



ТЕОРІЯ ТЕПЛО- та МАСОПЕРЕНОСУ В МАТЕРІАЛАХ

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізитивна навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Перший (бакалаврський)</i>
Галузь знань	<i>13 Механічна інженерія</i>
Спеціальність	<i>132 Матеріалознавство</i>
Освітня програма	<i>Нанотехнологія та комп'ютерний дизайн матеріалів</i>
Статус дисципліни	<i>Нормативна</i>
Форма навчання	<i>очна(денна)/дистанційна/змішана</i>
Рік підготовки, семестр	<i>2 курс, весняний семестр</i>
Обсяг дисципліни	<i>3 кредити/90 годин: лекцій – 36 год, практичних занять – 18 год; СРС – 36 год.</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>Залік/МКР</i>
Розклад занять	<i>http://rozklad.kpi.ua/</i>
Мова викладання	<i>Українська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	<i>Лектор: д. т. н., доцент, Міницький Анатолій Вячеславович, mail:aminitzky@gmail.com Практичні: к.х. н., ст.викладач, Шемет Володимир Жданович, lvolodymyrshemet@gmail.com, 096 203 8746</i>
Розміщення курсу	<i>https://classroom.google.com</i>

Програма навчальної дисципліни

1. Опис навчальної дисципліни, її мета, предмет вивчення та результати навчання

Виробництво металів та матеріалів, яке лежить в основі сучасної техніки зв'язане з проходженням високотемпературних дуже енергомістких процесів. Розвиток цих галузей завжди зв'язано з вдосконаленням існуючих або впровадженням нових теплотехнічних процесів, використання вторинних енергоресурсів, охорони навколишнього середовища та ін. Задовольнити вимогам і провести процес за оптимальних параметрів можливо тільки знаючи особливості поведінки кожного компоненту матеріалу в різних умовах процесу. Ці особливості допомагає розкрити теорія тепло– та масопереносу, яка на основі фізико-хімічних і теплотехнічних законів та методів дозволяє проаналізувати найважливіші стадії процесів, що відбуваються при одержанні та подальшому переробленні матеріалів.

90 годин обсягу дисципліни “Теорія тепло-та масопереносу в матеріалах” включають 36 годин лекційних занять, 18 годин практичних занять і 36 годин СРС.

Метою навчальної дисципліни є одержання теоретичних і практичних знань про процеси тепломасопереносу, зокрема при спікання матеріалів, вирощуванні монокристалів, нанесення захисних покриттів на металічні і керамічні матеріали та формування у студентів здатностей: КЗ 2, КЗ 4, КС 9, ПРН 12,26

Теорія тепло-масопереносу в матеріалах

- Здатність застосування знань у практичних ситуаціях
- Здатність виявляти, ставити ті вирішувати проблеми
- Застосовувати сучасні методи математичного та фізичного моделювання, дослідження структури, фізичних, механічних, функціональних та технологічних властивостей матеріалів для вирішення матеріалознавчих проблем.

А також:

- використовувати основні закони переносу теплоти для аналізу процесів, що відбуваються в матеріалах при їх використанні;
- використовувати математичний опис для розрахунків основних характеристик процесів теплообміну і масопередачі, конструктивних характеристик та теплових режимів роботи установок

Предмет дисципліни “Теорія тепло та масопереносу в матеріалах” – вивчення процесів теплопередачі і масообміну в матеріалах (сплавах, композитах, монокристалах і покриттях), що відбуваються при їх експлуатації та технології виготовлення.

Програмні результати навчання:

- Знати інженерні дисципліни, що лежать в основі спеціальності, на рівні, необхідному для досягнення інших результатів програми, в тому числі мати певну обізнаність і їх останніх досягненнях.
- Знання основних технологій виготовлення, оброблення, випробування матеріалів та умов їх застосування.

А також:

- формування вмінь та набуття досвіду експериментального дослідження процесів тепломасопереносу в матеріалах;
- розуміння природи і механізму передачі тепла і масопереносу в твердих тілах;
- знання з теорії точкових дефектів в металевих і оксидних системах;
- розуміння механізмів дифузії в кристалічних тілах, а також механізмів очищення металів і сплавів від шкідливих домішок.

2. Пререквізити та постреквізити дисципліни (місце в структурно-логічній схемі навчання за відповідною освітньою програмою)

Дисципліни, знання з яких необхідні для вивчення дисципліни “Теорія тепло- та масопереносу в матеріалах”:

- Фізика
- Хімія
- Фізична хімія
- Кристалографія, кристалохімія та мінералогія.

Знання, що студент отримує під час вивчення дисципліни «Теорія тепло- та масопереносу в матеріалах» необхідні для поглибленого вивчення таких нормативних дисциплін:

- Фізика конденсованого стану матеріалів
- Матеріалознавство тугоплавких матеріалів

3. Зміст навчальної дисципліни

Вступ. Організація очного/дистанційного навчання.

Розділ 1. Основні положення теорії тепло-масообміну.

Розділ 2. Конвективний теплообмін. Теорія подібності.

Теорія тепло-масопереносу в матеріалах

Розділ 3. Процеси масообміну в однокомпонентному і в багатоконпонентному середовищі.

Розділ 4. Вирощування монокристалів

4. Навчальні матеріали та ресурси

Базові:

1. Теорія тепло-та масопереносу в матеріалах [Електронний ресурс] : презентація лекцій / уклад. В. Ж. Шемет. – Електронні текстові дані (10 файл: 42 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020.
2. Беляєв Н. М. Основи теплопередачі / Н. М. Беляєв. – Київ : Вища школа, 1989. – 343 с.
3. Константинов С. М. Теплообмін : підручник / С. М. Константинов. – Київ : ВПІ ВПК "Політехніка" : Інрес, 2005. – 304 с.
4. Погорелов А. І. Тепломасообмін / А. І. Погорело. – Львів : «Новий Світ-2000», 2006. – 140 с.

Додаткові:

5. Капинос В. М. Процессы теплообмена в примерах и задачах : учебное пособие / В. М. Капинос, В. М. Кошельник, В. В. Навроцкий. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2007. – 192 с.
6. Цветков Ф. Ф. Тепломассообмен : учебное пособие для вузов / Ф. Ф. Цветков, Б. А. Григорьев. – Москва : Изд-во МЭИ, 2005. – 550 с.
7. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – Москва : Энергия, 1973. – 320 с.

Джерела зазначені у списку додаткових навчальних матеріалів знаходяться у бібліотеці НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського і надаються для ознайомлення і глибокого розуміння природи процесів теплопередачі і масообміну, що відбуваються при одержанні та подальшому переробленні матеріалів.

Навчальний контент

9. Методика опанування навчальної дисципліни(освітнього компонента)

Заняття 1. Вступ. Організація очного/дистанційного навчання. Проведення лекційних і практичних занять. Рейтингова система оцінювання. Загальні відомості про процеси теплопровідності та масопереносу в сучасній енергетиці, авіації та ракетобудуванні. Приклади застосування. Паливні елементи. Термобарерні покриття в авіаційних і стаціонарних турбінах. Тепловий захист космічних апаратів і теплозахисні покриття в реактивних двигунах що працюють на твердому паливі.

Розділ 1. Основні положення теорії тепло-масообміну

Заняття 2. Стаціонарна теплопровідність. Основні положення теплопровідності. Температурне поле. Температурний градієнт. Тепловий потік. Щільність теплового потоку. Закон Фур'є, коефіцієнт теплопровідності. Дифференціальне рівняння теплопровідності. Граничні умови задач теплопровідності. Закон Ньютона – Ріхмана.

Література [1]-[3].

Заняття 3. Температурне поле в плоскій стінці. Термічний опір стінки. Рівняння температурного поля. Безрозмірний температурний натиск. Теплопровідність через

Теорія тепло-масопереносу в матеріалах

багатошарову стінку та еквівалентний коефіцієнт теплопровідності стінки. Термічним опором теплопровідності багатошарової стінки. Передача тепла при граничних умовах третього роду (теплопередача). Коефіцієнт теплопередачі. Термічний опір теплопровідності, тепловіддачі та теплопередачі. Граничні умови другого і третього роду.

Література. [1]-[5].

Заняття 4. Теплопровідність і теплопередача через циліндричну стінку. Лінійний термічний опір та лінійний коефіцієнт теплопередачі. Теплопередача в багатошаровій циліндричній і сферичній стінках. Теплопровідність плоскої стінки при наявності внутрішніх джерел тепла. Температурне поле в плоскій стінці при наявності тепловиділень. Симетричні умови відводу теплоти від пластини.

Література. [1]-[6].

Заняття 5. Радіаційний (променевий) теплообмін. Теплове випромінювання. Закон Стефана – Больцмана. Баланс енергії на поверхні. Теплообмін випромінюванням. Обсолютне чорне тіло. Закон Кіргофа. Рівняння Віна. Рівняння Планка. Закон Релея – Джинса. Закон Ламберта. Куткові коефіцієнти випромінювання. Оптичний пірометр принцип роботи. Вимірювання температури за допомогою оптичного пірометра. Локальний і середній коефіцієнти випромінювання.

Література. [1]-[7].

Розділ 2. Конвективний теплообмін

Заняття 6. Інтенсифікація процесу теплопередачі. Інтенсифікація теплопередачі за рахунок збільшення коефіцієнтів тепловіддачі. Інтенсифікація теплопередачі за рахунок того, що поверхня має ребра. Розрахунок теплопередачі через циліндричну стінку, що має ребра. Види ребристих поверхонь. Спрощений розрахунок теплопередачі через стінку з ребрами.

Література. [1]-[6].

Заняття 7. Диференціальні рівняння конвективного теплообміну. Нестационарний теплообмін. Коефіцієнт тепловіддачі. Вимушена і природна конвекція. Фізичні властивості рідини і газів. Кінематична і динамічна в'язкість. Температурний коефіцієнт об'ємного розширення. Коефіцієнтом стиснення. Гідродинамічний і тепловий пограничні шари. Диференціальні рівняння конвективного теплообміну для нестискаючої рідини. Умови однозначності. Приклад системи диференціальних рівнянь конвективного теплообміну.

Література. [1]-[6].

Заняття 8. Теорія подібності як теоретична основа експериментального вивчення конвективного теплообміну. Подібні та аналогічні процеси. Теорема Кирпичева – Гухмана. Критеріальні рівняння.

Заняття 9. Критерії подібності. Критерії Нуссельта, Прандтля, Пекле, Рейнольдса, Грасгофа, Ейлера. Критерій Фур'є і число Біо. Вимушена конвекція і критерії, що її характеризують. Залежить тепловіддачі від режимів течії рідини. Рішення диференціального рівняння теплопровідності Фур'є для необмеженого циліндра при граничних умовах III роду.

Література. [1], [7].

Розділ 3. Процеси масообміну в однокомпонентному і в багатокомпонентному середовищі.

Заняття 10. Масообмін. Дифузія в бінарній системі. Рівняння Фіка. Дифузія в твердих тілах. Дефекти кристалічної ґратки. Точкові дефекти. Вакансії і міжвузля в кристалічній ґратці. Дефекти по Френкелю і Шотткі. Механізм дифузії в оксидах металів. Диференціальні рівняння масопереносу в процесі високотемпературного окислення сплавів. Процеси дифузії в термобарерних і захистних покриттях на сплавах при високій температурі.

Література: [1], [7], [9]

Теорія тепло-масопереносу в матеріалах

Заняття 11. Вологість. Парціальний тиск компонентів у газовій суміші. Абсолютна і відносна вологість газу. Тиск насиченого пару. Вміст вологи. Точка роси. Ентальпія вологого газу. Потрійна аналогія. Число Льюїса і дифузійні критерії подібності (Нуссельта і Прандтля). Конвективний масообмін.

Література. [3]

Заняття 12. Кристалізаційні процеси. Діаграми стану. Ліквідус і солідус. Розчинність домішки в рідкій і твердій фазах. Очищення металів і сплавів. Рівноважний і ефективний коефіцієнти розподілу. Очищення речовин сублимацією і дистиляцією. Залежність складу пара від складу розчину і загального тиску в системі.

Література. [2].

Заняття 13. Очищення речовин за допомогою хімічних транспортних реакцій. Очищення кремнію. Ендотермічні оборотні реакції. Очищення титану. Очищення за рахунок утворення сполук зниженою валентності. Очищення алюмінію, германію та кремнію. Очищення сполук за рахунок термічної дисоціації летучих з'єднань. Очищення цирконію і германію.

Література. [2].

Заняття 14. Модульна контрольна робота (зразок завдання у Додатку А).

Розділ 4. Вирощування монокристалів

Заняття 15. Методи вирощування монокристалів. Вирощування монокристалів з стехіометричних розплавів розчинів і газової фази. Діаграми температура – розчинність ($T - c$). Вплив гідродинамічних умов на кінетику кристалізації. Масоперенос при вирощуванні монокристалів. Метод Бріджмена-Стокбаргера, Чалмерса. Метод Наккена.

Література. [2].

Заняття 16. Метод Чохральського та Кіропулоса. Теплові умови вирощування монокристалів. Технологічні параметри, що впливають на швидкість витягу монокристалів з розплаву і розчину. Залежність щільності дислокацій від градієнта температури. Методи зонної і спрямованої кристалізації. Вирощування монокристалічних лопаток для авіаційних істаціонарних турбін за методом Бріджмена.

Література. [1]-[2].

Заняття 17. Вирощування монокристалів по безтігельному методу Вернейла. Очищення металів і сплавів методом зонної кристалізації. Теорія зонної очистки Пфанна. Гідротермальний синтез і вирощування кристалів. Масоперенос при гідротермальному методі вирощування монокристалів.

Література. [1]-[8].

Заняття 18. Залік

Для виконання практичних робіт потрібні знання теоретичних основ процесів тепло-масопереносу набуті студентами під час вивчення дисципліни "Теорія тепло- масопереносу в матеріалах". Під час практичних занять студенти вирішують практичні задачі які наведені в збірнику задач [5]

Заняття 1. Основні положення теорії теплопередачі.

Заняття 2. Вправи для розрахункових завдань по теплопровідності і теплопередачі.

Заняття 3. Розрахункові задачі по теплопередачі з урахування радіаційного випромінювання і внутрішніх джерел тепла.

Заняття 4. Конвективний теплообмін і методи інтенсифікації процесу теплопередачі.

Теорія тепло-масопереносу в матеріалах

Заняття 5. Нестационарний теплообмін приклади рішення задач.

Заняття 6. Тест з розділу теплоперенесення.

Заняття 7. Теорія подібності. Вирішення інженерних задач з використанням теорії подібності.

Заняття 8. Дифузія в твердих тілах. Приклади задач по розрахунку константи швидкості високотемпературного окислення металів.

Заняття 9. Вирощування монокристалів. Розрахунок швидкості витягування монокристала з розчину.

10. Самостійна робота студента/аспіранта

Самостійна робота студента (36 годин.) складається з:

- підготовки до лекцій – 18 год, з яких 4 год відводиться на самостійну підготовку теми «Теорія подібності»;
- підготовки до практичних робіт – 8 год;
- підготовки до МКР – 4 год;
- підготовки до заліку – 6 год.

Політика та контроль

11. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Правила відвідування занять.

Відвідування лекційних занять є бажаним, хоча і не обов'язковим. Відвідування лекційних занять дозволить студентам не тільки опанувати знання безпосередньо на лекції, але і задати викладачу питання, що виникають під час викладання матеріалу лекції.

Відвідування практичних занять є обов'язковим.

Правила поведінки на заняттях.

На усіх заняттях, лекційних і практичних, вітається відключення звукових сигналів телефонів.

На практичних заняттях не забороняється користування конспектами лекцій, підручниками, електронними гаджетами для пошуку інформації, що відповідає темі практичного заняття.

За умови проведення практичних занять у дистанційному режимі завдання студентам завантажуються на сторінці в ТЕЛЕГРАМ, а відповіді надсилаються викладачу на електронну пошту.

Перескладання МКР проводиться за взаємною домовленістю студентів і викладача.

Перескладання заліку проводиться під час додаткової сесії за положенням НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» відповідно до графіку перескладань оприлюдненому на сайті ІМЗ ім. Є. О. Патона.

Усі учасники освітнього процесу: викладачі і здобувачі в процесі вивчення дисципліни мають керуватись принципами академічної доброчесності, передбаченими «Кодексом честі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»» <https://kpi.ua/code>.

12. Види контролю та рейтингова система оцінювання результатів навчання (PCO)

- **Поточний контроль:** практичні роботи, тест, модульна контрольна робота
- **Календарний контроль:** проводиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог силябусу.
- **Семестровий контроль:** залік

Теорія тепло-масопереносу в матеріалах

Кожний вид робіт оцінюється за 100-бальною шкалою. Коефіцієнти вагомості наведено у формулі

$$O_{\text{семестр}} = 0,7 \sum O_{\text{ПР}} + 0,2 O_{\text{МКР}} + 0,1 O_{\text{СРС}}$$

12.2. Критерії нарахування балів.

Модульна контрольна робота.

Робота складається із двох теоретичних питань і однієї практичної задачі. Максимально оцінюється у 100 балів із ваговим коефіцієнтом 0,2.

Практичні заняття.

На практичних заняттях розглядаються теоретичні засади відповідної теми і розглядається методика розрахунку конкретних задач.

Упродовж семестру студенти пишуть один тест.

Тест оцінюється у 100 балів.

Кількість завдань визначається в залежності від теми практичної роботи і її складності, кількості годин, що відводяться на виконання роботи і оголошується викладачем на початку заняття.

Ваговий коефіцієнт оцінювання результатів тесту складає 0,7.

Самостійна робота студента.

Тема, що виноситься для самостійного опрацювання оцінюється у 100 балів з ваговим коефіцієнтом 0,1. Повнота розкриття теми впливає на кількість нарахованих балів.

Календарний контроль.

Календарний контроль проводиться на 7-8 та 14-15 тижнях семестру навчання. Для позитивного оцінювання 1-го календарного контролю студенту необхідно отримати мінімум 35 балів за практичні роботи №1 і №2, тобто $0,7 \cdot (50 \text{ бал} + 50 \text{ бал}) / 2$. Для позитивного оцінювання 2-го календарного контролю студенту необхідно отримати мінімум 35 балів за практичні роботи №3 і №4 і 10 балів за МКР, тобто $0,7 \cdot (50 \text{ бал} + 50 \text{ бал}) / 2 + 0,2 \cdot 50 \text{ бал} = 45 \text{ балів}$.

Залік.

Умовою допуску до заліку є виконання усіх тестів, модульних контрольних робіт і завдання із самостійної роботи студента.

Стартовий рейтинг має скласти не менше 60 балів, відповідно:

Практичні заняття – 42 бали;

МКР – 10 балів;

СРС – 8 балів.

Студенти, що набрали упродовж семестру не менше 60 балів мають можливість отримати оцінку, згідно таблиці відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою.

Для підвищення рейтингової оцінки студент може написати залікову контрольну роботу, але у цьому випадку попередній рейтинг студента скасовується і він отримує оцінку з урахуванням результатів залікової контрольної роботи, згідно таблиці відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою.

Теорія тепло-масопереносу в матеріалах

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою:

<i>Кількість балів</i>	<i>Оцінка</i>
100-95	Відмінно
94-85	Дуже добре
84-75	Добре
74-65	Задовільно
64-60	Достатньо
Менше 60	Незадовільно
Не виконані умови допуску	Не допущено

Кожне завдання залікової контрольної роботи містить три теоретичних запитання і дві задачі, які виконувались на практичних роботах, приклад завдання для залікової контрольної наведено у Додатку А. Перелік запитань, що виносяться на модульну і залікову контрольні роботи наведений у Додатку Б. Залікова і модульна контрольні роботи проводиться письмово. На підготовку відповідей на запитання завдання залікової контрольної роботи виділяється 1 академічна година часу.

Сумарна максимальна оцінка складає 100 балів, відповідно:

- Максимальна оцінка за правильну відповідь на кожне теоретичне питання складає 20 балів.
- Максимальна оцінка за правильно розв'язане практичне завдання – 20 балів.

Оцінка за відповідь знижується по кожному з питань – за принципові помилки у відповіді на 20-15 балів, за неповну відповідь на 15-10 балів, за неправильне використання термінів на 5 балів.

9. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)

- перелік питань, які виносяться на залікову контрольну роботу наведено у додатку Б;

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

Складено доц. д.т.н., Мініцьким Анатолієм Вячеславовичем

ст. викладачем, к. х. н., Шеметом Володимиром Ждановичем

Ухвалено кафедрою ВТМ та ПМ (протокол № 21 від 8 липня 2022 р.)

Погоджено Методичною комісією НН ІМЗ ім. Є. О. Патона (протокол № 10/22 від 10 липня 2022 р.)

Приклад завдання модульної контрольної роботи

1. Універсальне рішення диференціального рівняння теплопровідності в критеріальній формі
2. Запишіть рівняння для теплового потоку при вимушеній конвекції.
3. Стіна печі складена з цегли завтовшки 25 см, коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 1.7 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$. При роботі печі в стаціонарних умовах температура на зовнішній $T_2 = 1050 \text{ К}$. Ступінь чорноти $\varepsilon = 0.8$. Температура навколишнього середовища 25°C , коефіцієнт тепловіддачі $\alpha = 40 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Чому дорівнює температура на внутрішній поверхні стіни при стаціонарному протіканні процесу з урахуванням випромінювання?

Приклад завдання залікової контрольної роботи

1. Запишіть розподіл температури в однорідній тонкій плоскій стінці в безрозмірному вигляді.
2. Сформулюйте закон Стефана - Больцмана.
3. Дайте визначення і запишіть одиниці виміру коефіцієнта теплопередачі, термічних опорів теплопровідності, тепловіддачі, теплопередачі.
4. Температура на зовнішній поверхні цегляної стіни дорівнює 80°C . Товщина стіни 15 см, коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 1.2 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$, ступінь чорноти $\varepsilon = 0.8$. Температура навколишнього середовища 25°C , коефіцієнт тепловіддачі $\alpha = 20 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Чому дорівнює температура на внутрішній поверхні стіни при стаціонарному протіканні процесу з урахуванням випромінювання.
5. Яка дійсна температура тіла, як що пірометр реєструє температуру 1400°C , ступінь чорноти тіла у цьому діапазоні хвиль дорівнює $\varepsilon = 0.6$. В пірометрі використовується червоний фільтр $\lambda = 0.65 \text{ мкм}$.

Додаток Б

Перелік питань, що виносяться на залікову контрольну

4. Запишіть розподіл температури в однорідній тонкій плоскій стінці в безрозмірному вигляді.
5. Перерахуйте режими течії рідин. Яке критеріальне число їх визначає?
6. Сформулюйте закон Стефана - Больцмана.
7. Запишіть розрахункове рівняння конвективного теплообміну в критеріальній формі для випадку ламінарного режиму течії
8. Дайте визначення і запишіть одиниці виміру коефіцієнта теплопередачі, термічних опорів теплопровідності, тепловіддачі, теплопередачі
9. Універсальне рішення диференціального рівняння теплопровідності в критеріальній формі
10. Сформулюйте закон Кірхгофа і слідства з нього.
11. Запишіть рівняння для теплового потоку при вимушеній конвекції.
12. Перерахуйте види куткових коефіцієнтів випромінювання. Що таке абсолютне чорне, сіре і біле тіло.

Теорія тепло-масопереносу в матеріалах

13. Запишіть розподіл температури в однорідній тонкій плоскій стінці в безрозмірному вигляді.
14. Дайте визначення кутового коефіцієнта випромінювання. Що таке локальний і середній коефіцієнти випромінювання.
15. Запишіть диференціальне рівняння теплопровідності Фур'є для тіла циліндричної форми і паралелепіпед.
16. Схематично зобразіть розподіл температури в однорідній плоскій стінці для постійного коефіцієнта теплопровідності що лінійно залежить від температури.
17. Запишіть розрахункове рівняння конвективного теплообміну в критеріальною формі для випадку розвинутого турбулентного режиму течії.
18. Дайте визначення кутового коефіцієнта випромінювання. Що таке локальний і середній коефіцієнти випромінювання.
19. Які основні критерії подібності використовуються для розрахунку теплообміну при вимушеному турбулентному руху середовища.
20. Сформулюйте закон Ламберта.
21. Як і чому залежить тепловіддача від режимів течії рідини?
22. Сформулюйте закон Кірхгофа і слідства з нього.
23. Рішення диференціального рівняння теплопровідності Фур'є для необмеженого циліндра при граничних умовах III роду.
24. Перерахуйте види куткових коефіцієнтів випромінювання. Що таке абсолютне чорне, сіре і біле тіло.
25. Нестационарна теплопровідність. Запишіть диференціальне рівняння теплопровідності для паралелепіпед, циліндра і шару.
26. Запишіть розподіл температури в однорідній тонкій плоскій стінці в безрозмірному вигляді.
27. Дайте визначення гідродинамічного і температурного прикордонних шарів.
28. Чому потрібні крайові умови при рішенні диференціальних рівнянь теплопровідності. Що вони значать і їх кількість.
29. Запишіть диференціальне рівняння теплопровідності. Поясніть, чому необхідно доповнювати диференціальні рівняння крайовими умовами
30. Запишіть диференціальне рівняння теплопровідності і його рішення для однорідної тонкої плоскої стінки з постійним коефіцієнтом теплопровідності.
31. Що таке конвективний масообмін. Запишіть рівняння конвективного масообміну. Яка залежність між коефіцієнтами конвективного масообміну β і конвективного теплообміну α .
32. Запишіть розподіл температури в однорідній тонкій плоскій стінці в безрозмірному вигляді.
33. Абсолютна і відносна вологість газу.
34. Дайте визначення і запишіть одиниці виміру коефіцієнта теплопередачі, термічних опорів теплопровідності, тепловіддачі, теплопередачі.
35. Ентальпія вологого газу і чому вона дорівнює .
36. Дифузія в твердих тілах. Коефіцієнт дифузії, його фізичний зміст і розмірність. Запишіть рівняння дифузії. Дефекти кристалічної ґратки.
37. Схематично зобразіть розподіл температури в однорідній плоскій стінці для постійного коефіцієнта теплопровідності що лінійно залежить від температури.
38. Як і чому залежить тепловіддача від режимів течії рідини?
39. Перерахуйте діапазон значень коефіцієнта електропровідності металів і залежність його від домішок на прикладі міді і срібла.

Теорія тепло-масопереносу в матеріалах

- 40. Нестационарна теплопровідність. Запишіть диференціальне рівняння теплопровідності для паралелепіпеда, циліндра і шару.*
- 41. Дайте визначення і запишіть вираз для розрахунку еквівалентного коефіцієнта теплопровідності багат шарової плоскої стінки.*
- 42. Дайте визначення процесу теплопередачі. Сформулюйте закон Ньютона - Рихмана. Запишіть визначення коефіцієнта тепловіддачі.*
- 43. Точка роси. Вміст вологості в газі. Як розрахувати вміст вологості.*
- 44. Запишіть розрахункове рівняння конвективного теплообміну в критеріальній формі для випадку розвинутого турбулентного режиму течії.*
- 45. Запишіть вираз для визначення теплового потоку через багат шарову плоску стінку в процесі теплопередачі. Запишіть вираз для визначення температури в площині дотику довільних шарів.*