. проф. у будівництві.</p> <p>До дошки ви-</p>

$t_{п} - ?$   $t_{ц} - ?$   $\tau_{кр} - ?$

1) Визначимо середню температуру балки за весь час прогрівання

$$t_{\text{сеп}} = \frac{t_f + t_0}{2} = \frac{800 + 20}{2} = 410^\circ \text{C}$$

характерний розмір при двосторонньому прогріві  $L = \frac{\delta}{2} = \frac{0.02}{2} = 0.01 \text{ м}$

2) Розрахуємо середні характеристики балки (використавши довідник)

коефіцієнт теплопровідності сталі

$$\lambda = 58 - 0,042 \cdot t = 58 - 0,042 \cdot 410 = 40,8 \text{ Вт/(м К)}$$

питома теплоємність сталі

$$c_p = 0,47 + 2,1 \cdot 10^{-4} \cdot t + 5,0 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 = 0,47 + 2,1 \cdot 10^{-4} \cdot 410 + 5,0 \cdot 10^{-7} \cdot 410^2 = 0,640 \text{ кДж/(кг К)}$$

(коефіцієнт температуропровідності у даному випадку не потрібен)

3) Розрахуємо коефіцієнт теплообміну

$$\alpha = 11,63 \cdot \exp(0,0023 \cdot t_f) = 11,63 \cdot \exp(0,0023 \cdot 800) = 73,2 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

4) Визначаємо критерій Біо

$$Bi \equiv \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} = \frac{73,2 \cdot 0,01}{40,8} \approx 0,018 \ll 1$$

5) Визначимо темп нагріву

5.1) Визначимо F/V. Нехай площа перерізу дорівнює S. Тоді площа поверхні теплообміну

$$F = 2 \cdot S, \text{ а об'єм балки } V = S \cdot 2 \cdot R \Rightarrow F/V = (2 \cdot S)/(S \cdot 2 \cdot R) = 1/R.$$

5.2) Розрахуємо темп нагріву

$$m \equiv \frac{\alpha}{\rho \cdot c_p} \cdot \frac{F}{V} = \frac{\alpha}{\rho \cdot c_p} \cdot \frac{1}{R} = \frac{73,2}{7600 \cdot 640 \cdot 0,01} = 1,50 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}.$$

6) Розрахуємо температуру через 15 хв. ( $15 \cdot 60 = 900 \text{ с}$ )

$$t = t_f - (t_f - t_0) \exp(-m \tau) = 800 - (800 - 20) \exp(-1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 900) = 598^\circ \text{C}.$$

7) Розрахуємо час втрати несучої здатності

кликається курсант (слухач).

Курсанти (студенти) роблять висновок о руйнуванні.

До дошки ви-кликається новий курсант (слухач).

Курсанти (слухачі) роблять висновок про безпеку

	$\tau_{кр} = \frac{1}{m} \cdot \ln\left(\frac{t_f - t_0}{t_f - t_{кр}}\right) = \frac{1}{1,5 \cdot 10^{-3}} \cdot \ln\left(\frac{800 - 20}{800 - 400}\right) = 445 \text{ с} = 7 \text{ хв. } 25 \text{ с}$	
<p>3.2. Нестационарна теплопровідність необмеженого циліндра (довільні числа Біо)</p>	<p>Задача 3. Залізобетонна колона діаметром 0,3 м виготовлена з бетону на гранітному щебені. Початкова температура колони 20°C. В умовах пожежі температура навколишнього середовища швидко зростає до 1000°C і у подальшому залишається сталою. Визначити температуру на поверхні і осі колони через 1 годину теплового впливу. Визначити межу вогнестійкості колони, якщо критична температура на осі колони становить 450°C.</p> <p><math>d = 0,3 \text{ м}; t_f = 1000^\circ\text{C}; t_0 = 20^\circ\text{C}; t_{кр} = 450^\circ\text{C}; \tau = 1 \text{ год};</math>  <math>t_n - ? \quad t_{ц} - ? \quad \tau_{кр} - ?</math></p> <p>1) Визначимо середню температуру колони за весь час прогрівання</p> $t_{сер} = \frac{t_f + t_0}{2} = \frac{1000 + 20}{2} = 510^\circ\text{C}$ <p>характерний розмір задачі <math>L = R = d/2 = 0.3/2 = 0.15 \text{ м}</math></p> <p>2) Розрахуємо середні характеристики колони (використавши довідник)</p> <p>коефіцієнт теплопровідності бетону на гранітному щебені  <math>\lambda = 1,42 - 11 \cdot 10^{-4} \cdot t = 1,42 - 11 \cdot 10^{-4} \cdot 510 = 0,859 \text{ Вт}/(\text{м К})</math></p> <p>питома теплоємність  <math>c_p = 0,77 + 6,3 \cdot 10^{-4} \cdot t = 0,77 + 6,3 \cdot 10^{-4} \cdot 510 = 1,09 \text{ кДж}/(\text{кг К})</math></p> <p>густина  <math>\rho = 2220 \text{ кг}/\text{м}^3;</math></p> <p>коефіцієнт температуропровідності</p> $a = \frac{3,6 \cdot \lambda}{c_p \cdot \rho} = \frac{3,6 \cdot 0,859}{1,09 \cdot 2220} = 1,28 \cdot 10^{-3}, \text{ м}^2/\text{год},$ <p>3) Розрахуємо коефіцієнт теплообміну  <math>\alpha = 11,63 \cdot \exp(0,0023 \cdot t_f) = 11,63 \cdot \exp(0,0023 \cdot 1000) = 116 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})</math></p> <p>4) Визначаємо критерій Біо</p> $Bi \equiv \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} = \frac{116 \cdot 0,15}{0,859} = 20,3$	<p>Відмітити зв'язок з пож. проф. у будівництві.</p> <p>До дошки викликається курсант (слухач).</p>

	<p>5) Визначимо критерій Фур'є</p> $Fo \equiv \frac{a \cdot \tau}{L^2} = \frac{1.28 \cdot 10^{-3} \cdot 1}{0.15^2} = 0.057$ <p>6) По номограмі (Рис.6.26) визначимо спочатку відносну надлишкову температуру на поверхні колони при <b>Bi=20,3</b> і <b>Fo=0.057</b>, а далі розрахуємо цю температуру</p> $\theta_{\text{п}} \equiv \frac{t_{\text{п}} - t_0}{t_f - t_0} = 0.91 \Rightarrow t_{\text{п}} = t_0 + \theta_{\text{п}} (t_f - t_0) = 20 + 0.91 \cdot (1000 - 20) = 912^\circ\text{C}.$ <p>7) По номограмі (Рис.6.28) визначимо спочатку відносну надлишкову температуру на вісі колони при <b>Bi=20,3</b> і <b>Fo=0.057</b>, а далі розрахуємо цю температуру</p> $\theta_{\text{ц}} \equiv \frac{t_{\text{ц}} - t_0}{t_f - t_0} = 0.02 \Rightarrow t_{\text{ц}} = t_0 + \theta_{\text{ц}} (t_f - t_0) = 20 + 0.02 \cdot (1000 - 20) = 40^\circ\text{C}.$ <p>8) Розрахуємо час втрати несучої здатності</p> <p>8.1) Розрахуємо критичне значення відносної надлишкової температури на вісі колони</p> $\theta_{\text{кр}} \equiv \frac{t_{\text{кр}} - t_0}{t_f - t_0} = \frac{450 - 20}{1000 - 20} = 0.44$ <p>8.2) По номограмі (Рис.6.28) при <b>Bi=20,3</b> і <b><math>\theta_{\text{кр}} = 0,44</math></b> визначимо критичне значення критерію Фур'є: <b>Fo=0.20</b></p> <p>8.3) Виходячи з визначення критерію Фур'є, розрахуємо критичний час</p> $\tau_{\text{кр}} = Fo_{\text{кр}} \frac{L^2}{a} = 0.20 \cdot \frac{0.15^2}{1.28 \cdot 10^{-3}} = 3.52 \text{ г.} = 3 \text{ г. } 31 \text{ хв.}$	<p>До дошки ви-кликається новий курсант (слухач).</p> <p>До дошки ви-кликається новий курсант (слухач).</p>
<p>3.2. Нестационарна теплопровідність необмеженого циліндра (малі числа Біо)</p>	<p>Задача 4. Перекриття громадської будівлі підвішене на сталевих тросах діаметром <math>d = 3</math> см. Початкова температура тросів <math>20^\circ\text{C}</math>. В умовах пожежі температура навколишнього середовища швидко зростає до <math>600^\circ\text{C}</math> і у подальшому залишається сталою. Визначити температуру на поверхні та вісі тросів через 1 годину теплового впливу. З'ясувати можливість руйнування перекриття, якщо критична температура сталі дорівнює <math>500^\circ\text{C}</math>. Визначити час, через який станеться руйнування (межу вогнестійкості).</p> <p><math>d = 3</math> см; <math>t_f = 600^\circ\text{C}</math>; <math>t_0 = 20^\circ\text{C}</math>; <math>t_{\text{кр}} = 500^\circ\text{C}</math>; <math>\tau = 1</math> год; <math>t - ?</math>    <math>\tau_{\text{кр}} - ?</math></p>	<p>Відмітити зв'язок з пож. проф. у будівництві.</p> <p>До дошки ви-кликається курсант (слухач).</p>

1) Визначимо середню температуру тросів за весь час прогрівання

$$t_{\text{сеп}} = \frac{t_f + t_0}{2} = \frac{600 + 20}{2} = 310^\circ\text{C}$$

$$\text{характерний розмір } L = R = \frac{d}{2} = \frac{0.03}{2} = 0.015 \text{ м}$$

2) Розрахуємо середні характеристики тросу (використавши довідник)

коефіцієнт теплопровідності сталі

$$\lambda = 58 - 0,042 \cdot t = 58 - 0,042 \cdot 310 = 45.0 \text{ Вт/(м К)}$$

питома теплоємність сталі

$$c_p = 0,47 + 2,1 \cdot 10^{-4} \cdot t + 5,0 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 = 0,47 + 2,1 \cdot 10^{-4} \cdot 310 + 5,0 \cdot 10^{-7} \cdot 310^2 = 0,583 \text{ кДж/(кг К)}$$

(коефіцієнт температуропровідності у даному випадку не потрібен)

3) Розрахуємо коефіцієнт теплообміну

$$\alpha = 11,63 \cdot \exp(0,0023 \cdot t_f) = 11,63 \cdot \exp(0,0023 \cdot 600) = 46.2 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$$

4) Визначаємо критерій Біо

$$Bi \equiv \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} = \frac{46.2 \cdot 0.015}{45.0} \approx 0.0154 \ll 1$$

5) Визначимо темп нагріву

5.1) Визначимо F/V. Нехай довжина ділянки тросу дорівнює  $l$ . Тоді площа поверхні теплообміну  $F = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot l$ , а об'єм ділянки тросу  $V = \pi \cdot R^2 \cdot l \Rightarrow F/V = (2 \cdot \pi \cdot R \cdot l) / (\pi \cdot R^2 \cdot l) = 2/R$ .

5.2) Розрахуємо темп нагріву

$$m \equiv \frac{\alpha}{\rho \cdot c_p} \cdot \frac{F}{V} = \frac{\alpha}{\rho \cdot c_p} \cdot \frac{2}{R} = \frac{46.2 \cdot 2}{7600 \cdot 583 \cdot 0.015} = 1.39 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}.$$

6) Розрахуємо температуру через 1 годину (3600 с)

$$t = t_f - (t_f - t_0) \exp(-m \tau) = 600 - (600 - 20) \exp(-1,39 \cdot 10^{-3} \cdot 3600) = 596^\circ\text{C}.$$

7) Розрахуємо час втрати несучої здатності

$$\tau_{\text{кр}} = \frac{1}{m} \cdot \ln \left( \frac{t_f - t_0}{t_f - t_{\text{кр}}} \right) = \frac{1}{1,39 \cdot 10^{-3}} \cdot \ln \left( \frac{600 - 20}{600 - 500} \right) = 1265 \text{ с} \approx 21 \text{ хв.}$$

Курсанти (студенти) роблять висновок о руйнуванні.

Курсанти (слухачі) роблять висновок про небезпеку

<p>4. Підведення підсумків ПЗ та завдання на СП.</p>	<p>Підсумок. В ході заняття була на практиці застосована методика визначення температури та часу (межі вогнестійкості) для нестационарної теплопровідності в задачах ПБ.</p> <p>Оцінюється робота курсантів (слухачів), оцінки оголошуються та виставляються до журналу групи. Нагадується порядок здачі заборгованостей.</p> <p>Оцінюється робота, оцінки повідомляються та виставляються до журналу.</p> <p>Завдання на СП:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Повторити тему по конспекту та посібнику І.Б.Рябова, І.В.Сайчук, А.Я.Шаршанов. Термодинаміка та теплопередача у пожежній справі. – Харків: АПБУ, 20002. – с.283-292.</li> <li>2. Підготуватися до контролю (рішенню аналогічних задач) по карткам.</li> </ol>	
--	---	--

Тема: Нестационарна теплопровідність.

Тема заняття (2) : **Розрахунок температур у напівобмежених тілах (1-й рід).**

Цілі заняття: 1. Навчити курсантів застосуванню законів нестационарної теплопровідності щодо вирішення задач пожежної безпеки.

3. Закріпити матеріал відповідної лекції по нестационарній теплопровідності.

Час: 2 години.

Місце проведення заняття: лабораторія термодинаміки та теплопередачі.

Мат. забезпечення: 1) плакати по темі "Нестационарна теплопровідність";

2) таблиці функції Крампа – 15 шт;

3) картки із задачами по прогріву тіл обмежених розмірів (30 шт.) і номограми для визначення відносних температур у тілах обмеж. розмірів у задачах 3-го роду – 15 штук.

Література: 1. Рябова І.Б., Сайчук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі. -Харків: АПБУ, 2002.

2. Башкирцев М.П. Задачник по теплопередаче в пожарном деле.

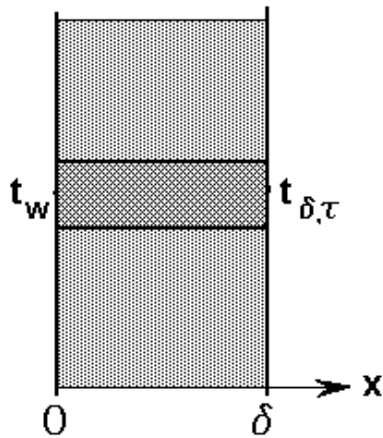
#### План заняття.

- |   |        |
|---|--------|
| 1. Організаційна частина.   | 5 хв.  |
| 2. Контрольне опитування по карткам (задачі по темі "Розрахунок температур у тілах обмежених розмірів")   | 25 хв. |
| 3. Закріплення матеріалу та рішення нових задач по темі "Нестационарна теплопровідність напівобмеженого тіла в задачах пожежної безпеки (при граничних умовах 1-го роду)" |        |
| 3.1. Визначення температур  | 30 хв. |
| 3.2. Визначення межі вогнестійкості   | 10 хв. |
| 3.3 Визначення товщини захисного шару   | 5 хв.  |
| 4. Підведення підсумків ПЗ та завдання на самопідготовку.   | 5 хв.  |

Назва питання	Стислий зміст питання, що розглядається.	Метод. вказівки
1. Організаційна частина.	Прийняти рапорт у чергового, перевірити зовнішній вигляд та наявність курсантів (слухачів) на заняттях. Перевірити забезпеченість заняття відповідною літературою. Назвати тему ПЗ, його мету. Об'явити порядок проведення заняття.	



2. Контрольне опитування	Курсанти (слухачі) письмово розв'язують індивідуальні задачі по карткам по темі " Розрахунок температур у тілах обмежених розмірів "	Надає уточн. пояснення
3	Закріплення матеріалу та рішення нових задач по темі "Нестационарна теплопровідність напівобмеженого тіла в задачах пожежної безпеки (при граничних умовах 1-го роду)"	
3. Необхідні загальні положення теорії нестационарної теплопровідності	<p>Напівобмежене тіло – тіло, обмежене з однієї сторони плоскістю і необмежене з інших боків. – фактично це напівпростір, тобто абстрактний об'єкт. Критерій того, що реальну стінку товщиною <math>\delta</math> можна розглядати, як напівобмежене тіло</p> $\frac{\delta}{2\sqrt{a\tau}} > 0.6$ <p>де <math>\tau</math> - час розгляду, а <math>a</math> - коефіцієнт температуропровідності.  Граничні умови 1-го роду – завдання на температури на границі тіла.  В задачах 1-го роду у стінах у випадку залежності властивостей матеріалу від температури їх визначають при середній температурі</p> $t_{\text{сер}} = \frac{t_w + \frac{t_{x,\tau} + t_0}{2}}{2}$ <p>де <math>t_{x,\tau} \equiv t(x,\tau)</math> - температура в точці з координатою <math>x</math> через розрахунковий час <math>\tau</math>; <math>t_w</math> – стала температура на поверхні; <math>t_0</math> - початкова температура.  Температура <math>t_{x,\tau}</math> задовольняє рівнянню</p> $t_{x,\tau} = t_w - (t_w - t_0) \cdot \text{erf}(A), \quad \text{або} \quad \frac{t_w - t_{x,\tau}}{t_w - t_0} = \text{erf}(A)$ <p>в якому аргумент функції дорівнює <math>A = \frac{x}{2\sqrt{a\tau}}</math>.</p>	Викладач нагадує новий матеріал.
3.1. Визначення температур	<p>Задача. Крізь протипожежну стіну проходить сталевий дріт, бокова поверхня якого добре теплоізолювана (тобто нагрів дроту можна розглядати як нагрів стіни). Торець дроту раптово нагрівається до температури 1000°C, яка надалі залишається сталою. Початкова температура дроту 20°C. У приміщенні є речовини з температурою самозапалювання 250°C.</p> <p>Визначити температуру дроту на виході із стіни товщиною 0,25 м в суміжне приміщення через 1,5 години теплового впливу. З'ясувати чи може нагрівання дроту привести до пожежі у сусідньому приміщенні.</p>	

	<p>Визначити час, через який у сусідньому приміщенні при даній товщині плити стає можливим самозаймання.</p> <p>Визначити необхідну товщину протипожежної стін, для якої самозаймання стає можливим через 1,5 години.</p>	
		<p><math>x = \delta = 0,25 \text{ м};</math>  <math>t_w = 1000^\circ\text{C};</math>  <math>t_0 = 20^\circ\text{C};</math>  <math>t_{кр} = 250^\circ\text{C};</math>  <math>\tau = 1,5 \text{ год}</math></p> <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> <p><math>t_{x,\tau} - ?</math>  <math>x_{кр} - ?</math>  <math>\tau_{кр} - ?</math></p>
	<p>Через те, що середня температура залежить від шуканої температури, задачу визначення температури будемо рішати методом послідовних наближень, маючи на меті досягнення 10% відносного розходження.</p> <p>Прийmemo, що у нульовому наближенні <math>t_{x,\tau}^{(0)} = 180^\circ\text{C}</math>.</p> <p>Розрахуємо температуру у першому наближенні.</p> <p>1) Середня температура дроту</p> $t_{\text{сеп}}^{(0)} = \frac{t_w + \frac{t_{x,\tau}^{(0)} + t_0}{2}}{2} = \frac{1000 + \frac{180 + 20}{2}}{2} = 550^\circ\text{C}$ <p>2) Фізичні параметри сталі (по довіднику)</p> $\rho = 7600 \text{ кг/м}^3;$ $\lambda^{(0)} = 58 - 0,042 * t_{\text{сеп}}^{(0)} = 58 - 0,042 * 550 = 34,9 \text{ Вт/(м К)};$ $c^{(0)} = 0,47 + 2,1 * 10^{-4} * t_{\text{сеп}}^{(0)} + 5 * 10^{-7} * t_{\text{сеп}}^{(0)2} = 0,47 + 2,1 * 10^{-4} * 550 + 5 * 10^{-7} * 550^2 = 0,737 \text{ Дж/(кг К)};$	<p>До дошки викликається курсант (слухач)</p>

$$a^{(0)} = 3,6 * \lambda^{(0)} / (\rho c^{(0)}) = 3,6 * 34,9 / (7600 * 0,737) = 0,0224 \text{ м}^2/\text{ГОД.}$$

3) Розраховуємо аргумент функції Крампа і перевіряємо умову напівскінченності

$$A^{(0)} = \frac{\delta}{2\sqrt{a^{(0)}\tau}} = \frac{0.25}{2\sqrt{0.0224 * 1.5}} = 0.682 > 0.6$$

4) По таблиці знаходимо значення функції Крампа

$$\begin{aligned} \text{erf}(A^{(0)}) &= \text{erf}(0.682) \approx \text{erf}(0.68) + (0.682 - 0.68) \frac{\text{erf}(0.70) - \text{erf}(0.68)}{0.70 - 0.68} = \\ &= 0.6638 + 0.002 \frac{0.6778 - 0.6638}{0.02} = 0.665 \end{aligned}$$

5) Температура дроту в першому наближенні

$$t_{x,\tau}^{(1)} = t_w - (t_w - t_0) * \text{erf}(A^{(0)}) = 1000 - (1000 - 20) * 0.665 = 348^\circ\text{C.}$$

6) Розрахуємо температуру у другому наближенні.

6.1) Середня температура дроту

$$t_{\text{сеп}}^{(1)} = \frac{t_w + \frac{t_{x,\tau}^{(1)} + t_0}{2}}{2} = \frac{1000 + \frac{348 + 20}{2}}{2} = 592^\circ\text{C}$$

Порівняємо відносне розходження наближень:

$$\left| \frac{t_{\text{сеп}}^{(1)} - t_{\text{сеп}}^{(0)}}{t_{\text{сеп}}^{(1)}} \right| = \frac{592 - 550}{592} = 0.07 < 0.10$$

Через досягнення 10% межі, можна припинити розрахунки. Якщо орієнтуємося на 5% точність, то продов-

До дошки  
викликається  
курсант  
(слухач)

жуємо розрахунки.

6.2) Фізичні параметри сталі (по довіднику)

$$\lambda^{(1)} = 58 - 0,042 * t_{\text{сер}}^{(1)} = 58 - 0,042 * 592 = 33,1 \text{ Вт/(м К)};$$

$$c^{(1)} = 0,47 + 2,1 * 10^{-4} * t_{\text{сер}}^{(1)} + 5 * 10^{-7} * t_{\text{сер}}^{(1)2} = 0,47 + 2,1 * 10^{-4} * 592 + 5 * 10^{-7} * 592^2 = 0,770 \text{ Дж/(кг К)};$$

$$a^{(1)} = 3,6 * \lambda^{(1)} / (\rho * c^{(1)}) = 3,6 * 33,1 / (7600 * 0,770) = 0,0204 \text{ м}^2/\text{год.}$$

6.3) Розраховуємо аргумент функції Крампа і перевіряємо умову напівскінченності

$$A^{(1)} = \frac{\delta}{2\sqrt{a^{(1)}\tau}} = \frac{0,25}{2\sqrt{0,0204 * 1,5}} = 0,715 > 0,6$$

6.4) По таблиці знаходимо значення функції Крампа

$$\begin{aligned} \text{erf}(A^{(1)}) &= \text{erf}(0,715) \approx \text{erf}(0,70) + (0,715 - 0,70) \frac{\text{erf}(0,72) - \text{erf}(0,70)}{0,72 - 0,70} = \\ &= 0,6778 + 0,015 \frac{0,6914 - 0,6778}{0,02} = 0,688 \end{aligned}$$

6.5) Температура дроту у другому наближенні

$$t_{x,\tau}^{(2)} = t_w - (t_w - t_0) * \text{erf}(A^{(1)}) = 1000 - (1000 - 20) * 0,688 = 326^\circ\text{C.}$$

7) Розрахуємо середню температуру дроту

$$t_{\text{сер}}^{(2)} = \frac{t_w + \frac{t_{x,\tau}^{(2)} + t_0}{2}}{2} = \frac{1000 + \frac{326 + 20}{2}}{2} = 587^\circ\text{C}$$

	<p>Порівняємо відносне розходження наближень:</p> $\left  \frac{t_{\text{сеп}}^{(2)} - t_{\text{сеп}}^{(1)}}{t_{\text{сеп}}^{(2)}} \right  = \frac{592 - 587}{587} = 0.009 < 0.05$ <p>Через досягнення 10% закінчуємо розрахунки температури. Таким чином <math>t_{x,\tau} = 326^{\circ}\text{C} &gt; 250^{\circ}\text{C}</math>, тобто можливе самозаймання.</p>	
<p>3.2. Визначення межі вогнестійкості</p>	<p>Визначимо <math>\tau_{\text{кр}}</math> - час, через який у сусідньому приміщенні при даній товщині плити стає можливим самозаймання.</p> <p>1) Середня температура дроту</p> $t_{\text{сеп}} = \frac{t_w + \frac{t_{\text{кр}} + t_0}{2}}{2} = \frac{1000 + \frac{250 + 20}{2}}{2} = 568^{\circ}\text{C}$ <p>2) Фізичні параметри сталі (по довіднику)</p> $\rho = 7600 \text{ кг/м}^3;$ $\lambda = 58 - 0,042 * t_{\text{сеп}} = 58 - 0,042 * 568 = 34,1 \text{ Вт/(м К)};$ $c = 0,47 + 2,1 * 10^{-4} * t_{\text{сеп}} + 5 * 10^{-7} * t_{\text{сеп}}^2 = 0,47 + 2,1 * 10^{-4} * 568 + 5 * 10^{-7} * 568^2 = 0,751 \text{ Дж/(кг К)};$ $a = 3,6 * \lambda / (\rho * c) = 3,6 * 34,1 / (7600 * 0,751) = 0,0215 \text{ м}^2/\text{год}.$ <p>3) Розрахуємо відносну надлишкову критичну температуру</p> $\frac{t_w - t_{\text{кр}}}{t_w - t_0} = \frac{1000 - 250}{1000 - 20} = 0.765$ <p>4) З рівняння</p> $\text{erf}(A_{\text{кр}}) = \frac{t_w - t_{\text{кр}}}{t_w - t_0} = 0.765,$ <p>використовуючи таблицю значень функції Крампа, знаходимо критичне значення аргументу <math>A_{\text{кр}} = 0,840</math>.</p>	<p>До дошки викликається курсант (слухач)</p>

	<p>5) З рівняння <math>A_{кр} = \frac{x}{2\sqrt{a\tau_{кр}}}</math> визначаємо критичний час (межу вогнестійкості)</p> $\tau_{кр} = \frac{x^2}{4aA_{кр}^2} = \frac{0,25^2}{4 * 0,0215 * 0,840^2} = 1,03 \text{ год} = 62 \text{ хв.}$	
3.3 Визначення товщини захисного шару	<p>Визначимо необхідну товщину протипожежної стін, для якої самозаймання стає можливим через 1,5 години.</p> <p>Пункти 1) – 4) такі, як у попередній задачі.</p> <p>5) З рівняння <math>A_{кр} = \frac{x_{кр}}{2\sqrt{a\tau}}</math> визначаємо необхідну товщину стінки</p> $x_{кр} = 2 A_{кр} \sqrt{a\tau} = 2 * 0,840 * \sqrt{0,0215 * 1,5} = 0,302 \text{ м.}$	До дошки викликається курсант (слухач)
4. Підведення підсумків ПЗ та завдання на СП	<p>Оцінюється робота, оцінки повідомляються та виставляються до журналу групи.</p> <p>Завдання на СП:</p> <p>6) Дорахувати та оформити задачі.</p> <p>7) Повторити тему "Нестационарна теплопровідність" по посібнику Рябова І.Б., Сайчук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі. -Харків: АПБУ, 2002. (Глава 13 С.296-314).</p> <p>3) Підготуватися до письмового контролю по темі "Нестационарна теплопровідність в напівобмеженому тілі (задача 1-го роду)".</p>	

Тема: Нестационарна теплопровідність.

Тема заняття (3) : **Нестационарна теплопровідність у задачах пожежної безпеки (напівобмежені тіла, 3-рід).**

Цілі заняття: 1. Навчити курсантів застосуванню законів нестационарної теплопровід. щодо вирішення задач пожежної безпеки.

3. Закріпити матеріал відповідної лекції по нестационарній теплопровідності.

Час: 2 години.

Місце проведення заняття: лабораторія термодинаміки та теплопередачі.

Мат. забезпечення: 1) плакати по темі "Нестационарна теплопровідність";

2) номограми для визначення відносних температур у задачах 3-го роду – 10 штук.

Література: 1. Рябова І.Б., Сайчук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі. -Харків: АПУ, 2002.

2. Башкирцев М.П. Задачник по теплопередаче в пожарном деле.

#### План заняття.

- |   |        |
|---|--------|
| 1. Організаційна частина.   | 5 хв.  |
| 2. Закріплення матеріалу та рішення нових задач по темі "Нестационарна теплопровідність напівобмеженого тіла в задачах пожежної безпеки (при граничних умовах 3-го роду)" |        |
| 2.1. Визначення температур  | 30 хв. |
| 2.2. Визначення межі вогнестійкості   | 30 хв. |
| 2.3 Визначення товщини захисного шару   | 10 хв. |
| 3. Підведення підсумків ПЗ та завдання на самопідготовку.   | 5 хв.  |

Назва питання	Стислий зміст питання, що розглядається.	Метод. вказівки
1. Організаційна частина.	Прийняти рапорт у чергового, перевірити зовнішній вигляд та наявність курсантів (слухачів) на заняттях. Перевірити забезпеченість заняття відповідною літературою. Назвати тему ПЗ, його мету. Об'явити порядок проведення заняття.	
2.	Закріплення матеріалу та рішення нових задач по темі "Нестационарна теплопровідність напівобмеженого тіла в задачах пожежної безпеки (при граничних умовах 3-го роду)"	
Теоретичні засади	Напівобмежене тіло – тіло, обмежене з однієї сторони плоскістю і необмежене з інших боків. – фактично це напівпростір, тобто абстрактний об'єкт. Критерій того, що реальну стінку товщиною $\delta$ можна розгля-	Викладач нагадує но-

дати, як напівобмежене тіло

$$\frac{\delta}{2\sqrt{a\tau}} > 0.6$$

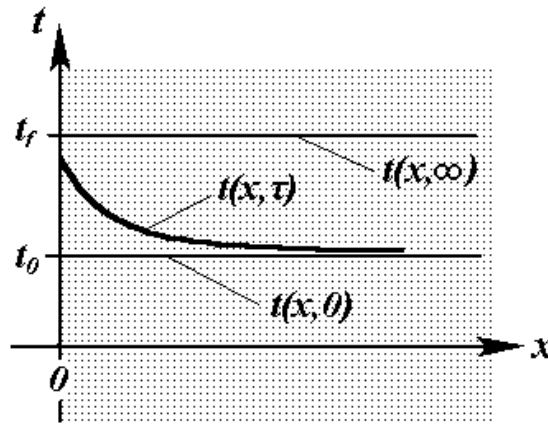
де  $\tau$  - час розгляду, а  $a$  - коефіцієнт температуропровідності.

Граничні умови 3-го роду – завдання температури  $t_f$  середовища, що омиває поверхню тіла, та коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  на цій поверхні.

В задачах 3-го роду у стінах у випадку залежності властивостей матеріалу від температури їх визначають при середній температурі

$$t_{\text{сеп}} = \frac{t_f + t_0}{2}$$

де  $t_f$  – стала температура середовища, що омиває поверхню тіла;  $t_0$  – початкова температура.



Температура  $t_{x,\tau}$  (товстої стіни на глибині  $x$  через час  $\tau$  від початку нагріву) задовольняє рівнянню

$$\frac{t_{x,\tau} - t_0}{t_f - t_0} = \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right) - \exp\left[\frac{\alpha \cdot x}{\lambda} + \left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^2 a\tau\right] \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} + \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{a\tau}\right).$$

де  $\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки.

вий матеріал.



	<p>Якщо ввести критерії подібності Фур'є і Біо для точки, що має координату <math>x</math>, відповідно:</p> $Fo_x \equiv \frac{a \cdot \tau}{x^2}, \quad Bi_x \equiv \frac{\alpha \cdot x}{\lambda},$ <p>і відносну надлишкову температуру:</p> $\theta \equiv \frac{t_{x,\tau} - t_0}{t_f - t_0},$ <p>то попередню залежність можна представити у безрозмірному (критеріальному) виді:</p> $\theta = \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{Fo_x}}\right) - \exp(Bi_x + Bi_x^2 \cdot Fo_x) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{Fo_x}} + Bi_x \sqrt{Fo_x}\right),$ <p>У практиці використовують номограму даної функції у змінних:</p> $\frac{1}{2\sqrt{Fo_x}} = \frac{x}{2\sqrt{a \cdot \tau}}, \quad Bi_x \sqrt{Fo_x} = \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{a \cdot \tau}.$	
<p>2.1. Визначення температур</p>	<p>Задача. Залізобетонну плиту перекриття виготовлено з піщаного бетону. Товщина плити 20 см. В плиті на глибині 2,5 см від поверхні умуровано сталеву арматуру. Початкова температура плити 20°C. В умовах пожежі температура середовища з одного боку плити раптово підвищується до 900°C і надалі залишається сталою. Коефіцієнт тепловіддачі від середовища до плити дорівнює <math>\alpha = 11,63 \cdot \exp(0,0023 \cdot t_f)</math>, Вт/(м²*К).</p> <p>Визначити температуру арматури через 0,5 години теплового впливу.  Визначити час, через який температура арматури досягне критичного значення 450°C.  Визначити необхідну глибину залягання арматури, яка робить можливим витримати пожежу тривалістю 1,5 години.</p> <p><math>\delta = 20</math> см ; <math>x = 2,5</math> см; <math>t_f = 900^\circ\text{C}</math>; <math>t_0 = 20^\circ\text{C}</math>; <math>t_{кр} = 450^\circ\text{C}</math>; <math>\tau = 0,5</math> год</p> <p>-----</p> <p><math>t_{x,\tau}</math> - ?  <math>\tau_{кр}</math> - ? (<math>x = 2,5</math> см)  <math>x_{кр}</math> - ? (<math>\tau = 1,5</math> год)</p> <p>1) Визначимо середню температуру плити за весь час прогрівання</p> $t_{сеп} = \frac{t_f + t_0}{2} = \frac{900 + 20}{2} = 460^\circ\text{C}.$ <p>2) Розрахуємо середні характеристики плити (використавши довідник)</p>	<p>До дошки викликається курсант (слухач)</p>

коефіцієнт теплопровідності піщаного бетону

$$\lambda = 1,05 - 5,8 \cdot 10^{-4} \cdot t = 1,05 - 5,8 \cdot 10^{-4} \cdot 460 = 0,783 \text{ Вт/(м К)}$$

питома теплоємність

$$c_p = 0,77 + 6,3 \cdot 10^{-4} \cdot t = 0,77 + 6,3 \cdot 10^{-4} \cdot 460 = 1,06 \text{ кДж/(кг К)}$$

густина

$$\rho = 1900 \text{ кг/м}^3;$$

коефіцієнт температуропровідності

$$a = \frac{3,6 \cdot \lambda}{c_p \cdot \rho} = \frac{3,6 \cdot 0,783}{1,06 \cdot 1900} = 1,40 \cdot 10^{-3}, \text{ м}^2/\text{год},$$

3) Розрахуємо коефіцієнт теплообміну

$$\alpha = 11,63 \cdot \exp(0,0023 \cdot t_f) = 11,63 \cdot \exp(0,0023 \cdot 900) = 92,2 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

4) Перевіримо виконання умови напівобмеженості для максимального часу  $\tau = 1$  год

$$\frac{\delta}{2\sqrt{a \cdot \tau}} = \frac{0,20}{2\sqrt{0,0014 \cdot 1}} = 2,67 > 0,6$$

5) Визначаємо розрахункові комбінації критеріїв Фур'є і Біо

$$A = \frac{1}{2\sqrt{Fo_x}} = \frac{x}{2\sqrt{a \cdot \tau}} = \frac{0,025}{2\sqrt{0,0014 \cdot 0,5}} = 0,472,$$

$$B = Bi_x \sqrt{Fo_x} = \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{a \cdot \tau} = \frac{92,2}{0,783} \sqrt{0,0014 \cdot 0,5} = 3,115$$

6) Визначимо відносну надлишкову температуру

$$\begin{aligned} \theta &= \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{Fo_x}}\right) - \exp\left(Bi_x + Bi_x^2 \cdot Fo_x\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{Fo_x}} + Bi_x \sqrt{Fo_x}\right) = \\ &= \operatorname{erfc}(A) - \exp\left(2 \cdot A \cdot B + B^2\right) \cdot \operatorname{erfc}(A + B) = \\ &= \operatorname{erfc}(0,472) - \exp\left(2 \cdot 0,472 \cdot 3,115 + 3,115^2\right) \cdot \operatorname{erfc}(0,472 + 3,115) = \\ &= \operatorname{erfc}(0,472) - \exp(12,64) \cdot \operatorname{erfc}(3,59) = 1 - \operatorname{erf}(0,472) - \exp(12,64) \cdot \frac{\exp(-3,59^2)}{\sqrt{3,14 \cdot 3,59}} = \end{aligned}$$

	$= 1 - 0.496 - \frac{\exp(12.64 - 3.59^2)}{\sqrt{3.14 \cdot 3.59}} = 0.381.$ <p>7) Розрахуємо температуру</p> $t_{x,\tau} = t_0 + \theta (t_f - t_0) = 20 + 0.381 \cdot (900 - 20) = 355^\circ\text{C}.$ <p>Визначимо те ж саме при допомозі номограм.</p> <p>6') Через те, що <math>\frac{1}{2\sqrt{Fo_x}} = 0.47</math>, <math>Bi_x \sqrt{Fo_x} = 3.1</math>, з номограми <math>\Rightarrow \theta = 0.38</math></p> <p>7') Розрахуємо температуру</p> $t_{x,\tau} = t_0 + \theta (t_f - t_0) = 20 + 0.38 \cdot (900 - 20) = 354^\circ\text{C}.$	До дошки викликається курсант (слухач)
2.2. Визначення межі вогнестійкості	<p>Визначити час, через який температура арматури (плити при <math>x = 2,5</math> см) досягне критичного значення <math>t_{кр} = 450^\circ\text{C}</math>. Задачу будемо вирішувати методом лінійної інтерполяції. Додатково до результату попереднього розгляду визначимо температуру плити на глибині <math>x = 2,5</math> см через 1 годину теплового впливу.</p> <p>5") Визначаємо розрахункові комбінації критеріїв Фур'є і Біо</p> $A = \frac{1}{2\sqrt{Fo_x}} = \frac{x}{2\sqrt{a \cdot \tau}} = \frac{0.025}{2\sqrt{0.0014 \cdot 1}} = 0.334,$ $B = Bi_x \sqrt{Fo_x} = \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{a \cdot \tau} = \frac{92.2}{0.783} \sqrt{0.0014 \cdot 1} = 4.4$ <p>6") Через те, що <math>\frac{1}{2\sqrt{Fo_x}} = 0.334</math>, <math>Bi_x \sqrt{Fo_x} = 4.4</math>, з номограми <math>\Rightarrow \theta = 0.53</math></p> <p>7") Розрахуємо температуру</p> $t_{x,\tau} = t_0 + \theta (t_f - t_0) = 20 + 0.53 \cdot (900 - 20) = 386^\circ\text{C}.$ <p>8") Таким чином ми маємо залежність при <math>\tau_1 = 0,5</math> год <math>t_1 = 354^\circ\text{C}</math>, при <math>\tau_2 = 1.0</math> год <math>t_2 = 386^\circ\text{C} \Rightarrow</math></p> $\tau_{кр} = \tau_1 + \frac{\tau_2 - \tau_1}{t_2 - t_1} (t_{кр} - t_1) = 0.5 + \frac{1.0 - 0.5}{486 - 354} (450 - 354) = 0.86 \text{ год} = 52 \text{ хв.}$	До дошки викликається курсант (слухач)
2.3 Визначення тов-	Визначимо необхідну глибину залягання арматури, яка робить можливим витримати пожежу тривалістю 1,5 години.	До дошки викликається-

щину захисного шару	<p>Пункти 1) – 4) такі, як у попередній задачі.</p> <p>5") Визначаємо комбінацію критеріїв Фур'є і Біо, яка залежить тільки від часу,</p> $B = Bi_x \sqrt{Fo_x} = \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{a \cdot \tau} = \frac{92.2}{0.783} \sqrt{0.0014 \cdot 1.5} = 5.40.$ <p>6") Розрахуємо критичне значення відносної надлишкової температури</p> $\theta_{кр} = \frac{t_{кр} - t_0}{t_f - t_0} = \frac{450 - 20}{900 - 20} = 0,49.$ <p>7") Через те, що <math>Bi_x \sqrt{Fo_x} = 5,4</math>, <math>\theta = 0.49</math> з номограми <math>\Rightarrow A_{кр} = \frac{1}{2\sqrt{Fo_x}} = 0.40</math>.</p> <p>8") З рівняння <math>A_{кр} = \frac{x_{кр}}{2\sqrt{a\tau}}</math> визначаємо необхідну товщину залягання арматури</p> $x_{кр} = 2 A_{кр} \sqrt{a\tau} = 2 * 0,40 * \sqrt{0,0014 * 1,5} = 0.037 \text{ м.}$	ся курсант (слухач)
3. Підведення підсумків ПЗ та завдання на СП	<p>Оцінюється робота, оцінки повідомляються та виставляються до журналу групи.</p> <p>Завдання на СП:</p> <p>8) Дорахувати та оформити задачі.</p> <p>9) Повторити тему "Нестационарна теплопровідність" по посібнику Рябова І.Б., Сайчук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі. -Харків: АПБУ, 2002. (Глава 13 С.296-314).</p> <p>3) Підготуватися до письмового контролю по темі "Нестационарна теплопровідність в напівобмеженому тілі (задача 1-го роду)".</p>	

Тема N13: Нестационарна теплопровідність.

Тема заняття (4) : **Розрахунок температурних полів в умовах стандартного температурного режиму**

Цілі заняття: 1. Навчити курсантів застосуванню законів нестационарної теплопровідності щодо вирішення задач пожежної безпеки.

3. Закріпити матеріал відповідної лекції по нестационарній теплопровідності.

Час: 2 години.

Місце проведення заняття: лабораторія термодинаміки та теплопередачі.

Мат. забезпечення: 1) плакати по темі "Нестационарна теплопровідність";

2) таблиці функції Крампа – 15 шт;

3) картки із задачами по прогріву напівобмежених тіл (30 шт.) і номограми для визначення відносних температур у тілах обмеж. розмірів у задачах 3-го роду – 15 штук.

Література: 1. Рябова І.Б., Сайчук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі. -Харків: АПБУ, 2002.

2. Башкирцев М.П. Задачник по теплопередаче в пожарном деле.

#### План заняття.

- |   |        |
|---|--------|
| 1. Організаційна частина.   | 5 хв.  |
| 2. Контрольне опитування по карткам (задачі по темі "Розрахунок температур у тілах у напівобмежених тілах (1-рід)")                   | 30 хв. |
| 3. Закріплення матеріалу та рішення нових задач по темі "Розрахунок температурних полів в умовах стандартного температурного режиму". |        |
| 3.1. Необхідні загальні положення теорії нестационарної теплопровідності  | 10 хв. |
| 3.2. Прогрів плити в умовах "стандартної" пожежі  | 10 хв. |
| 3.3. Прогрів балки в умовах "стандартної пожежі"  | 20 хв. |
| 4. Підведення підсумків ПЗ та завдання на самопідготовку.   | 5 хв.  |

Назва питання	Стислий зміст питання, що розглядається.	Метод. вказівки
1. Організаційна частина.	Прийняти рапорт у чергового, перевірити зовнішній вигляд та наявність курсантів (слухачів) на заняттях. Перевірити забезпеченість заняття відповідною літературою. Назвати тему ПЗ, його мету. Об'явити порядок проведення заняття.	

2. Контрольне опитування	Курсанти (слухачі) письмово розв'язують індивідуальні задачі по карткам по темі "Розрахунок температур у тілах у напівобмежених тілах (1-рід)"	Надає уточн. пояснення
3	Закріплення матеріалу та рішення нових задач по темі "Розрахунок температурних полів в умовах стандартного температурного режиму".	
3.1. Необхідні загальні положення теорії нестационарної теплопровідності	<p><b>Стандартний температурний режим</b> задовільно описує температуру пожежі на початковій стадії її розвитку. Це узгоджений (стандартизований) режим випробування будівельних конструкцій. Для розрахунків же важливо, що при ньому температура газового середовища виражається формулою:</p> $t_f = 345 \lg(8 \tau + 1), ^\circ\text{C},$ <p>де час від початку пожежі (<math>\tau</math>) треба брати в хвилинах.</p> <p><b>1 Напівобмежене тіло</b></p> <p>За стандартного температурного режиму однобічного обігріву залізобетонних стін температура конструкції на глибині <math>x</math> в момент часу <math>\tau</math> від початку обігріву виражається співвідношенням:</p> $t(x, \tau) = 1250 - (1250 - t_0) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x + k\sqrt{a}}{2\sqrt{a\tau}}\right), ^\circ\text{C}, \quad (1)$ <p>в якому поправочний коефіцієнт <math>k</math>, що залежить від густини бетону <math>\rho</math> (<math>\text{кг}/\text{м}^3</math>), розраховується за формулою:</p> $k = 0.5 (1 + \rho \cdot 10^{-4}), \text{ год}^{1/2}. \quad (2)$ <p>При цьому якщо густина бетону не відома, то беруть <math>k = 0.62 \text{ год}^{1/2}</math>.</p> <p>Як і при попередніх розглядах, припущення, що стіна веде себе як напівобмежене тіло, накладає додаткову умову на товщину стіни <math>\delta</math> і час розгляду процесу <math>\tau</math>. Так само, як і у випадку постійної зовнішньої температури, умова формальна зводиться до обмеження на аргумент функції помилок:</p> $A = \frac{\delta + k\sqrt{a}}{2\sqrt{a\tau}} > 0.6. \quad (3)$ <p>При використанні формули (1), якщо коефіцієнти теплопровідності або температуропровідності матеріалу залежать від температури, при їх розрахунку рекомендується в якості визначаючої брати середню температуру <math>t_{\text{сер}} = 450^\circ\text{C}</math>.</p>	Викладач нагадує новий матеріал.

## 2 Необмежена плита при двосторонньому нагріванні

За стандартного температурного режиму розрахунок температур в плиті (товщиною  $2R$ ), що обігрівається з двох сторін, проводиться за формулою аналогічної задачі 1-го роду з двома зміними:

1) в якості температури поверхні береться  $1250^{\circ}\text{C}$  ;

2) замість характерної відстані  $R$  береться величина  $R + k\sqrt{a}$  .

У результаті розрахункова формула має вид:

$$t(x, \tau) = 1250 - (1250 - t_0) \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2 \cdot (-1)^{i+1}}{\mu_i} \cos\left(\mu_i \frac{x}{R + k\sqrt{a}}\right) \exp(-\mu_i^2 \cdot Fo), ^{\circ}\text{C}, \quad (4)$$

де

$$\mu_i \equiv (2i - 1) \cdot \frac{\pi}{2}, \quad Fo \equiv \frac{a \cdot \tau}{(R + k\sqrt{a})^2} .$$

Дана формула добре (із точністю кілька процентів) узгоджується з практикою при  $Fo < 0.32$ .

## 3 Ребро, що обігрівається з трьох сторін

В якості таких ребер можна розглядати, наприклад, ребра залізобетонних балок. Як правило, фахівців цікавить температура арматури. Остання розташована в нижній частині, тому задача зводиться до з'ясування закономірностей прогрівання напівобмеженої пластини (дивись рисунок).

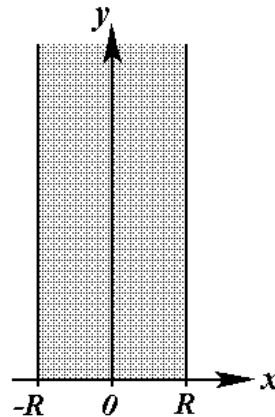


Рисунок 13.14 - Схема поперечного перетину напівобмеженої пластини

Задачу про прогрівання напівобмеженої пластини можна розділити на задачу прогріву (в напрямку  $x$ ) необмеженої пластини і задачу прогріву (в напрямку  $y$ ) напівпростору. У відповідності до цього температура  $t(x, y, \tau)$  в довільній точці поперечного перетину напівобмеженої пластини задовольняє співвідношенню:

$$\frac{1250 - t(x, y, \tau)}{1250 - t_0} = \frac{1250 - t_{пл}(x, \tau)}{1250 - t_0} \cdot \frac{1250 - t_{\infty}(y, \tau)}{1250 - t_0}, \quad (5)$$

де  $t_{пл}(x, \tau)$  - температура, що мала б місце при двосторонньому нагріванні нескінченної плити товщиною  $2R$  (розраховується за формулою (4));  $t_{\infty}(y, \tau)$  - температура, котра мала б місце при підведенні тепла з торця плити, що має повну теплоізоляцію бічних напівплощин (розраховується за формулою (1) з заміною  $x$  на  $y$ );  $t_0$  - початкова температура.

3.2. Прогрів плити в умовах "стандартної" пожежі

Задача 1. Плита перекриття товщиною 200 мм виготовлена із бетону на гранітному щебені, густина якого  $2220 \text{ кг/м}^3$ . Плита нагрівається з одного боку в умовах "стандартної" пожежі.

Визначити температуру плити на глибині закладення арматури 3 см через 1 годину теплового впливу. Чи безпечна ситуація, якщо критична температура арматури становить  $450^\circ\text{C}$ ?

$$\delta = 200 \text{ мм}; \quad x = 3 \text{ см}; \quad t_0 = 20^\circ\text{C}; \quad t_{кр} = 450^\circ\text{C}; \quad \tau = 1,0 \text{ год}; \quad \rho = 2220 \text{ кг/м}^3$$

-----  
 $t_{x,\tau} - ?$

1) Розрахуємо середню температуру плити. Для цього

1.1) визначимо максимальну температуру газового середовища за час розгляду

$$t_f = 345 \cdot \lg(8 \cdot \tau + 1) = 345 \cdot \lg(8 \cdot 1 \cdot 60 + 1) = 925^\circ\text{C};$$

1.2) визначимо максимальну температуру поверхні плити

$$t_w = 0.2 \cdot t_f + 0.00065 \cdot t_f^2 + t_0 = 0.2 \cdot 925 + 0.00065 \cdot 925^2 + 20 = 761^\circ\text{C};$$

1.3) визначимо середню температуру плити, беручи в якості початкової температури  $t_{x,\tau}^{(0)} = 400^\circ\text{C}$ .

$$t_{\text{ср}}^{(0)} = \frac{\frac{t_w + t_0}{2} + \frac{t_{x,\tau}^{(0)} + t_0}{2}}{2} = \frac{\frac{t_w + t_{x,\tau}^{(0)}}{2} + t_0}{2} = \frac{\frac{761 + 400}{2} + 20}{2} = 300^\circ\text{C}$$

2) Визначимо фізичні параметри плити (по довіднику - бетон на гранітному щебені)

Дошки викликається курсант (слухач)



$$\lambda^{(0)} = 1,42 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\text{сер}}^{(0)} = 1,42 \cdot 10^{-4} \cdot 300 = 1,09 \text{ Вт/(м К)};$$

$$c^{(0)} = 0,77 + 6,3 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\text{сер}}^{(0)} = 0,77 + 6,3 \cdot 10^{-4} \cdot 300 = 0,96 \text{ Дж/(кг К)};$$

$$a^{(0)} = 3,6 \cdot \lambda^{(0)} / (\rho \cdot c^{(0)}) = 3,6 \cdot 1,09 / (2220 \cdot 0,96) = 1,84 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{год}.$$

3) Розрахуємо коефіцієнт  $k$ , що залежить від густини матеріалу,

$$k = 0,5 \cdot (1 + \rho \cdot 10^{-4}) = 0,5 \cdot (1 + 2220 \cdot 10^{-4}) = 0,61.$$

4) Розрахуємо аргумент функції Крампа для повної товщини

$$A_{\text{max}}^{(0)} = \frac{\delta + k \sqrt{a^{(0)}}}{2 \sqrt{a^{(0)}} \cdot \tau} = \frac{\frac{\delta}{\sqrt{a^{(0)}}} + k \cdot \frac{0,2}{\sqrt{0,00184}} + 0,61 \cdot}{2 \sqrt{1}} = 2,6 > 0,6$$

До дошки  
викликається  
курсант  
(слухач)

5) Розраховуємо аргумент функції Крампа

$$A^{(0)} = \frac{x + k \cdot \sqrt{a^{(0)}}}{2 \sqrt{a^{(0)}} \tau} = \frac{\frac{x}{\sqrt{a^{(0)}}} + k}{2 \sqrt{1}} = \frac{\frac{0,03}{\sqrt{0,00184}} + 0,61}{2 \sqrt{1}} = 0,655$$

4) По таблиці знаходимо значення функції Крампа

$$\begin{aligned} \text{erf}(A^{(0)}) &= \text{erf}(0,655) \approx \text{erf}(0,64) + (0,655 - 0,64) \frac{\text{erf}(0,66) - \text{erf}(0,64)}{0,66 - 0,64} = \\ &= 0,6346 + 0,015 \frac{0,6494 - 0,6346}{0,02} = 0,646 \end{aligned}$$

5) Шукана температура в першому наближенні

$$t_{x,\tau}^{(1)} = 1250 - (1250 - t_0) \cdot \text{erf}(A^{(0)}) = 1250 - (1250 - 20) \cdot 0,646 = 455^\circ\text{C}.$$

6) Оцінимо середню температуру у першому наближенні.

$$t_{\text{сеп}}^{(1)} = \frac{\frac{t_w + t_{x,\tau}^{(1)}}{2} + t_0}{2} = \frac{\frac{761 + 455}{2} + 20}{2} = 314^{\circ}\text{C}$$

7) Порівняємо відносне розходження наближень:

$$\left| \frac{t_{\text{сеп}}^{(1)} - t_{\text{сеп}}^{(0)}}{t_{\text{сеп}}^{(1)}} \right| = \frac{314 - 300}{314} = 0.04 < 0.10$$

Через досягнення 10% межі, можна припиняємо розрахунки.

Таким чином температура арматури з точністю 4% становитиме  $455^{\circ}\text{C} > t_{\text{кр}} = 450^{\circ}\text{C}$ , таким чином **ситуація небезпечна**.

Курсанти (слухачі) роблять висновок про небезпеку.

3.3. Прогрів балки в умовах "стандартної пожежі"

Задача 2. Залізобетонна балка, переріз якої представлено на рисунку., нагрівається в умовах "стандартної пожежі". Балку виготовлено з бетону з гранітним заповнювачем. Початкова температура балки  $20^{\circ}\text{C}$ . Товщина балки 2R дорівнює 10 см. Глибина залягання арматури  $\delta_y = 3$  см. Визначити температуру арматури через 1 годину теплового впливу. Зробити висновок о можливості руйнування, якщо критична температура арматури становить  $450^{\circ}\text{C}$ .

$$x = 0; R = 5 \text{ см}; y = \delta_y = 3 \text{ см}; t_0 = 20^{\circ}\text{C}; t_{\text{кр}} = 450^{\circ}\text{C}; \tau = 1,0 \text{ год}$$

$$t_{x,y,\tau} - ?$$

1) Розрахуємо середню температуру балки. Для цього

1.1) визначимо максимальну температуру газового середовища за час розгляду

$$t_f = 345 * \lg(8 * \tau + 1) = 345 * \lg(8 * 1 * 60 + 1) = 925^{\circ}\text{C};$$

1.2) визначимо максимальну температуру поверхні балки

$$t_w = 0.2 * t_f + 0.00065 * t_f^2 + t_0 = 0.2 * 925 + 0.00065 * 925^2 + 20 = 761^{\circ}\text{C};$$

1.3) визначимо середню температуру балки, беручи в якості початкової температури  $t_{x,\tau}^{(0)} = 700^{\circ}\text{C}$ .

Дошки викликається курсант (слухач)

$$t_{\text{сер}}^{(0)} = \frac{\frac{t_w + t_0}{2} + \frac{t_{x,\tau}^{(0)} + t_0}{2}}{2} = \frac{\frac{t_w + t_{x,\tau}^{(0)}}{2} + t_0}{2} = \frac{\frac{761 + 700}{2} + 20}{2} = 375^\circ \text{C}$$

2) Визначимо фізичні параметри плити (по довіднику - бетон на гранітному щебені)  
 $\rho = 2220 \text{ кг/м}^3$ ;

$$\lambda^{(0)} = 1,42 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\text{сер}}^{(0)} = 1,42 \cdot 10^{-4} \cdot 375 = 1,01 \text{ Вт/(м К)};$$

$$c^{(0)} = 0,77 + 6,3 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\text{сер}}^{(0)} = 0,77 + 6,3 \cdot 10^{-4} \cdot 375 = 1,01 \text{ Дж/(кг К)};$$

$$a^{(0)} = 3,6 \cdot \lambda^{(0)} / (\rho \cdot c^{(0)}) = 3,6 \cdot 1,01 / (2220 \cdot 1,01) = 1,62 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{год}.$$

3) Розрахуємо коефіцієнт  $k$ , що залежить від густини матеріалу,

$$k = 0,5 \cdot (1 + \rho \cdot 10^{-4}) = 0,5 \cdot (1 + 2220 \cdot 10^{-4}) = 0,61.$$

Стінка балки нагрівається з трьох боків, причому висота балки велика у порівнянні з її шириною. В цьому випадку розрахунок температури  $t_{y,\tau}$  у балці у напрямку осі  $y$  можна вести по рівнянню для полуобмеженого тіла (1), а температури  $t_{x,\tau}$  у напрямку осі  $x$  – по рівнянню про симетричний нагрів плоскої стінки

(4). Шукана температура  $t_{x,y,\tau}$  задовольнятиме рівнянню (5)

$$\frac{1250 - t_{x,y,\tau}}{1250 - t_0} = \frac{1250 - t_{x,\tau}}{1250 - t_0} \cdot \frac{1250 - t_{y,\tau}}{1250 - t_0}$$

4) Розраховуємо аргумент функції Крампа для прогріву у напрямку вісі  $y$

$$A_y^{(0)} = \frac{\delta_y + k \cdot \sqrt{a^{(0)}}}{2\sqrt{a^{(0)}}\tau} = \frac{\frac{\delta_y}{\sqrt{a^{(0)}}} + k}{2\sqrt{\tau}} = \frac{\frac{0,03}{\sqrt{0,00162}} + 0,61}{2\sqrt{1}} = 0,678$$

5) По таблиці знаходимо значення функції Крампа

$$\begin{aligned} \operatorname{erf}(A_y^{(0)}) &= \operatorname{erf}(0.678) \approx \operatorname{erf}(0.66) + (0.678 - 0.66) \frac{\operatorname{erf}(0.68) - \operatorname{erf}(0.66)}{0.68 - 0.66} = \\ &= 0.6494 + 0.018 \frac{0.6638 - 0.6494}{0.02} = 0.662 \end{aligned}$$

Таким чином, згідно з (1) безрозмірна температура у напрямку вісі у задовольняє співвідношенню

$$\frac{1250 - t_{y,\tau}}{1250 - t_0} = \operatorname{erf}\left(A_y^{(0)}\right) = 0.662$$

6) Безрозмірна температура у напрямку осі x згідно з (4) дорівнює

$$\frac{1250 - t_{x,\tau}}{1250 - t_0} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2 \cdot (-1)^{i+1}}{\mu_i} \cos\left(\mu_i \frac{x}{R + k\sqrt{a}}\right) \exp\left(-\mu_i^2 \cdot \frac{a \cdot \tau}{(R + k\sqrt{a})^2}\right),$$

де

$$\mu_i \equiv (2i - 1) \cdot \frac{\pi}{2}.$$

Для середини (x=0) при прийнятті тільки першого складового ряду отримаємо

$$\frac{1250 - t_{x,\tau}}{1250 - t_0} = \frac{2 \cdot 2}{3.14} \exp\left(-\frac{3.14^2}{4} \cdot \frac{0.00162 \cdot 1}{(0.05 + 0.61 \cdot \sqrt{0.00162})^2}\right) = 1.27 \cdot \exp(-0.718) = 0.619.$$

7) Спираючись на (5), розрахуємо шукану температуру в першому наближенні

$$t_{x,y,\tau}^{(1)} = 1250 - (1250 - t_0) \frac{1250 - t_{x,\tau}}{1250 - t_0} \cdot \frac{1250 - t_{y,\tau}}{1250 - t_0} = 1250 - (1250 - 20) \cdot 0.619 \cdot 0.662 = 746^\circ \text{C}.$$

8) Оцінимо середню температуру у першому наближенні.

$$t_{\text{ср}}^{(1)} = \frac{\frac{t_w + t_{x,\tau}^{(1)}}{2} + t_0}{2} = \frac{\frac{761 + 746}{2} + 20}{2} = 387^\circ \text{C}$$

До дошки  
викликається  
курсант  
(слухач)

	<p>9) Порівняємо відносне розходження наближень:</p> $\left  \frac{t_{\text{сер}}^{(1)} - t_{\text{сер}}^{(0)}}{t_{\text{сер}}^{(1)}} \right  = \frac{387 - 375}{387} = 0.03 < 0.10$ <p>Через досягнення 10% межі, можна припиняємо розрахунки.  Таким чином температура арматури з точністю 3% становитиме <math>746^{\circ}\text{C} &gt; t_{\text{кр}} = 450^{\circ}\text{C}</math>, таким чином <b>ситуація небезпечна</b>.</p>	<p>Курсанти (слухачі) роблять висновок про небезпеку.</p>
<p>4. Підведення підсумків ПЗ та завдання на СП</p>	<p>Оцінюється робота, оцінки повідомляються та виставляються до журналу групи.</p> <p>Завдання на СП:</p> <p>10) Дорахувати та оформити задачі.</p> <p>11) Повторити тему "Нестационарна теплопровідність" по посібнику Рябова І.Б., Сайчук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі. -Харків: АПБУ, 2002. (Глава 13 С.296-314).</p> <p>3) Підготуватися до лабораторної роботи "Визначення нестационарного температурного поля в процесі прогрівання бетонної плити".</p>	