



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

УТВЕРЖДАЮ  
Директор Филиала в г. Белорецк  
Д.Р. Хамзина  
18.02.2020 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

**ТЕПЛОФИЗИКА**

Направление подготовки (специальность)  
22.03.02 МЕТАЛЛУРГИЯ

Направленность (профиль/специализация) программы  
Обработка металлов и сплавов давлением (метизное производство)

Уровень высшего образования - бакалавриат  
Программа подготовки - академический бакалавриат

Форма обучения  
очная

|                     |                              |
|---------------------|------------------------------|
| Институт/ факультет | Филиал в г. Белорецк         |
| Кафедра             | Металлургии и стандартизации |
| Курс                | 2                            |
| Семестр             | 4                            |

Магнитогорск  
2020 год

Рабочая программа составлена на основе ФГОС ВО по направлению подготовки 22.03.02 МЕТАЛЛУРГИЯ (уровень бакалавриата) (приказ Минобрнауки России от 04.12.2015 г. № 1427)

Рабочая программа рассмотрена и одобрена на заседании кафедры Metallургии и стандартизации

10.02.2020, протокол № 6

Зав. кафедрой  С.М. Головизнин

Рабочая программа одобрена методической комиссией Филиал в г. Белорецк

18.02.2020 г. протокол № 6


Председатель  Д.Р. Хамзина

Рабочая программа составлена:

доцент кафедры МиС, канд. техн. наук  С.М. Головизнин

Рецензент:

Нач. исследовательско-технологического  
отдела ,

 Л.Э. Пыхов

## Лист актуализации рабочей программы

---

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2021 - 2022 учебном году на заседании кафедры **Металлургии и стандартизации**

Протокол от \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_  
Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ С.М. Головизнин

---

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2022 - 2023 учебном году на заседании кафедры **Металлургии и стандартизации**

Протокол от \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_  
Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ С.М. Головизнин

---

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2023 - 2024 учебном году на заседании кафедры **Металлургии и стандартизации**

Протокол от \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_  
Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ С.М. Головизнин

---

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2024 - 2025 учебном году на заседании кафедры **Металлургии и стандартизации**

Протокол от \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_  
Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ С.М. Головизнин

### 1 Цели освоения дисциплины (модуля)

Целями изучения дисциплины «Теплофизика» являются:

формирование у обучающихся общекультурных и профессиональных компетенций в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 22.03.02 Metallurgy. В связи с этой целью необходимо:

- изучение фундаментальных законов переноса теплоты, современной теории теплообмена и применение их в тепловых расчетах нагрева и охлаждения тел различной формы с различными теплофизическими свойствами.

Теплофизика (тепло- и массоперенос): явления, законы и уравнения переноса вещества, тепла и импульса; тройная аналогия; применение теории подобия при изучении процессов переноса; постановка и решение задач переноса.

### 2 Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Дисциплина Теплофизика входит в базовую часть учебного плана образовательной программы.

Для изучения дисциплины необходимы знания (умения, владения), сформированные в результате изучения дисциплин/ практик:

Математика

Физика

Физическая химия

Химия

Знания (умения, владения), полученные при изучении данной дисциплины будут необходимы для изучения дисциплин/практик:

Основы металлургического производства

Металлургическая теплотехника

### 3 Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины (модуля) и планируемые результаты обучения

В результате освоения дисциплины (модуля) «Теплофизика» обучающийся должен обладать следующими компетенциями:

| Структурный элемент компетенции  | Планируемые результаты обучения  |
|--|--|
| ПК-4 готовностью использовать основные понятия, законы и модели термодинамики, химической кинетики, переноса тепла и массы |  |
| Знать  | <input type="checkbox"/> основные закономерности процессов переноса тепла и массы<br><input type="checkbox"/> методы решения типовых теплофизических задач<br><input type="checkbox"/> сущность законов и моделей термодинамики, переноса тепла и массы, их взаимосвязь, значение для развития современной техники |

|   |  |
|---|--|
| Уметь   | <input type="checkbox"/> пользоваться таблицами, учебной, справочной и методической литературой, составлять отчеты по выполненным экспериментальным работам, уметь делать выводы.<br><input type="checkbox"/> пользоваться современной научной аппаратурой для проведения теплофизических экспериментов;<br><input type="checkbox"/> строить и анализировать математические модели теплопереноса<br><input type="checkbox"/> применять методы теплофизики для решения задач теоретического, экспериментального и прикладного характера;<br><input type="checkbox"/> описывать, рассчитывать и анализировать процессы переноса тепла и массы, выделять факторы, определяющие их интенсивность |
| Владеть   | <input type="checkbox"/> методами решения типовых задач термодинамики, химической кинетики, переноса тепла и массы;<br><input type="checkbox"/> методами решения типовых задач теплофизики<br><input type="checkbox"/> навыками выполнения теплофизических экспериментов и оценки их результатов. навыками расчета процессов конвективного тепло- и массопереноса, передачи тепла излучением и молекулярной теплопроводностью  |
| ОПК-1      готовностью использовать фундаментальные общеинженерные знания |  |
| Знать   | <input type="checkbox"/> Основные понятия термодинамики, теплофизики<br><input type="checkbox"/> методы решения основных теплофизических задач<br><input type="checkbox"/> сущность законов распространения тепла и массопереноса, их взаимосвязь, значение для развития современной техники   |
| Уметь   | <input type="checkbox"/> пользоваться таблицами, учебной, справочной и методической литературой, составлять отчеты по выполненным экспериментальным работам, уметь делать выводы.<br><input type="checkbox"/> пользоваться современной научной аппаратурой для проведения теплофизических экспериментов;<br><input type="checkbox"/> строить графики экспериментальных зависимостей, анализировать графики зависимостей, полученных в эксперименте;<br><input type="checkbox"/> применять теплофизические законы для решения задач теоретического, экспериментального и прикладного характера  |
| Владеть   | <input type="checkbox"/> методами решения типовых задач теплофизики;<br><input type="checkbox"/> навыками выполнения теплофизических экспериментов и оценки их результатов<br><input type="checkbox"/> практическими навыками решения задач теоретического, экспериментального и прикладного характера   |

#### 4. Структура, объём и содержание дисциплины (модуля)

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетных единиц 108 акад. часов, в том числе:

- контактная работа – 54,15 акад. часов;
- аудиторная – 51 акад. часов;
- внеаудиторная – 3,15 акад. часов
- самостоятельная работа – 18,15 акад. часов;
- подготовка к экзамену – 35,7 акад. часа

Форма аттестации - экзамен

| Раздел/ тема дисциплины   | Семестр | Аудиторная контактная работа (в акад. часах) |           |             | Самостоятельная работа студента | Вид самостоятельной работы                                      | Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации | Код компетенции |
|---|---------|--|-----------|-------------|---------------------------------|---|---|-----------------|
|   |         | Лек.   | лаб. зан. | практ. зан. |                                 |   |   |                 |
| 1. Явления, законы и уравнения переноса вещества, тепла и импульса  |         |  |           |             |                                 |   |   |                 |
| 1.1 Виды переноса теплоты и массы: теплопроводность, конвекция, излучение, диффузия. Постановка и решение задач переноса.   | 4       | 2  | 2         | 2           |                                 | Подготовка к, практическому, лабораторно-практическому занятию. | Устный опрос  | ПК-4, ОПК-1     |
| Итого по разделу  |         | 2  | 2         | 2           |                                 |   |   |                 |
| 2. Теплопроводность   |         |  |           |             |                                 |   |   |                 |
| 2.1 Механизм переноса теплоты теплопроводностью в газах, жидкостях, металлах и неметаллах. Дифференциальные уравнения теплопроводности. Условия однозначности   | 4       | 2  | 2         | 2           |                                 | Подготовка к, практическому, лабораторно-практическому занятию  | Устный опрос  | ПК-4, ОПК-1     |
| 2.2 Теплопроводность при стационарном режиме. Передача теплоты через однослойную и многослойную плоскую стенку при граничных условиях 1 и III рода. Расчет потерь теплоты через стены печей. Расчет толщины изоляции. |         | 2  | 2         | 2           |                                 | Подготовка к, практическому, лабораторно-практическому занятию  | Лабораторные работы   | ПК-4, ОПК-1     |

|  |   |   |   |   |  |  |                     |             |
|--|---|---|---|---|--|--|---------------------|-------------|
| 2.3 Теплопроводность при нестационарном режиме. Основные представления о методах решения задач при нестационарной теплопроводности. Теплопроводность бесконечной пластины и цилиндра. Номограммы Д.В. Будрина.   |   | 2 | 2 | 2 |  | Подготовка к, практическому, лабораторно-практическому занятию | Лабораторные работы | ПК-4, ОПК-1 |
| Итого по разделу   |   | 6 | 6 | 6 |  |  |                     |             |
| 3. Конвективный теплообмен   |   |   |   |   |  |  |                     |             |
| 3.1 Основные положения конвективного теплообмена. Виды конвекции. Режимы движения жидкости. Пограничный слой. Система дифференциальных уравнений конвективного теплообмена: уравнение теплоотдачи, энергии, движения, сплошности. Условия однозначности                | 4 | 2 | 2 | 2 |  | Подготовка к, практическому, лабораторно-практическому занятию | Лабораторные работы | ПК-4, ОПК-1 |
| 3.2 Подobie процессов конвективного теплообмена. Число подобия. Уравнения подобия. Условия подобия физических процессов. Теоремы подобия. Применение теории подобия при изучении процессов переноса.   |   | 1 | 1 | 1 |  | Подготовка к, практическому, лабораторно-практическому занятию | Устный опрос        | ПК-4, ОПК-1 |
| 3.3 Теплоотдача при вынужденном движении жидкости. Теплоотдача при вынужденном продольном обтекании плоской поверхности. Гидродинамический и тепловой пограничные слои, соотношение их толщин. Теплоотдача при ламинарном пограничном и турбулентном пограничном слое. |   | 1 | 1 | 1 |  | Подготовка к, практическому, лабораторно-практическому занятию | Лабораторные работы | ПК-4, ОПК-1 |
| 3.4 Конвективный теплообмен при вынужденном и свободном течении жидкости в трубах и каналах.. Вязкостный и вязкостно-гравитационный режимы течения. Теплоотдача при ламинарном и турбулентном режимах течения.   |   | 1 | 1 | 1 |  | Подготовка к, практическому, лабораторно-практическому занятию | Устный опрос        | ПК-4, ОПК-1 |
| Итого по разделу   |   | 5 | 5 | 5 |  |  |                     |             |
| 4. Радиационный теплообмен   |   |   |   |   |  |  |                     |             |

|   |   |    |    |    |  |  |                                    |             |
|---|---|----|----|----|--|--|------------------------------------|-------------|
| 4.1 Теплообмен излучением. Основные понятия и законы. Природа теплового излучения. Виды лучистых потоков. Законы Планка, Вина, Стефана-Больцмана, Кирхгофа, Ламберта. Понятие о сером излучении.                    | 4 | 2  | 2  | 2  |  | Подготовка к, практическому, лабораторно-практическому занятию | Устный опрос                       | ПК-4, ОПК-1 |
| 4.2 Теплообмен излучением между телами, разделенными прозрачной средой. Теплообмен излучением между телами с плоскопараллельными поверхностями. Теплообмен между телом и охватывающей оболочкой, системы с экранами |   | 1  | 1  | 1  |  | Подготовка к, практическому, лабораторно-практическому занятию | Устный опрос                       | ПК-4, ОПК-1 |
| 4.3 Теплообмен излучением в поглощающей среде. Закон Бугера. Уравнение переноса лучистой энергии. Излучение паров и газов. Понятие о сложном теплообмене. Числа радиационного подобия.                              |   | 1  | 1  | 1  |  | Подготовка к, практическому, лабораторно-практическому занятию | Устный опрос<br>Контрольная работа | ПК-4, ОПК-1 |
| Итого по разделу  |   | 4  | 4  | 4  |  |  |                                    |             |
| Итого за семестр  |   | 17 | 17 | 17 |  |  | экзамен                            |             |
| Итого по дисциплине   |   | 17 | 17 | 17 |  |  | экзамен                            | ПК-4,ОПК-1  |



## **5 Образовательные технологии**

Учитывая цели изучения дисциплины «Теплофизика» и в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 22.03.02 – Metallургия в преподавании предмета используется традиционная технология обучения, включающая в себя слушание объяснения преподавателя (лекции), работу с учебным материалом, выполнение практических действий (практические занятия). Передача необходимых теоретических знаний и формирование основных представлений по курсу «Теплофизика» происходит с использованием мультимедийного оборудования. Технология ориентирована на передачу знаний, умений и навыков и обеспечивает усвоение учащимися содержания обучения, проверку и оценку его качества на репродуктивном уровне.

Наряду с традиционной технологией используется модульно-компетентностная технология. Реализация компетентностного подхода осуществляется использованием в учебном процессе следующих методов:

а) ИТ - применение компьютеров для доступа к Интернет-ресурсам, применение обучающих программ с целью расширения информационного поля, повышения скорости обработки и передачи информации, обеспечения удобства преобразования и структурирования информации для трансформации ее в знание (практические занятия, подготовка к контрольному тестированию);

б) контекстного обучения - мотивация студентов к усвоению знаний путем выявления связей между конкретным знанием и его применением (лабораторные занятия);

в) работа в команде – совместная деятельность студентов в группе под руководством лидера, направленная на решение общей задачи синергичным сложением результатов индивидуальной работы членов команды (лабораторные занятия, расчетно-графические работы).

Самостоятельная работа студентов стимулирует студентов к самостоятельной переработке тем в процессе подготовки к сдаче лабораторных работ и решения домашних практических заданий.

## **6 Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся**

Представлено в приложении 1.

## **7 Оценочные средства для проведения промежуточной аттестации**

Представлены в приложении 2.

## **8 Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)**

### **а) Основная литература:**

1. Арутюнов, В. А. Теплофизика и теплотехника: Теплофизика: Курс лекций : учебное пособие / В. А. Арутюнов, С. А. Крупеников, Г. С. Сборщиков. — Москва : МИСИС, 2010. — 228 с. — ISBN 978-5-87623-358-5 . — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/2083> (дата обращения: 25.09.2020). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

### **б) Дополнительная литература:**

1. Мигранова, С. Г. Теплофизика: теория и практика : учебное пособие / С. Г. Мигранова, О. А. Сарапулов ; МГТУ. - Магнитогорск : МГТУ, 2015. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - Загл. с титул. экрана. - URL: <https://magtu.informsystema.ru/uploader/fileUpload?name=1284.pdf&show=dcatalogues/1/1123481/1284.pdf&view=true> (дата обращения: 14.05.2020). - Макрообъект. - Текст : электронный. - Сведения доступны также на CD-ROM.

2. Матвеев, С. В. Тепломассообмен : учебное пособие [для вузов] / С. В. Матвеев, 070 ; Магнитогорский гос. технический ун-т им. Г. И. Носова. - Магнитогорск : МГТУ им. Г. И. Носова, 2019. - 1 CD-ROM. - ISBN 978-5-9967-1511-4. - Загл. с титул. экрана. - URL : <https://magtu.informsystema.ru/uploader/fileUpload?name=3934.pdf&show=dcatalogues/1/1530507/3934.pdf&view=true> (дата обращения: 14.05.2020). - Макрообъект. - Текст : электронный. - Сведения доступны также на CD-ROM.

2. Матвеева, Г. Н. Экспериментальное исследование процессов теплообмена : учебное пособие / Г. Н. Матвеева, Ю. И. Тартаковский, Б. К. Сеничкин. - 2-е изд., подгот. по печ. изд. 2008 г. - Магнитогорск : МГТУ, 2011. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - Загл. с титул. экрана. - URL:

<https://magtu.informsystema.ru/uploader/fileUpload?name=989.pdf&show=dcatalogues/1/1119153/989.pdf&view=true> (дата обращения: 14.05.2020). - Макрообъект. - Текст : электронный. - Сведения доступны также на CD-ROM.

4. Горохов, А. В. Гидродинамика и теплопередача : практикум / А. В. Горохов ; МГТУ. - Магнитогорск : [МГТУ], 2017. - 59 с. : ил., табл., схемы, граф.- URL: <https://magtu.informsystema.ru/uploader/fileUpload?name=3463.pdf&show=dcatalogues/1/1514268/3463.pdf&view=true> (дата обращения: 14.05.2020). - Макрообъект. - Текст : электронный. - Имеется печатный аналог.

5. Дубровская, Е. Ю. Теплотехника : учебное пособие / Е. Ю. Дубровская ; МГТУ. - Магнитогорск : МГТУ, 2015. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - Загл. с титул. экрана. - URL: <https://magtu.informsystema.ru/uploader/fileUpload?name=14.pdf&show=dcatalogues/1/1123808/14.pdf&view=true> (дата обращения: 14.05.2020). - Макрообъект. - Текст : электронный. - Сведения доступны также на CD-ROM.

#### **в) Методические указания:**

1. Теплофизика, теплотехника, теплообмен. Тепломассоперенос. Топливо и огнеупоры. Тепловая работа печей. Лабораторный практикум : учебное пособие / В. А. Арутюнов, В. А. Капитанов, И. А. Левицкий, С. Н. Шибалов. — Москва : МИСИС, 2007. — 136 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/1814> (дата обращения: 25.09.2020). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

3. Пинтя, Т. Н. Термодинамика. Теплопередача : практикум / Т. Н. Пинтя, Ю. И. Тартаковский, Г. Н. Матвеева ; МГТУ. - [2-е изд., подгот. по печ. изд. 2012 г.]. - Магнитогорск : МГТУ, 2013. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - Загл. с титул. экрана. - URL: <https://magtu.informsystema.ru/uploader/fileUpload?name=48.pdf&show=dcatalogues/1/1124311/48.pdf&view=true>. (дата обращения: 04.10.2019). - Макрообъект. - Текст : электронный. - Сведения доступны также на CD-ROM.

3. Пинтя, Т. Н. Термодинамика. Теплопередача : практикум / Т. Н. Пинтя, Ю. И. Тартаковский, Г. Н. Матвеева ; МГТУ. - Магнитогорск, 2012. - 53 с. : ил., граф., схемы, табл. - URL:

<https://magtu.informsystema.ru/uploader/fileUpload?name=49.pdf&show=dcatalogues/1/1102500/49.pdf&view=true> (дата обращения: 14.05.2020). - Макрообъект. - Текст : электронный. - Имеется печатный аналог.

4. Пинтя, Т. Н. Экспериментальное исследование процессов термодинамики. Лабораторный практикум : учебное пособие / Т. Н. Пинтя ; МГТУ. - Магнитогорск : МГТУ, 2013. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - Загл. с титул. экрана. - URL: <https://magtu.informsystema.ru/uploader/fileUpload?name=1242.pdf&show=dcatalogues/1/1123323/1242.pdf&view=true> (дата обращения: 14.05.2020). - Макрообъект. - Текст : электронный. - Сведения доступны также на CD-ROM.

4. Агапитов, Е. Б. Введение в направление "Теплоэнергетика и теплотехника" : учебно-методическое пособие / Е. Б. Агапитов, Б. К. Сеничкин, Г. Н. Матвеева. - Магнитогорск : [МГТУ], 2015. - 63 с. : ил., табл. - URL: <https://magtu.informsystema.ru/uploader/fileUpload?name=902.pdf&show=dcatalogues/1/1118844/902.pdf&view=true> (дата обращения: 14.05.2020). - Макрообъект. - Текст : электронный. - Имеется печатный аналог.

5. Горохов, А. В. Гидродинамика и теплопередача : практикум / А. В. Горохов ; МГТУ. - Магнитогорск : [МГТУ], 2017. - 59 с. : ил., табл., схемы, граф.- URL: <https://magtu.informsystema.ru/uploader/fileUpload?name=3463.pdf&show=dcatalogues/1/1514268/3463.pdf&view=true> (дата обращения: 14.05.2020). - Макрообъект. - Текст : электронный. - Имеется печатный аналог  
Пинтя, Т. Н. Термодинамика. Теплопередача [Электронный ресурс] : практикум / Т. Н. Пинтя, Ю. И. Тартаковский, Г. Н. Матвеева ; МГТУ. - [2-е изд., подгот. по печ. изд. 2012 г.]. - Магнитогорск : МГТУ, 2013. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - Режим доступа: <https://magtu.informsystema.ru/uploader/fileUpload?name=48.pdf&show=dcatalogues/1/1124311/48.pdf&view=true>. - Макрообъект.

#### г) Программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

##### Программное обеспечение

| Наименование ПО          | № договора                   | Срок действия лицензии |
|--------------------------|------------------------------|------------------------|
| 7Zip                     | свободно распространяемое ПО | бессрочно              |
| MS Windows 7(Белорецк)   | К-171-09 от 18.10.2009       | бессрочно              |
| MS Office 2007(Белорецк) | К-171-09 от 18.10.2009       | бессрочно              |
| FAR Manager              | свободно распространяемое ПО | бессрочно              |

##### Профессиональные базы данных и информационные справочные системы

| Название курса   | Ссылка   |
|--|--|
| Электронная база периодических изданий East View Information Services, ООО «ИВИС»                  | <a href="https://dlib.eastview.com/">https://dlib.eastview.com/</a>                          |
| Национальная информационно-аналитическая система – Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)   | URL: <a href="https://elibrary.ru/project_risc.asp">https://elibrary.ru/project_risc.asp</a> |
| Поисковая система Академия Google (Google Scholar)   | URL: <a href="https://scholar.google.ru/">https://scholar.google.ru/</a>                     |
| Информационная система - Единое окно доступа к информационным ресурсам                             | URL: <a href="http://window.edu.ru/">http://window.edu.ru/</a>                               |
| Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный институт промышленной собственности» | URL: <a href="http://www1.fips.ru/">http://www1.fips.ru/</a>                                 |

#### 9 Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Материально-техническое обеспечение дисциплины включает:

Материально-техническое обеспечение дисциплины включает:

Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа. Учебные аудитории для проведения практических занятий, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации. Оснащение: мультимедийные средства хранения, передачи и представления информации

Наглядные материалы: справочные таблицы, печатный раздаточный материал (задания для контрольных работ); учебники и учебные пособия;

• Наборы наглядных пособий по темам:

2. «Теплофизика. Иллюстративный материал для лекций»
3. «Диффуравнение теплопроводности. Иллюстративный материал для лекций»
4. «Излучение. Иллюстративный материал для лекций»
5. «Конвективный теплообмен. Иллюстративный материал для лекций»
6. «Нестационарный режим. Иллюстративный материал для лекций»

Учебная аудитория для проведения лабораторных работ:

лаборатория теплофизики. Оснащение. Оборудование для выполнения лабораторных работ по темам: "Теплоотдача через одну и многослойные плоские стенки", "Теплоотдача через цилиндрическую однослойную стенку", "Определение коэффициента теплопроводности".

Помещения для самостоятельной работы обучающихся. Оснащение: персональные компьютеры с пакетом MS Office, выходом в Интернет и с доступом в электронную информационно-образовательную среду университета.

Помещение для хранения и профилактического обслуживания учебного оборудования. Оснащение: места для хранения учебно-наглядных пособий и учебно-методической документации

## Приложение 1

### Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов

#### Перечень тем для подготовки к практическим занятиям:

1. Основные понятия и определения. Виды переноса теплоты и массы: теплопроводность, конвекция, излучение, диффузия. Законы Фурье, Ньютона, Фика.
2. Теплопроводность при стационарном режиме. Однослойная и многослойная плоская стенка плоская стенка.
3. Распространение теплоты теплопроводностью в однородной однослойной и многослойной цилиндрической стенке.
4. Теплопроводность при нестационарном режиме. Нестационарные процессы теплопроводности в неограниченной пластине.
5. Нестационарные процессы теплопроводности в цилиндре.
6. Основные положения конвективного тепло-массообмена. Основные понятия и определения. Ламинарный и турбулентный режимы движения жидкости. Пограничный слой.
7. Подобие процессов конвективного теплообмена. Критерии подобия.
8. Теплоотдача при вынужденном движении жидкости. Расчетные формулы для теплоотдачи при продольном обтекании пластины. Теплоотдача при движении потока внутри труб (каналов).
9. Конвективный теплообмен при вынужденном течении жидкости в трубах и каналах. Особенности течения и теплообмена в трубах. Вязкостный и вязкостно-гравитационный режимы течения. Теплоотдача при ламинарном и турбулентном режимах течения. Теплоотдача в трубах некруглого сечения, в изогнутых трубах.
10. Теплоотдача при свободном движении жидкости.
11. Теплообмен излучением. Основные понятия и законы. Природа теплового излучения.

Законы Планка, Вина, Стефана-Больцмана, Кирхгофа, Ламберта. Понятие о сером излучении.

### Вопросы к экзамену

1. Основные сведения из термодинамики. Уравнение состояния. Внутренняя энергия, энтальпия, теплота, работа, теплоемкость. Первый и второй законы термодинамики. Основные уравнения одномерного течения газа: сплошности, импульсов, энергии.
2. Основные сведения из механики газов. Режимы движения жидкости. Движение газов в каналах с низкой скоростью. Равновесие газа. Истечение газа через отверстия. Уравнение Бернулли.
3. Струйное движение газа. Свободная струя. Ограниченные струи.
4. Основные понятия и определения. Виды переноса теплоты и массы: теплопроводность, конвекция, излучение, диффузия. Тройная аналогия, как выражение общего закона переноса – принципа линейности Онзагера. Дифференциальные условия теплообмена.
5. Теплопроводность. Градиент температур. Механизм переноса теплоты теплопроводностью в газах, жидкостях, металлах и неметаллах. Дифференциальные уравнения теплопроводности. Условия однозначности.
6. Теплопроводность при стационарном режиме. Передача теплоты через плоскую стенку при граничных условиях I и III рода. Коэффициент теплопередачи, термическое сопротивление. Многослойная плоская стенка.
7. Расчет температур в многослойной плоской стенке на стыке слоев. Расчет потерь теплоты через стены печей. Расчет толщины изоляции. Передача теплоты через цилиндрическую стенку при граничных условиях I и III рода. Многослойная цилиндрическая стенка. Критический диаметр изоляции.
8. Теплопроводность при нестационарном режиме. Основные представления о методах решения задач при нестационарной теплопроводности. Теплопроводность бесконечной пластины. Анализ решения для предельных значений числа Био. Номограммы Д.В. Будрина.
9. Теплопроводность цилиндра. Анализ решения. Определение количества теплоты, отдаваемой или воспринимаемой телом в нестационарном режиме. Нагревание (охлаждение) тел конечных размеров. Теорема о перемножении решений. Регулярный режим нагревания (охлаждения) тел.
10. Основные положения конвективного теплообмена. Виды конвекции. Режимы движения жидкости. Пограничный слой.
11. Система дифференциальных уравнений конвективного теплообмена: уравнение теплоотдачи, энергии, движения, сплошности. Условия однозначности.
12. Подобие процессов конвективного теплообмена. Приведение уравнений конвективного теплообмена к безразмерному виду. Число подобия. Уравнения подобия. Условия подобия физических процессов. Теоремы подобия. Обобщение опытных данных и получение эмпирических уравнений.
13. Теплоотдача при вынужденном движении жидкости. Теплоотдача при вынужденном продольном обтекании плоской поверхности. Гидродинамический и тепловой пограничные слои, соотношение их толщин. Теплоотдача при ламинарном пограничном слое. Теплоотдача при турбулентном пограничном слое. Струйное охлаждение
14. Конвективный теплообмен при вынужденном течении жидкости в трубах и каналах. Особенности течения и теплообмена в трубах. Вязкостный и вязкостно-гравитационный режимы течения. Теплоотдача при ламинарном и турбулентном режимах течения. Теплоотдача в трубах некруглого сечения, в изогнутых трубах.
15. Теплоотдача при свободном движении жидкости. Факторы, обуславливающие свободное движение. Теплоотдача при свободном движении вдоль вертикальной стенки, вблизи горизонтальных труб и пластин. Теплоотдача от ограждений печей.

16. Теплообмен излучением. Основные понятия и законы. Природа теплового излучения. Виды лучистых потоков. Законы Планка, Вина, Стефана-Больцмана, Кирхгофа, Ламберта. Понятие о сером излучении.
17. Теплообмен излучением между телами, разделенными прозрачной средой. Теплообмен излучением между телами с плоскопараллельными поверхностями. Теплообмен между телом и охватывающей оболочкой, системы с экранами. Угловые коэффициенты излучения, их свойства, методы определения. Зональный метод расчета лучистого теплообмена в печах.
18. Теплообмен излучением в поглощающей среде. Закон Бугера. Уравнение переноса лучистой энергии. Излучение паров и газов. Расчет лучистого теплообмена между излучающей средой и поверхностью твердого тела. Понятие о сложном теплообмене. Числа радиационного подобия.

## Контрольные вопросы и задания для самопроверки

### Вариант 1

1. Какими путями может осуществляться обмен энергиями между закрытой ТД системой и внешней средой? (*совершения работы и теплообмена*)
2. Энергия, передаваемая ТД системе внешними телами путем силового воздействия между телами, называется ... (*работой*).
3. Энергия, передаваемая системе путем теплообмена, называется ... (*теплотой*).
4. Запишите первое начало термодинамики. ( $\delta Q = dU + \delta A$ )
5. Дайте определения: а) теплопроводности; б) конвекции; в) теплового излучения; г) конвективного теплообмена; д) конвективной теплоотдачи. а) Теплопроводность (*молекулярный перенос теплоты в телах (или между ними), обусловленный переменностью температуры в рассматриваемом пространстве*). б) Конвекция (*процесс переноса теплоты при перемещении объемов жидкости или газа (текучей среды) в пространстве из области с одной температурой в область с другой. При этом перенос теплоты неразрывно связан с переносом самой среды*). в) тепловое излучение (*процесс распространения теплоты с помощью электромагнитных волн, обусловленный только температурой и оптическими свойствами излучающего тела; при этом внутренняя энергия тела (среды) переходит в энергию излучения*). г) конвективный теплообмен (*Совместный процесс переноса теплоты конвекцией и теплопроводностью*). д) конвективная теплоотдача или теплоотдача (*конвективный теплообмен между потоками жидкости или газа и поверхностью твердого тела*).
6. Сформулируйте законы Фурье, Ньютона, Фика.
7. Запишите дифференциальное уравнение теплопроводности: 1) в общем виде ( $\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{q_v}{c_v \rho}$ ); 2) для плоской стенки при стационарном режиме при отсутствии внутренних источников тепла ( $0 = a \nabla^2 t$ ); 3) для цилиндрической стенки при стационарном режиме при отсутствии внутренних источников тепла ( $0 = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right)$ ).
8. В чем заключаются условия однозначности? (*Условия однозначности содержат геометрические, физические, временные и граничные условия. Геометрические условия определяют форму и размеры тела, в котором протекает изучаемый процесс. Физические условия задаются теплофизическими параметрами тела  $\lambda_i$  и  $c_v$  и распределением внутренних источников теплоты. Временные (начальные) условия содержат распределение температуры в теле в начальный момент времени. Граничные условия определяют особенности протекания процесса на поверхности тела*).
9. Чему равен коэффициент температуропроводности, входящий в дифференциальное уравнение теплопроводности? ( $a = \lambda / c_v \rho$ )
10. Опишите ламинарный и турбулентный режимы движения жидкости. (*При ламинарном*

режиме отдельные струйки жидкости не перемешиваются друг с другом, или, иначе, каждая частичка жидкости движется параллельно стенке твердого тела (в частности, стенке канала). При **турбулентном** режиме каждая частица потока, участвуя в общем поступательном движении, кроме того, совершает различные поперечные движения, в связи с чем поток движется в виде беспорядочной массы, сильно возмущенной вихрями).

11. Запишите систему дифференциальных уравнений конвективного теплообмена: уравнение теплоотдачи, уравнение энергии, уравнение движения вязкой жидкости, уравнение сплошности. (уравнение теплоотдачи -  $\alpha = -(\lambda/\Delta t)(\partial t/\partial n)$ , уравнение энергии -  $a\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}\right) = \frac{\partial t}{\partial \tau} + \frac{\partial t}{\partial x}\omega_x + \frac{\partial t}{\partial y}\omega_y + \frac{\partial t}{\partial z}\omega_z$ ,  $\rho \frac{D\omega_x}{d\tau} = \rho g - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 \omega_x$ ,  $\rho \frac{D\omega_y}{d\tau} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 \omega_y$ ,  $\rho \frac{D\omega_z}{d\tau} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^2 \omega_z$  - уравнение движения вязкой жидкости,  $\left(\frac{\partial(\rho\omega_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\omega_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho\omega_z)}{\partial z}\right) + \frac{\partial \rho}{\partial \tau} = 0$  - уравнение сплошности).

12. Как определить и что характеризует число Фурье? (Число Фурье  $Fo = at/l^2$  характеризует нестационарность тепловых процессов)
13. Какое число подобия является основным, зависящим от других чисел подобия, и что оно характеризует? (Число Нуссельта  $Nu = \alpha d/\lambda$  - безразмерный коэффициент теплоотдачи, характеризует интенсивность теплообмена на границе твердое тело - жидкость)
14. Для тела, участвующего в лучистом теплообмене с другими телами, согласно закону сохранения энергии, можно составить следующие уравнения теплового баланса:

$$q_{отпр} + q_{ногл} + q_{прон} = q_{над} \cdot \frac{q_{отпр}}{q_{над}} + \frac{q_{ногл}}{q_{над}} + \frac{q_{прон}}{q_{над}} = 1 \quad R + A + D = 1$$

15. Запишите закон Стефана-Больцмана. (Закон Стефана-Больцмана для поверхностной плотности потока интегрального излучения  $q_0$  ( $Вт/м^2$ ) выражается следующим соотношением:  $q_0 = \sigma_0 T^4$ , где  $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} Вт/(м^2 K^4)$  - константа излучения. Для удобства практических расчетов последняя зависимость представляется в виде  $q_0 = c_0 \left(\frac{T}{100}\right)^4$ , где  $c_0 = 5,67 Вт/(м^2 K^4)$  - излучательная способность (коэффициент излучения) абсолютно черного тела.)

16. Вычислите плотность теплового потока через длинную плоскую однородную стенку, если она выполнена из бетона  $\lambda = 1,1 Вт/(м \cdot K)$ . Толщина стенки  $\delta = 50$  мм. Температуры на поверхностях стенки поддерживаются постоянными:  $t_{cm1} = 100^\circ C$  и  $t_{cm2} = 90^\circ C$ . Решение:

$$q = \lambda \frac{t_{cm1} - t_{cm2}}{\delta} \quad \text{Ответ: } q = 220 Вт/м^2.$$

17. Для многих материалов зависимость коэффициента теплопроводности от температуры близка к линейной:  $\lambda = \lambda_0(1 + \beta t)$ , где  $\lambda_0$  - значение коэффициента теплопроводности при  $0^\circ C$ . Определите  $\lambda_0$  и  $\beta$  для изоляции, выполненной из асбопермита, для которого  $\lambda = 0,109 + 0,000146 t$ . Ответ:  $\lambda_0 = 0,109$ ,  $\beta = 0,0013394 Вт/м^2$ .

18. Определить термический коэффициент сопротивления кирпичной стены помещения толщиной в два кирпича ( $\delta = 510$  мм) с коэффициентом теплопроводности  $\lambda = 0,8 Вт/(м \cdot ^\circ C)$ . Коэффициент теплоотдачи к внутренней поверхности стенки  $\alpha_1 = 7,5 Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$ ; коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности стены, обдуваемой ветром,  $\alpha_2 = 20 Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$ . Ответ:  $R = 1,22$ . Решение: термический коэффициент сопротивления определяется по формуле:  $R = \frac{1}{1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2} = \frac{1}{1/7,5 + 0,51/0,8 + 1/20} = \frac{1}{0,13 + 0,64 + 0,05} = \frac{1}{0,82} = 1,22$ .

19. Пользуясь графиками, выполните следующие расчеты: 1) при заданном числе  $Fo = 6$  и числе  $B_i = 0,5$  определите температуру  $\theta_{\bar{x}=0}$  в середине плоской пластины; 2) при заданной

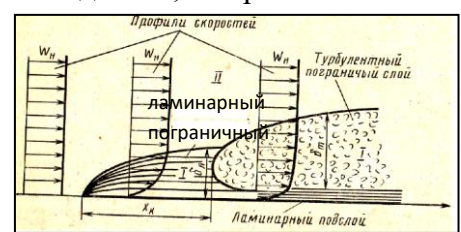
- температуре на поверхности пластины  $\theta_{x=1}=0,3$  и  $Bi=0,5$  определите продолжительность нагрева, т.е.  $Fo$ ; 3) при заданном числе  $Fo=3$  и температуре на оси цилиндра  $\theta_{r=0}=0,05$  определите интенсивность теплоотдачи, т.е.  $Bi$ . *Ответ:*  $\theta_{x=0}=0,08$ ,  $Fo=3$ ,  $Bi=0,6$ .
20. Необходимо опытным путем определить распределение температур в длинном стальном вале диаметром  $d=400$  мм. Для стали коэффициент теплопроводности равен  $\lambda=42$  Вт/(м·°С). Коэффициент теплоотдачи к валу в печи  $\alpha=116$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С). Исследование решено проводить в небольшой печи на геометрически подобной модели вала, выполненной из легированной стали. Для модели  $\lambda_m=16$  Вт/(м·°С);  $\alpha_m=150$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С). Определить диаметр  $d_m$  модели вала. *Ответ:*  $d_m=117,5$  мм;  $\tau_m=1735$  с. *Решение:* Подобие температурных полей вала и модели будет иметь место при равенстве  $Bi_m=Bi$  для образца и модели. Критерии Био для вала равны:  $Bi=\alpha/\lambda$ . Из условия  $Bi_m=Bi$  находим диаметр модели вала:  $d_m=2r_m=\frac{2\lambda_m}{\alpha_m}Bi$ .
21. Тонкая пластина длиной  $l_0=2$  м и шириной  $a=1,5$  м обтекается продольным потоком воздуха. Скорость и температура набегающего потока равны соответственно  $\omega_0=3$  м/с;  $t_0=20$ °С. Температура поверхности пластины  $t_c=90$ °С. Определить средний по длине пластины коэффициент теплоотдачи. *Ответ:*  $\alpha=4,87$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С). *Решение:* Для воздуха при  $t_0=20$ °С  $\nu=15,06\cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $\lambda=2,59\cdot 10^{-2}$  Вт/(м·°С);  $Pr=0,703$ . Число Рейнольдса  $Re=\omega_0 l_0/\nu=3,98\cdot 10^5 < 5\cdot 10^5$ , следовательно, режим течения в пограничном слое ламинарный. В этих условиях средняя по длине теплоотдача может быть рассчитана по формуле  $Nu=0,67Re^{0,5}Pr^{1/3}$ , где  $Nu=\alpha l_0/\lambda$  и  $Re=\omega_0 l_0/\nu$ , а физические свойства выбираются по температуре набегающего потока  $t_0$ . В рассматриваемом случае  $Nu=\alpha l_0/\lambda=0,67(3,98\cdot 10^5)^{1/2}(0,703)^{1/3}=375$  и коэффициент теплоотдачи  $\alpha=Nu\lambda/l_0=375\cdot 2,59\cdot 10^{-2}/2=4,87$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С).
22. Плоская пластина длиной  $l=1$  м обтекается продольным потоком воздуха. Скорость и температура набегающего потока воздуха  $\omega_0=80$  м/с и  $t_0=10$ °С. Перед пластиной установлена турбулизирующая решетка, вследствие чего движение в пограничном слое на всей длине пластины турбулентное. Вычислить среднее значение коэффициента теплоотдачи с поверхности пластины. *Ответ:* Средний коэффициент теплоотдачи  $\alpha=202$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С). *Решение:* При температуре набегающего потока  $t_0=10$ °С физические свойства воздуха:  $\nu=14,16\cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $\lambda=2,51\cdot 10^{-2}$  Вт/(м·°С). Число Рейнольдса  $Re=\omega_0 l_0/\nu=80\cdot 1/14,16\cdot 10^{-6}=5,65\cdot 10^6 > 5\cdot 10^5$ . Режим движения в пограничном слое на пластине турбулентный. Среднее значение коэффициента теплоотдачи при обтекании пластины воздухом для турбулентного пограничного слоя можно вычислить по формуле  $Nu_{жс}=0,032Re_{жс}^{0,8}$ . Подставив полученное значение числа Рейнольдса, получим  $Nu_{жс}=0,032Re_{жс}^{0,8}=0,032(5,65\cdot 10^6)^{0,8}=8050$  и  $\alpha=Nu\lambda/l_0=8050\cdot 2,51\cdot 10^{-2}/1=202$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

## Вариант 2

- Обмен энергиями между закрытой ТД системой и внешней средой может осуществляться путем \_\_\_\_ (совершения работы и теплообмена).
- Энергия, передаваемая ТД системе внешними телами путем силового воздействия между телами, называется \_\_\_\_ (работой).
- Энергия, передаваемая системе путем теплообмена, называется \_\_\_\_ (теплотой).
- Теплообмен возможен путем \_\_\_\_ (конвекции, теплопроводности, излучения).
- Запишите первое начало термодинамики \_\_\_\_ ( $\delta Q = dU + \delta A$ ).



6. Что такое энтальпия \_\_\_\_ ( $I = U + pV$  есть функция состояния.  $Q = \Delta I$  - энтальпию можно определить как функцию состояния, приращение которой при изобарическом процессе дает теплоту, полученную системой).
7. Дайте определения: а) Теплопроводность \_\_\_\_ (молекулярный перенос теплоты в телах (или между ними), обусловленный переменностью температуры в рассматриваемом пространстве). б) Конвекция \_\_\_\_ (процесс переноса теплоты при перемещении объемов жидкости или газа (текучей среды) в пространстве из области с одной температурой в область с другой. При этом перенос теплоты неразрывно связан с переносом самой среды). в) тепловое излучение - \_\_\_\_ (процесс распространения теплоты с помощью электромагнитных волн, обусловленный только температурой и оптическими свойствами излучающего тела; при этом внутренняя энергия тела (среды) переходит в энергию излучения). г) конвективный теплообмен \_\_\_\_ (совместный процесс переноса теплоты конвекцией и теплопроводностью). д) конвективная теплоотдача или теплоотдача \_\_\_\_ (конвективный теплообмен между потоками жидкости или газа и поверхностью твердого тела). е) теплопередача \_\_\_\_ (процесс передачи теплоты от горячей жидкости к холодной через разделяющую их стенку).
8. Сформулируйте законы Фурье, Ньютона, Фика.
9. В чем заключается тройная аналогия (принцип линейности Онзагера) \_\_\_\_ (Закономерности всех трех процессов переноса могут быть обобщены и сформулированы следующим образом: поток субстанции пропорционален движущей силе, а коэффициентом пропорциональности является коэффициент переноса. Движущей силой в каждом случае является градиент объемной плотности соответствующей субстанции. В этой формулировке отражено существо известного в термодинамике необратимых процессов принципа линейности Онзагера, являющегося одним из общих принципов процессов переноса. Аналогия процессов молекулярного переноса импульса, тепла и массы при определенных условиях приводит к тождественности соответствующих дифференциальных уравнений и позволяет создать общую теорию процессов переноса).
10. Запишите дифференциальное уравнение теплопроводности \_\_\_\_ ( $\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{q_v}{c_v \rho}$ )
11. В чем заключаются условия однозначности? \_\_\_\_ (Условия однозначности содержат геометрические, физические, временные и граничные условия. Геометрические условия определяют форму и размеры тела, в котором протекает изучаемый процесс. Физические условия задаются теплофизическими параметрами тела  $\lambda_i$  и  $c_v$  и распределением внутренних источников теплоты. Временные (начальные) условия содержат распределение температуры в теле в начальный момент времени. Граничные условия определяют особенности протекания процесса на поверхности тела).
12. Сформулируйте граничные условия I – IV рода \_\_\_\_ (Граничные условия I рода - задается распределение температуры на поверхности тела для каждого момента времени:  $T_{cm} = f(\tau, x_{cm}, y_{cm}, z_{cm})$ . Граничные условия II рода - заданной является величина плотности теплого потока для каждой точки поверхности тела в любой момент времени, т.е.  $q_{cm} = f(\tau, x_{cm}, y_{cm}, z_{cm})$ . Граничные условия III рода - задаются температуры среды  $T_0$  и условия теплообмена этой среды с поверхностью тела. Для описания интенсивности теплообмена между поверхностью тела и средой используется гипотеза Ньютона-Рихмана  $\frac{\partial t}{\partial n} \Big|_{cm} = -\frac{\alpha}{\lambda} (t_{cm} - t_0)$ . Граничные условия IV рода характеризуют условия теплообмена системы тел или тела с окружающей средой по закону теплопроводности и формулируются на основании равенства тепловых потоков, проходящих через поверхность соприкосновения тел, т. е.  $\lambda_1 \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_{cm1} = \lambda_2 \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_{cm2}$ ).
13. Опишите ламинарный и турбулентный режимы движения жидкости, пограничный слой \_\_\_\_ (При ламинарном режиме отдельные струйки жидкости не перемешиваются друг с другом, или, иначе,



каждая частичка жидкости движется параллельно стенке твердого тела (в частности, стенке канала). При турбулентном режиме каждая частица потока, участвуя в общем поступательном движении, кроме того, совершает различные поперечные движения, в связи с чем поток движется в виде беспорядочной массы, сильно возмущенной вихрями).

14. Система дифференциальных уравнений конвективного теплообмена. Уравнение теплоотдачи. Уравнение энергии. Уравнение движения вязкой жидкости. Уравнение сплошности. (уравнение теплоотдачи -  $\alpha = -(\lambda/\Delta t)(\partial t/\partial n)$ , уравнение энергии -

$$a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial t}{\partial \tau} + \frac{\partial t}{\partial x} \omega_x + \frac{\partial t}{\partial y} \omega_y + \frac{\partial t}{\partial z} \omega_z, \quad \rho \frac{D\omega_x}{d\tau} = \rho g - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 \omega_x, \quad \rho \frac{D\omega_y}{d\tau} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 \omega_y, \\ \rho \frac{D\omega_z}{d\tau} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^2 \omega_z \quad - \quad \text{уравнение движения вязкой жидкости,} \\ \left( \frac{\partial(\rho\omega_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\omega_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho\omega_z)}{\partial z} \right) + \frac{\partial \rho}{\partial \tau} = 0 \quad - \text{уравнение сплошности.}$$

15. Из уравнения Навье-Стокса  $\rho \left( \frac{\partial \omega_x}{\partial \tau} + \frac{\partial \omega_x}{\partial x} \omega_x + \frac{\partial \omega_x}{\partial y} \omega_y + \frac{\partial \omega_x}{\partial z} \omega_z \right) = \rho g - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial z^2} \right)$ , используя гидромеханическое подобие, получите число Эйлера  $Eu = \Delta p / \rho \omega^2$  и число Рейнольдса

$$Re = \rho \omega l / \mu. \quad (\text{Условия подобия } \frac{c_p c_v}{c_t} = \frac{c_p c_v^2}{c_l} = c_p c_g = \frac{c_p}{c_l} = \frac{c_\mu c_v}{c_l^2}). \quad \text{Из условия } \frac{c_p c_v^2}{c_l} = \frac{c_p}{c_l} \text{ получим}$$

индикатор подобия  $c_p / c_p c_v^2 = 1$ . Из этого индикатора выводится число Эйлера:

$Eu = p / \rho v^2 = idem$ . Пользуясь правилом замещения одноименных величин, представим число Эйлера в виде  $Eu = \Delta p / \rho v^2$ , где  $\Delta p$  - перепад давлений. Число Эйлера является мерой отношения перепада статических давлений (гидравлическое сопротивление) в потоке

жидкости к динамическому давлению потока. Из условия  $\frac{c_p c_v^2}{c_l} = \frac{c_p c_v}{c_l^2}$  получим индикатор

подобия  $c_p c_v c_l / c_\mu = 1$ . Из этого индикатора получим число Рейнольдса:  $Re = \rho \omega l / \mu = idem$ . Так

как  $\mu / \rho = \nu$ , где  $\nu$  - кинематическая вязкость, то число Рейнольдса может быть

записано в виде  $Re = \omega l / \nu$ . Физический смысл числа  $Re$  легко выяснить, написав его в виде

$Re = \rho v^2 / (\mu v / l)$ . Критерий Рейнольдса является мерой отношения динамического давления, к давлению силы вязкого трения.)

16. Из уравнений  $a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = \frac{\partial t}{\partial \tau} + \frac{\partial t}{\partial x} \omega_x$ ,  $\lambda(\partial t/\partial n) = \alpha \Delta t$ , используя тепловое подобие, получите число

Фурье  $Fo = a\tau/l^2$ , число Пекле  $Pe = \omega l/a$  и число Нуссельта  $Nu = \alpha l/\lambda$ . (Условия подобия

$$\frac{c_a c_T}{c_l^2} = \frac{c_T}{c_l} = \frac{c_T c_v}{c_l}, \quad \frac{c_\lambda c_T}{c_l} = c_\alpha c_T. \quad \text{Из условия } \frac{c_a c_T}{c_l^2} = \frac{c_T}{c_l} \text{ получим индикатор подобия } c_a c_l / c_l^2 = 1.$$

Этому индикатору соответствует число Фурье:  $Fo = a\tau/l^2 = idem$ , который характеризует нестационарность тепловых процессов. Число Фурье является безразмерным временем и выражает определенное соответствие между темпом изменения условий в окружающей

среде и темпом перестройки температурного поля внутри тела. Из условия  $\frac{c_a c_T}{c_l^2} = \frac{c_T c_v}{c_l}$

получим индикатор подобия  $c_v c_l / c_a = 1$ . Из этого индикатора выводится число Пекле:

$Pe = \omega l/a = idem$ . Число Пекле - критерий подобия температурных полей. В этот критерий не

входит температура, но входит скорость. Следовательно, число Пекле, как и число

Рейнольдса, характеризует кинематическую обстановку процесса. Для теплового подобия

скоростные поля должны удовлетворять не только тому требованию, которое вытекает

из условия  $Re = idem$ , но и дополнительному требованию  $Pe = idem$ . Из условия  $\frac{c_\lambda c_T}{c_l} = c_\alpha c_T$

получим индикатор подобия  $c_\alpha c_l / c_\lambda = 1$  и соответствующее число Нуссельта  $Nu = \alpha l/\lambda$ .

Число Нуссельта представляет собой безразмерный коэффициент теплоотдачи. Оно характеризует интенсивность теплообмена на границе твердое тело - жидкость. Число Нуссельта является определяемым, так как в него входит искомый коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  (не входящий в условие однозначности).

17. Вычислить плотность теплового потока через плоскую однородную стенку, толщина которой значительно меньше ширины и высоты, если стенка выполнена из бетона  $\lambda=1,1$  Вт/(м·К). Толщина стенки  $\delta=50$  мм. Температуры на поверхностях стенки поддерживаются постоянными:  $t_{cm1}=100^\circ\text{C}$  и  $t_{cm2}=90^\circ\text{C}$ . Решение:  $q=\lambda\frac{t_{cm1}-t_{cm2}}{\delta}$

Ответ:  $q=220$  Вт/м<sup>2</sup>.

18. Плоскую поверхность необходимо изолировать так, чтобы потери теплоты с единицы поверхности в единицу времени не превышали  $q=450$  Вт/м<sup>2</sup>. Температура поверхности под изоляцией  $t_{cm1}=450^\circ\text{C}$ , температура внешней поверхности изоляции  $t_{cm2}=50^\circ\text{C}$ . Определить толщину изоляции для случая, если изоляция выполнена из асбоотермита, для которого  $\lambda=0,109+0,000146t$ . Ответ:  $\delta=130$  мм. Решение:  $\delta=\lambda_{cp}\frac{t_{cm1}-t_{cm2}}{q}$ , где  $\lambda_{cp}=\lambda_0(1+\beta\frac{t_{cm1}+t_{cm2}}{2})$ .

Сравнивая  $\lambda=\lambda_0(1+\beta t)$  и формулы для  $\lambda$  каждого материала, имеем значения  $\lambda_0$  и  $\beta$ .

19. Определить термический коэффициент сопротивления кирпичной стены помещения толщиной в два кирпича ( $\delta=510$  мм) с коэффициентом теплопроводности  $\lambda=0,8$  Вт/(м·°C). Коэффициент теплоотдачи к внутренней поверхности стенки  $\alpha_1=7,5$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C); коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности стены, обдуваемой ветром,  $\alpha_2=20$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C). Ответ:  $R=1,22$ . Решение: термический коэффициент сопротивления по формуле:  $R=\frac{1}{1/\alpha_1+\delta/\lambda+1/\alpha_2}=\frac{1}{1/7,5+0,51/0,8+1/20}=\frac{1}{0,13+0,64+0,05}=\frac{1}{0,82}=1,22$ .

20. Пользуясь номограммами Будрина, выполните следующие расчеты:

- 1) при заданном числе  $Fo=6$  и числе  $Bi=0,5$  определите температуру  $\theta_{\bar{x}=0}=0,08$  в середине плоской пластины;
- 2) при заданных температуре на поверхности пластины  $\theta_{\bar{x}=1}=0,3$  и  $Bi=0,5$  определите продолжительность нагрева, т.е.  $Fo=3$ ;
- 3) при заданных числе  $Fo=3$  и температуре на оси цилиндра  $\theta_{r=0}=0,05$  определите интенсивность теплоотдачи, т. е.  $Bi=0,6$ .

21. Резиновая пластина толщиной  $2\delta=20$  мм, нагретая до температуры  $t_0=140^\circ\text{C}$ , помещена в воздушную среду с температурой  $t_{жс}=15^\circ\text{C}$ . Определить температуры в середине и на поверхности пластины через  $\tau=20$  мин после начала охлаждения. Коэффициент теплопроводности резины  $\lambda=0,175$  Вт/(м·°C), коэффициент температуропроводности резины  $a=0,833\cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с, коэффициент теплоотдачи от поверхности пластины к окружающему воздуху  $\alpha=65$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C). Ответ:  $t_{\bar{x}=1}=25,4^\circ\text{C}$ ,  $t_{\bar{x}=0}=47,5^\circ\text{C}$ . Решение: Температуры в середине и на поверхности безграничной пластины при охлаждении (нагревании) в среде с постоянной температурой можно определить с помощью графиков  $\theta_{\bar{x}=1}=f_2(Bi, Fo)$  и  $\theta_{\bar{x}=0}=f_1(Bi, Fo)$ . В рассматриваемом случае  $Bi=\alpha\delta/\lambda=3,73$ ,  $Fo=a\tau/\delta^2=1$ . При этих значениях критериев  $Bi$  и  $Fo$  по графикам находим  $\theta_{\bar{x}=0}=0,26$  и  $\theta_{\bar{x}=1}=0,083$ .

Безразмерная температура  $\theta=\frac{t-t_{жс}}{t_0-t_{жс}}$ ,  $\Rightarrow$ ,  $t_{\bar{x}=0}=t_{жс}+\theta_{\bar{x}=0}(t_0-t_{жс})=15+0,26(140-15)=47,5^\circ\text{C}$ ,

$t_{\bar{x}=1}=t_{жс}+\theta_{\bar{x}=1}(t_0-t_{жс})=15+0,083(140-15)=25,4^\circ\text{C}$ .

22. Тонкая пластина длиной  $l_0=2$  м и шириной  $a=1,5$  м обтекается продольным потоком воздуха. Скорость и температура набегающего потока равны соответственно  $w_0=3$  м/с;  $t_0=20^\circ\text{C}$ . Температура поверхности пластины  $t_c=90^\circ\text{C}$ . Определить средний по длине пластины коэффициент теплоотдачи. Ответ:  $\alpha=4,87$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C). Решение: Для воздуха

при  $t_0 = 20^\circ\text{C}$   $\nu = 15,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\lambda = 2,59 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\text{Pr} = 0,703$ . Число Рейнольдса  $\text{Re} = \omega_0 l_0 / \nu = 3,98 \cdot 10^5 < 5 \cdot 10^5$ , следовательно, режим течения в пограничном слое ламинарный. В этих условиях средняя по длине теплоотдача может быть рассчитана по формуле  $\overline{Nu} = 0,67 \text{Re}^{0,5} \text{Pr}^{1/3}$ , где  $Nu = \alpha l_0 / \lambda$  и  $\text{Re} = \omega_0 l_0 / \nu$ , а физические свойства выбираются по температуре набегающего потока  $t_0$ . В рассматриваемом случае  $Nu = \alpha l_0 / \lambda = 0,67 (3,98 \cdot 10^5)^{1/2} (0,703)^{1/3} = 375$  и коэффициент теплоотдачи  $\alpha = Nu \lambda / l_0 = 375 \cdot 2,59 \cdot 10^{-2} / 2 = 4,87 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

23. Плоская пластина длиной  $l = 1 \text{ м}$  обтекается продольным потоком воздуха. Скорость и температура набегающего потока воздуха  $\omega_0 = 80 \text{ м}/\text{с}$  и  $t_0 = 10^\circ\text{C}$ . Перед пластиной установлена турбулизирующая решетка, вследствие чего движение в пограничном слое на всей длине пластины турбулентное. Вычислить среднее значение коэффициента теплоотдачи с поверхности пластины. *Ответ: Средний коэффициент теплоотдачи  $\alpha = 202 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ . Решение: При температуре набегающего потока  $t_0 = 10^\circ\text{C}$  физические свойства воздуха:  $\nu = 14,16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\lambda = 2,51 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ . Число Рейнольдса  $\text{Re} = \omega_0 l_0 / \nu = 80 \cdot 1 / 14,16 \cdot 10^{-6} = 5,65 \cdot 10^6 > 5 \cdot 10^5$ . Режим движения в пограничном слое на пластине турбулентный. Среднее значение коэффициента теплоотдачи при обтекании пластины воздухом для турбулентного пограничного слоя можно вычислить по формуле  $\overline{Nu}_{\text{жс}} = 0,032 \text{Re}_{\text{жс}}^{0,8}$ . Подставив полученное значение числа Рейнольдса, получим  $Nu_{\text{жс}} = 0,032 \text{Re}_{\text{жс}}^{0,8} = 0,032 (5,65 \cdot 10^6)^{0,8} = 8050$  и  $\alpha = Nu \lambda / l_0 = 8050 \cdot 2,51 \cdot 10^{-2} / 1 = 202 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .*

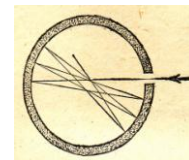
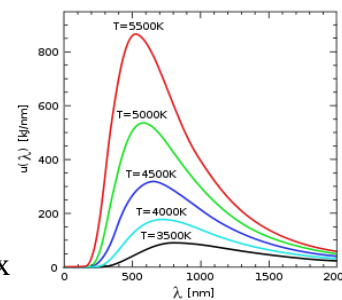
24. Необходимо опытным путем определить распределение температур в длинном стальном вале диаметром  $d = 400 \text{ мм}$  через  $\tau = 2,5 \text{ ч}$  после загрузки его в печь. Для стали коэффициенты теплопроводности и температуропроводности равны соответственно:  $\lambda = 42 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $a = 1,18 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ . Коэффициент теплоотдачи к валу в печи  $\alpha = 116 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ . Исследование решено проводить в небольшой печи на геометрически подобной модели вала, выполненной из легированной стали. Для модели  $\lambda_m = 16 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $a_m = 0,53 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\alpha_m = 150 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ . Определить диаметр  $d_m$  модели вала и промежуток времени, через который после загрузки модели в печь необходимо измерить распределение температур в модели. *Ответ:  $d_m = 117,5 \text{ мм}$ ;  $\tau_m = 1735 \text{ с}$ . Решение: Подобие температурных полей вала и модели будет иметь место при равенстве критериев для образца и модели:  $Bi_m = Bi$  и  $Fo_m = Fo$ . Критерии Био и Фурье для вала равны:  $Bi = \alpha r / \lambda$ ,  $Fo = a \tau / r^2$ . Из условия  $Bi_m = Bi$  находим диаметр модели вала:  $d_m = 2r_m = \frac{2\lambda_m}{\alpha_m} Bi$ . Из условия  $Fo_m = Fo$  находим*

*искомый промежуток времени:  $\tau_m = \frac{r_m^2}{a_m} Fo$ .*

### Вариант 3

1. Что такое внутренняя энергия системы?
2. Тело или совокупность тел, выделенные из окружающей среды реальной или воображаемой поверхностью, через которую может осуществляться взаимодействие рассматриваемой системы с окружающей средой, называется ....
3. Величина, численно равная отношению  $\delta Q$ , сообщаемого телу, к изменению  $dT$  тела в рассматриваемом процессе, называется .....
4. Запишите первое начало термодинамики.
5. ТД процесс, совершаемый системой, называется обратимым, если...
6. Сформулируйте законы Фурье, Ньютона, Фика.
7. Функция состояния, приращение которой при изобарическом процессе дает теплоту, полученную системой, называется ....

8. Запишите дифференциальное уравнение теплопроводности: 1) в общем виде; 2) для цилиндрической стенки при стационарном режиме при отсутствии внутренних источников тепла.
9. В чем заключаются граничные условия?
10. Как определяется коэффициент термического сопротивления?
11. Опишите пограничный слой жидкости.
12. Запишите систему дифференциальных уравнений конвективного теплообмена: уравнение теплоотдачи, уравнение энергии, уравнение сплошности.
13. Как определить и что характеризует число Рейнольдса?
14. Какое число подобия является основным, зависящим от других чисел подобия, и что оно характеризует?
15. Какой закон излучения показан на рисунке?
16. Запишите уравнение теплового баланса для тела, участвующего в лучистом теплообмене с другими телами.
17. Модель какого явления показана на рисунке?
18. Вычислите плотность теплового потока через длинную плоскую однородную стенку, если она выполнена из стали  $\lambda = 18 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Толщина стенки  $\delta = 50 \text{ мм}$ . Температуры на поверхностях стенки поддерживаются постоянными:  $t_{cm1} = 200^\circ\text{C}$  и  $t_{cm2} = 60^\circ\text{C}$ .
19. Определить термический коэффициент сопротивления кирпичной стены помещения толщиной в два кирпича ( $\delta = 510 \text{ мм}$ ) с коэффициентом теплопроводности  $\lambda = 0,8 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ . Коэффициент теплоотдачи к внутренней поверхности стенки  $\alpha_1 = 7,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$ ; коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности стены, обдуваемой ветром,  $\alpha_2 = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$ .
20. Резиновая пластина толщиной  $2\delta = 20 \text{ мм}$ , нагретая до температуры  $t_0 = 140^\circ\text{C}$ , помещена в воздушную среду с температурой  $t_{жс} = 15^\circ\text{C}$ . Определить температуры в середине и на поверхности пластины через  $\tau = 20 \text{ мин}$  после начала охлаждения. Коэффициент теплопроводности резины  $\lambda = 0,175 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ , коэффициент температуропроводности резины  $a = 0,833 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ , коэффициент теплоотдачи от поверхности пластины к окружающему воздуху  $\alpha = 65 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$ .
21. Необходимо опытным путем определить распределение температур в длинном стальном вале диаметром  $d = 400 \text{ мм}$ . Для стали коэффициент теплопроводности равен  $\lambda = 42 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ . Коэффициент теплоотдачи к валу в печи  $\alpha = 116 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$ . Исследование решено проводить в небольшой печи на геометрически подобной модели вала, выполненной из легированной стали. Для модели  $\lambda_m = 16 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ ;  $\alpha_m = 150 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$ . Определить диаметр  $d_m$  модели вала.
22. Тонкая пластина длиной  $l_0 = 2 \text{ м}$  обтекается продольным потоком воздуха. Скорость и температура набегающего потока равны соответственно  $\omega_0 = 3 \text{ м}/\text{с}$ ;  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ . Определите режим течения в пограничном слое.
23. Плоская пластина длиной  $l = 1 \text{ м}$  обтекается продольным потоком воздуха. Скорость и температура набегающего потока воздуха  $\omega_0 = 80 \text{ м}/\text{с}$  и  $t_0 = 10^\circ\text{C}$ . Перед пластиной установлена турбулизирующая решетка, вследствие чего движение в пограничном слое на всей длине пластины турбулентное. Вычислить среднее значение коэффициента теплоотдачи с поверхности пластины.



$$\bar{q} = -\lambda \text{grad } t \quad m_i = -D_i \text{grad } \rho_i \quad \tau = \eta \text{grad } u \quad \frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{q_v}{c_v \rho} \quad q = \lambda \frac{t_{cm1} - t_{cm2}}{\delta}$$

$$\lambda_{cp} = \lambda_0 \left(1 + \beta \frac{t_{cm1} + t_{cm2}}{2}\right) \quad q = \frac{t_1 - t_2}{1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2} \quad k = \frac{1}{1/\alpha_1 + \sum_{i=1}^n \delta_i/\lambda_i + 1/\alpha_2}$$

$$R = 1/k = 1/\alpha_1 + \sum_{i=1}^n \delta_i/\lambda_i + 1/\alpha_2 \quad q = k(t_1 - t_2) \quad R_i = 1/k_i = \frac{1}{\alpha_1 \pi d_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\pi \lambda_i} \ln(\delta_i/\lambda_i) + \frac{1}{\alpha_2 \pi d_{n+1}}$$

$$q = \frac{t_{cm1} - t_{cmn+1}}{\sum_{i=1}^n \delta_i/\lambda_i} \quad q = \lambda_{\text{экв}} \frac{t_{cm1} - t_{cmn+1}}{\sum_{i=1}^n \delta_i} \quad \lambda_{\text{экв}} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{\sum_{i=1}^n \delta_i/\lambda_i} \quad \theta = \frac{t - t_{\text{жс}}}{t_0 - t_{\text{жс}}} \quad \alpha = -(\lambda/\Delta t)(\partial t/\partial n)$$

$$a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial t}{\partial \tau} + \frac{\partial t}{\partial x} \omega_x + \frac{\partial t}{\partial y} \omega_y + \frac{\partial t}{\partial z} \omega_z \quad \rho \frac{D\omega_x}{d\tau} = \rho g - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 \omega_x$$

$$\rho \frac{D\omega_y}{d\tau} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 \omega_y \quad \rho \frac{D\omega_z}{d\tau} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^2 \omega_z \quad \left( \frac{\partial(\rho\omega_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\omega_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho\omega_z)}{\partial z} \right) + \frac{\partial \rho}{\partial \tau} = 0.$$

$$Eu = \Delta p / \rho \omega^2 \quad Re = \rho \omega l / \mu \quad Fo = a \tau / l^2 \quad Pe = \omega l / a \quad Nu = \alpha l / \lambda \quad Re = \omega l / \nu$$

$$Nu = 0,67 Re^{0,5} Pr^{1/3} \quad (\text{при } Re < 5 \cdot 10^5, \text{ т.е. при ламинарном режиме}) \quad Nu_{\text{жс}} = 0,032 Re_{\text{жс}}^{0,8} \quad (\text{при } Re > 5 \cdot 10^5, \text{ т.е. при турбулентном режиме в пограничном слое})$$

## Контрольные работы

### Контрольная работа 1

#### Вариант 1

- Плоскую поверхность необходимо изолировать так, чтобы потери теплоты с единицы поверхности в единицу времени не превышали  $q=650 \text{ Вт/м}^2$ . Температура поверхности под изоляцией  $t_{cm1}=400^\circ\text{C}$ , температура внешней поверхности изоляции  $t_{cm2}=40^\circ\text{C}$ . Определить толщину изоляции для случая, когда изоляция выполнена из диатомитовой крошки, для которой  $\lambda=0,113+0,00023t$ .
- В нагревательной печи, где температура газов  $t_1$ , стенка сделана из трех слоев: шамотного кирпича толщиной 70 мм, красного кирпича толщиной 250 мм и снаружи слоя изоляции толщиной  $\delta_{из}$ . Воздух в цехе имеет температуру  $t_2$ . Коэффициент теплоотдачи в печи от газов к стенке  $\alpha_1$ , снаружи от изоляции к воздуху  $\alpha_2$ . Найти коэффициент теплопередачи от газов к воздуху, потери теплоты через стенку, температуры на поверхностях всех слоев. Построить график температур в стенке.

| Вари-ант | Материал изоляции | $\delta_{из}$ , мм | $t_2$ , $^\circ\text{C}$ | $\alpha_2$ , Вт/(м <sup>2</sup> К) | Вари ант | $t_1$ , $^\circ\text{C}$ | $\alpha_1$ , Вт/(м <sup>2</sup> К) |
|----------|-------------------|--------------------|--------------------------|------------------------------------|----------|--------------------------|------------------------------------|
| 2        | Шлаковата         | 90                 | 30                       | 30                                 | б        | 1400                     | 130                                |

- Железобетонная дымовая труба внутренним диаметром  $d_2=800$  мм и наружным диаметром  $d_3=1300$  мм должна быть футерована внутри огнеупором. Определить толщину футеровки и температуру наружной поверхности трубы  $t_{cm3}$  из условий, чтобы тепловые потери с 1 м трубы не превышали 2000 Вт/м, а температура внутренней поверхности железобетонной

стенки  $t_{cm2}$  не превышала  $200^{\circ}\text{C}$ . Температура внутренней поверхности футеровки  $t_{cm1} = 425^{\circ}\text{C}$ ; коэффициент теплопроводности футеровки  $\lambda_1 = 0,5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$ ; коэффициент теплопроводности бетона  $\lambda_2 = 1,1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$ .

4. По стальному трубопроводу наружным диаметром  $d_n$  и толщиной 25 мм протекает газ со средней температурой  $t_1$  и коэффициентом теплоотдачи в трубе  $\alpha_1 = 35 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ . Снаружи труба покрыта двумя слоями изоляции: слоем А толщиной  $\delta_A$  (на поверхности трубы) и слоем Б толщиной  $\delta_B$ . На внешней поверхности изоляции температура  $t_{из}$ . Определить потери теплоты трубопроводом длиной  $l$  и температуру на поверхности контакта между слоями изоляции.

| Вари-ант | Слой изоляции            | $d_n$ , мм | $l$ , м | $t_1$ , $^{\circ}\text{C}$ | Вари-ант | $\delta_A$ , $\delta_B$ м | $t_{из}$ , $^{\circ}\text{C}$ |
|----------|--------------------------|------------|---------|----------------------------|----------|---------------------------|-------------------------------|
| 1        | А – асбослюда, Б - бетон | 1000       | 40      | 500                        | а        | 200<br>250                | 50                            |

### Контрольная работа 1

#### Вариант 2

1. Плоскую поверхность необходимо изолировать так, чтобы потери теплоты с единицы поверхности в единицу времени не превышали  $q = 600 \text{ Вт}/\text{м}^2$ . Температура поверхности под изоляцией  $t_{cm1} = 500^{\circ}\text{C}$ , температура внешней поверхности изоляции  $t_{cm2} = 45^{\circ}\text{C}$ . Определить толщину изоляции для случая, когда изоляция выполнена из новоасбозурита, для которого  $\lambda = 0,144 + 0,00014t$ .

2. В нагревательной печи, где температура газов  $t_1$ , стенка сделана из трех слоев: силикатного кирпича толщиной 40 мм, красного кирпича толщиной 350 мм и снаружи слоя изоляции толщиной  $\delta_{из}$ . Воздух в цехе имеет температуру  $t_2$ . Коэффициент теплоотдачи в печи от газов к стенке  $\alpha_1$ , снаружи от изоляции к воздуху  $\alpha_2$ . Найти коэффициент теплопередачи от газов к воздуху, потери теплоты через стенку, температуры на поверхностях всех слоев. Построить график температур в стенке.

| Вари-ант | Материал изоляции | $\delta_{из}$ , мм | $t_2$ , $^{\circ}\text{C}$ | $\alpha_2$ , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ | Вари-ант | $t_1$ , $^{\circ}\text{C}$ | $\alpha_1$ , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ |
|----------|-------------------|--------------------|----------------------------|---|----------|----------------------------|---|
| 1        | Асбест            | 100                | 27                         | 25  | а        | 1500                       | 120   |

3. Железобетонная дымовая труба внутренним диаметром  $d_2 = 800$  мм и наружным диаметром  $d_3 = 1300$  мм должна быть футерована внутри огнеупором. Определить толщину футеровки и температуру наружной поверхности трубы  $t_{cm3}$  из условий, чтобы тепловые потери с 1 м трубы не превышали  $2000 \text{ Вт}/\text{м}$ , а температура внутренней поверхности железобетонной стенки  $t_{cm2}$  не превышала  $200^{\circ}\text{C}$ . Температура внутренней поверхности футеровки  $t_{cm1} = 425^{\circ}\text{C}$ ; коэффициент теплопроводности футеровки  $\lambda_1 = 0,5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$ ; коэффициент теплопроводности бетона  $\lambda_2 = 1,1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$ .

4. По стальному трубопроводу наружным диаметром  $d_n$  и толщиной 25 мм протекает газ со средней температурой  $t_1$  и коэффициентом теплоотдачи в трубе  $\alpha_1 = 35 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ . Снаружи труба покрыта двумя слоями изоляции: слоем А толщиной  $\delta_A$  (на поверхности трубы) и

слоем Б толщиной  $\delta_B$ . На внешней поверхности изоляции температура  $t_{из}$ . Определить потери теплоты трубопроводом длиной  $l$  и температуру на поверхности контакта между слоями изоляции.

| Вари-ант | Слой изоляции                 | $d_n$ , мм | $l$ , м | $t_1$ , °С | Вари-ант | $\delta_A$ ,<br>$\delta_B$ м | $t_{из}$ , °С |
|----------|-------------------------------|------------|---------|------------|----------|------------------------------|---------------|
| 2        | А – вермикулит,<br>Б - асбест | 1200       | 90      | 600        | б        | 300<br>180                   | 60            |

### Контрольная работа 2

#### Вариант 1

1. Определить время  $\tau$ , необходимое для нагрева листа стали толщиной  $2\delta=24$  мм, который имел начальную температуру  $t_0=25^\circ\text{C}$ , а затем был помещен в печь с температурой  $t_{жс}=600^\circ\text{C}$ . Нагрев считать законченным, когда температура листа достигнет значения  $t=450^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплопроводности, теплоемкость и плотность стали равны соответственно  $\lambda=45,4$  Вт/(м·°С);  $c=0,502$  кДж/(кг·°С);  $\rho=7800$  кг/м<sup>3</sup>, а коэффициент теплоотдачи к поверхности листа  $\alpha=23,3$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

2. Стальная пластина толщиной  $2\delta=400$  мм нагревается в печи, имеющей постоянную температуру  $t_{жс}=800^\circ\text{C}$ . Температура пластины в момент помещения ее в печь была всюду одинаковой и равной  $t_0=30^\circ\text{C}$ . Коэффициенты теплопроводности и температуропроводности стали равны соответственно  $\lambda=37,2$  Вт/(м·°С);  $a=7\cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, коэффициент теплоотдачи к поверхности листа  $\alpha=200$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С). Определить среднюю безразмерную температуру в

момент времени  $\tau=2$  часа. ( $\bar{\theta} = \frac{\theta}{\theta_0} = \sum_{n=1}^{\infty} 2 \frac{\sin^2 n_i}{n_i^2 + n_i \sin n_i \cos n_i} e^{-n_i^2 Fo}$ )

3. Длинный стальной вал диаметром  $d=2R_0=120$  мм, который имел температуру  $t_0=20^\circ\text{C}$ , был помещен в печь с температурой  $t_{жс}=820^\circ\text{C}$ . Определить значения температур на поверхности и на оси вала по истечении 40 мин после загрузки вала в печь. Коэффициенты теплопроводности и температуропроводности стали равны соответственно  $\lambda=21$  Вт/(м·°С);  $a=6,11\cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с. Коэффициент теплоотдачи к поверхности вала  $\alpha=140$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

4. Стальная цилиндрическая болванка диаметром  $d=620$  мм, которая имела температуру  $t_0=600^\circ\text{C}$ , охлаждается в среде с постоянной температурой  $t_{жс}=20^\circ\text{C}$ . Определить количество теплоты  $Q_1$ , которое будет отдано цилиндром окружающей среде через 2,8 часа после начала охлаждения с 1 м длины болванки. Коэффициенты теплопроводности и температуропроводности и плотности стали равны соответственно  $\lambda=49$  Вт/(м·°С);  $a=1,4\cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с,  $\rho=7850$  кг/м<sup>3</sup>. Коэффициент теплоотдачи к поверхности вала  $\alpha=160$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

( $Q_1 = Q(1 - \mathcal{G}_{cp})$ , где изменение энтальпии  $Q = \pi R_0^2 l \rho c (t_{жс} - t_0)$  и средняя безразмерная

температура  $\mathcal{G}_{cp} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{4Bi}{n_i^2(n_i^2 + Bi^2)} e^{-n_i^2 Fo}$ .  $\mathcal{G}_{cp} = \frac{4Bi^2}{n_1(n_1^2 + Bi^2)} e^{-n_1^2 Fo}$  при  $Fo \geq 0,25$ .)

### Контрольная работа 2

#### Вариант 2

1. Лист стали толщиной  $2\delta=30$  мм, имеющий начальную температуру  $t_0=20^\circ\text{C}$ , помещен в печь с температурой  $t_{жс}=620^\circ\text{C}$  и нагревается до температуры  $t=420^\circ\text{C}$ . Коэффициент



теплопроводности, теплоемкость и плотность стали равны соответственно  $\lambda = 45 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$ ;  $c = 500 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С})$ ;  $\rho = 7800 \text{ кг}/\text{м}^3$ , а коэффициент теплоотдачи к поверхности листа  $\alpha = 22 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ . Определить время  $\tau$ , необходимое для нагревания листа стали.

2. Стальной лист толщиной 30 мм (теплоемкость  $c = 0,42 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С})$ , плотность  $\rho = 7000 \text{ кг}/\text{м}^3$ ) нагрет до  $400^\circ\text{С}$  и охлаждается в воздухе с температурой  $10^\circ\text{С}$  при коэффициенте теплоотдачи  $\alpha = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ . Через сколько часов температура листа на поверхности будет на  $11^\circ\text{С}$  отличаться от температуры воздуха? Сколько теплоты будет отдано с  $1 \text{ м}^2$  листа за время охлаждения?

3. Длинный стальной вал диаметром  $d = 140 \text{ мм}$ , который имел температуру  $t_0 = 25^\circ\text{С}$ , был помещен в печь с температурой  $t_{\text{жс}} = 720^\circ\text{С}$ . Определить значения температур на поверхности и на оси вала по истечении 80 мин после загрузки вала в печь расчетным путем и с помощью графиков. Коэффициенты теплопроводности и температуропроводности стали равны соответственно  $\lambda = 20 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$ ;  $a = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ . Коэффициент теплоотдачи к поверхности вала  $\alpha = 150 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

4. Колонна радиусом 0,15 м из бетона с начальной температурой  $30^\circ\text{С}$  охлаждается в воздухе с постоянной температурой  $-10^\circ\text{С}$ , коэффициент теплоотдачи равен  $4,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Найти температуры на поверхности, на оси колонны и на радиусе 10 см через 5 ч после начала охлаждения. Принять для бетона плотность  $1700 \text{ кг}/\text{м}^3$ , теплоемкость  $700 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ . Определить количество теплоты, которая будет отдана воздуху 1 м длины колонны за 5 ч процесса охлаждения.

## Приложение 2

### Оценочные средства для проведения промежуточной аттестации

**а) Планируемые результаты обучения и оценочные средства для проведения промежуточной аттестации:**

| Структурный элемент компетенции | Планируемые результаты обучения  | Оценочные средства  |
|---------------------------------|--|---|
| <b>ОПК-1</b>                    | <b>готовностью использовать фундаментальные общинженерные знания</b>   |   |
| Знать                           | <p>– Основные понятия термодинамики, теплофизики</p> <p>– методы решения основных теплофизических задач</p> <p>– сущность законов распространения тепла и массопереноса, их взаимосвязь, значение для развития современной техники</p> | <p>Вопросы к экзамену</p> <p>1. Основные сведения из термодинамики. Уравнение состояния. Внутренняя энергия, энтальпия, теплота, работа, теплоемкость. Первый и второй законы термодинамики. Основные уравнения одномерного течения газа: сплошности, импульсов, энергии.</p> <p>2. Основные сведения из механики газов. Режимы движения жидкости. Движение газов в каналах с низкой скоростью. Равновесие газа. Истечение газа через отверстия. Уравнение Бернулли.</p> <p>3. Струйное движение газа. Свободная струя. Ограниченные струи.</p> <p>4. Основные понятия и определения. Виды переноса теплоты и массы: теплопроводность, конвекция, излучение, диффузия. Тройная аналогия, как выражение общего закона переноса – принципа линейности Онзагера. Дифференциальные условия теплообмена.</p> <p>5. Теплопроводность. Градиент температур. Механизм переноса теплоты теплопроводностью в газах, жидкостях, металлах и неметаллах. Дифференциальные уравнения теплопроводности. Условия однозначности.</p> <p>6. Теплопроводность при стационарном режиме. Передача теплоты через плоскую стенку при граничных условиях I и III рода. Коэффициент теплопередачи, термическое сопротивление. Многослойная плоская стенка.</p> <p>7. Расчет температур в многослойной плоской стенке на стыке слоев. Расчет потерь теплоты через стены печей. Расчет толщины изоляции. Передача теплоты через цилиндрическую стенку при граничных условиях I и III рода. Многослойная цилиндрическая стенка. Критический диаметр изоляции.</p> <p>8. Теплопроводность при нестационарном режиме. Основные представления о методах решения задач при нестационарной теплопроводности. Теплопроводность бесконечной пластины. Анализ решения для предельных значений числа Био. Номограммы Д.В. Будрина.</p> |

| Структурный элемент компетенции | Планируемые результаты обучения | Оценочные средства  |
|---------------------------------|---------------------------------|---|
|                                 |                                 | <p>9. Теплопроводность цилиндра. Анализ решения. Определение количества теплоты, отдаваемой или воспринимаемой телом в нестационарном режиме. Нагревание (охлаждение) тел конечных размеров. Теорема о перемножении решений. Регулярный режим нагревания (охлаждения) тел.</p> <p>10. Основные положения конвективного теплообмена. Виды конвекции. Режимы движения жидкости. Пограничный слой.</p> <p>11. Система дифференциальных уравнений конвективного теплообмена: уравнение теплоотдачи, энергии, движения, сплошности. Условия однозначности.</p> <p>12. Подобие процессов конвективного теплообмена. Приведение уравнений конвективного теплообмена к безразмерному виду. Число подобия. Уравнения подобия. Условия подобия физических процессов. Теоремы подобия. Обобщение опытных данных и получение эмпирических уравнений.</p> <p>13. Теплоотдача при вынужденном движении жидкости. Теплоотдача при вынужденном продольном обтекании плоской поверхности. Гидродинамический и тепловой пограничные слои, соотношение их толщин. Теплоотдача при ламинарном пограничном слое. Теплоотдача при турбулентном пограничном слое. Струйное охлаждение</p> <p>14. Конвективный теплообмен при вынужденном течении жидкости в трубах и каналах. Особенности течения и теплообмена в трубах. Вязкостный и вязкостно-гравитационный режимы течения. Теплоотдача при ламинарном и турбулентном режимах течения. Теплоотдача в трубах некруглого сечения, в изогнутых трубах.</p> <p>15. Теплоотдача при свободном движении жидкости. Факторы, обуславливающие свободное движение. Теплоотдача при свободном движении вдоль вертикальной стенки, вблизи горизонтальных труб и пластин. Теплоотдача от ограждений печей.</p> <p>16. Теплообмен излучением. Основные понятия и законы. Природа теплового излучения. Виды лучистых потоков. Законы Планка, Вина, Стефана-Больцмана, Кирхгофа, Ламберта. Понятие о сером излучении.</p> <p>17. Теплообмен излучением между телами, разделенными прозрачной средой. Теплообмен излучением между телами с плоскопараллельными поверхностями.</p> |

| Структурный элемент компетенции | Планируемые результаты обучения  | Оценочные средства  |
|---------------------------------|--|---|
|                                 |  | <p><i>Теплообмен между телом и охватывающей оболочкой, системы с экранами. Угловые коэффициенты излучения, их свойства, методы определения. Зональный метод расчета лучистого теплообмена в печах.</i></p> <p><i>18. Теплообмен излучением в поглощающей среде. Закон Бугера. Уравнение переноса лучистой энергии. Излучение паров и газов. Расчет лучистого теплообмена между излучающей средой и поверхностью твердого тела. Понятие о сложном теплообмене. Числа радиационного подобия.</i></p>  |
| Уметь                           | <p>– пользоваться таблицами, учебной, справочной и методической литературой, составлять отчеты по выполненным экспериментальным работам, уметь делать выводы.</p> <p>– пользоваться современной научной аппаратурой для проведения теплофизических экспериментов;</p> <p>– строить графики экспериментальных зависимостей, анализировать графики зависимостей, полученных в эксперименте;</p> <p>– применять теплофизические законы для решения задач теоретического, экспериментального и прикладного характера</p> | <p><i>Контрольные вопросы и задания для самопроверки</i></p> <p><i>Вариант 1</i></p> <p><i>1. Какими путями может осуществляться обмен энергиями между закрытой ТД системой и внешней средой? (совершения работы и теплообмена)</i></p> <p><i>2. Энергия, передаваемая ТД системе внешними телами путем силового воздействия между телами, называется ... (работой).</i></p> <p><i>3. Энергия, передаваемая системе путем теплообмена, называется ... (теплотой).</i></p> <p><i>4. Запишите первое начало термодинамики. ( )</i></p> <p><i>5. Дайте определения: а) теплопроводности; б) конвекции; в) теплового излучения; г) конвективного теплообмена; д) конвективной теплоотдачи. а) Теплопроводность (молекулярный перенос теплоты в телах (или между ними), обусловленный переменностью температуры в рассматриваемом пространстве). б) Конвекция (процесс переноса теплоты при перемещении объемов жидкости или газа (текучей среды) в пространстве из области с одной температурой в область с другой. При этом перенос теплоты неразрывно связан с переносом самой среды). в) тепловое излучение (процесс распространения теплоты с помощью электромагнитных волн, обусловленный только температурой и оптическими свойствами излучающего тела; при этом внутренняя энергия тела (среды) переходит в энергию излучения). г) конвективный теплообмен (Совместный процесс переноса теплоты конвекцией и теплопроводностью). д) конвективная теплоотдача</i></p> |

| Структурный элемент компетенции | Планируемые результаты обучения | Оценочные средства  |
|---------------------------------|---------------------------------|---|
|                                 |                                 | <p>или теплоотдача (конвективный теплообмен между потоками жидкости или газа и поверхностью твердого тела).</p> <p>6. Сформулируйте законы Фурье, Ньютона, Фика.</p> <p>7. Запишите дифференциальное уравнение теплопроводности: 1) в общем виде (); 2) для плоской стенки при стационарном режиме при отсутствии внутренних источников тепла (); 3) для цилиндрической стенки при стационарном режиме при отсутствии внутренних источников тепла ().</p> <p>8. В чем заключаются условия однозначности? (Условия однозначности содержат геометрические, физические, временные и граничные условия. Геометрические условия определяют форму и размеры тела, в котором протекает изучаемый процесс. Физические условия задаются теплофизическими параметрами тела и распределением внутренних источников теплоты. Временные (начальные) условия содержат распределение температуры в теле в начальный момент времени. Граничные условия определяют особенности протекания процесса на поверхности тела).</p> <p>9. Чему равен коэффициент температуропроводности, входящий в дифференциальное уравнение теплопроводности? ()</p> <p>10. Опишите ламинарный и турбулентный режимы движения жидкости. (При ламинарном режиме отдельные струйки жидкости не перемешиваются друг с другом, или, иначе, каждая частичка жидкости движется параллельно стенке твердого тела (в частности, стенке канала). При турбулентном режиме каждая частица потока, участвуя в общем поступательном движении, кроме того, совершает различные поперечные движения, в связи с чем поток движется в виде беспорядочной массы, сильно возмущенной вихрями).</p> <p>11. Запишите систему дифференциальных уравнений конвективного теплообмена: уравнение теплоотдачи, уравнение энергии, уравнение движения вязкой жидкости, уравнение сплошности. (уравнение теплоотдачи - , уравнение энергии - , , , - уравнение движения вязкой жидкости, - уравнение сплошности).</p> <p>12. Как определить и что характеризует число Фурье? (Число Фурье характеризует нестационарность тепловых процессов)</p> |

| Структурный элемент компетенции | Планируемые результаты обучения | Оценочные средства  |
|---------------------------------|---------------------------------|---|
|                                 |                                 | <p>13. Какое число подобия является основным, зависящим от других чисел подобия, и что оно характеризует? (Число Нуссельта - безразмерный коэффициент теплоотдачи, характеризует интенсивность теплообмена на границе твердое тело – жидкость)</p> <p>14. Для тела, участвующего в лучистом теплообмене с другими телами, согласно закону сохранения энергии, можно составить следующие уравнения теплового баланса: .</p> <p>15. Запишите закон Стефана-Больцмана. (Закон Стефана-Больцмана для поверхностной плотности потока интегрального излучения (Вт/м<sup>2</sup>) выражается следующим соотношением: , где - константа излучения. Для удобства практических расчетов последняя зависимость представляется в виде , где - излучательная способность (коэффициент излучения) абсолютно черного тела.)</p> <p>16. Вычислите плотность теплового потока через длинную плоскую однородную стенку, если она выполнена из бетона <math>\lambda = 1,1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}</math>. Толщина стенки <math>\delta = 50 \text{ мм}</math>. Температуры на поверхностях стенки поддерживаются постоянными: <math>t_1 = 100^\circ\text{C}</math> и <math>t_2 = 90^\circ\text{C}</math>. Решение: Ответ: <math>q = 220 \text{ Вт/м}^2</math>.</p> <p>17. Для многих материалов зависимость коэффициента теплопроводности от температуры близка к линейной: , где - значение коэффициента теплопроводности при <math>0^\circ\text{C}</math>. Определите <math>\lambda</math> и <math>\alpha</math> для изоляции, выполненной из асботермита, для которого <math>\lambda_0 = 0,109 + 0,000146 \cdot t</math>. Ответ: <math>\lambda = 0,109, \alpha = 0,0013394 \text{ Вт/м}^2</math>.</p> <p>18. Определить термический коэффициент сопротивления кирпичной стены помещения толщиной в два кирпича (<math>\delta = 510 \text{ мм}</math>) с коэффициентом теплопроводности <math>\lambda = 0,8 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}</math>. Коэффициент теплоотдачи к внутренней поверхности стенки <math>\alpha_1 = 7,5 \text{ Вт/(м}^2\text{C)}</math>; коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности стены, обдуваемой ветром, <math>\alpha_2 = 20 \text{ Вт/(м}^2\text{C)}</math>. Ответ: <math>R_{\text{тер}} = 1,22</math>. Решение: термический коэффициент сопротивления определяется по формуле: .</p> <p>19. Пользуясь графиками, выполните следующие расчеты: 1) при заданном числе <math>Nu = 6</math> и числе <math>Pr = 0,5</math> определите температуру в середине плоской пластины; 2) при заданной температуре на поверхности пластины <math>t_{\text{поверх}} = 0,3</math> и</p> |

| Структурный элемент компетенции | Планируемые результаты обучения | Оценочные средства   |
|---------------------------------|---------------------------------|--|
|                                 |                                 | <p><math>\alpha = 0,5</math> определите продолжительность нагрева, т.е. <math>\tau</math>; 3) при заданном числе <math>N = 3</math> и температуре на оси цилиндра <math>t_{оси} = 0,05</math> определите интенсивность теплоотдачи, т. е. <math>q</math>. Ответ: <math>\tau = 0,08</math>, <math>N = 3</math>, <math>q = 0,6</math>.</p> <p>20. Необходимо опытным путем определить распределение температур в длинном стальном вале диаметром <math>d = 400</math> мм. Для стали коэффициент теплопроводности равен <math>\lambda = 42</math> Вт/(м·°С). Коэффициент теплоотдачи к валу в печи <math>\alpha = 116</math> Вт/(м<sup>2</sup>·°С). Исследование решено проводить в небольшой печи на геометрически подобной модели вала, выполненной из легированной стали. Для модели <math>\lambda = 16</math> Вт/(м·°С); <math>\alpha = 150</math> Вт/(м<sup>2</sup>·°С). Определить диаметр модели вала. Ответ: <math>d = 117,5</math> мм; <math>\tau = 1735</math> с. Решение: Подобие температурных полей вала и модели будет иметь место при равенстве <math>\alpha d</math> для образца и модели. Критерии Био для вала равны: <math>Bi = \alpha d</math>. Из условия находим диаметр модели вала: <math>d = 117,5</math> мм.</p> <p>21. Тонкая пластина длиной <math>L = 2</math> м и шириной <math>b = 1,5</math> м обтекается продольным потоком воздуха. Скорость и температура набегающего потока равны соответственно <math>v = 3</math> м/с; <math>t_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}</math>. Температура поверхности пластины <math>t_{поверх} = 90^{\circ}\text{C}</math>. Определить средний по длине пластины коэффициент теплоотдачи. Ответ: <math>\alpha = 4,87</math> Вт/(м<sup>2</sup>·°С). Решение: Для воздуха при <math>t_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}</math> <math>\nu = 15,06 \cdot 10^{-6}</math> м<sup>2</sup>/с; <math>\lambda = 2,59 \cdot 10^{-2}</math> Вт/(м·°С); <math>Pr = 0,703</math>. Число Рейнольдса <math>Re = 3,98 \cdot 10^5 &lt; 5 \cdot 10^5</math>, следовательно, режим течения в пограничном слое ламинарный. В этих условиях средняя по длине теплоотдача может быть рассчитана по формуле <math>\alpha = 0,67 (3,98 \cdot 10^5)^{1/2} (0,703)^{1/3} = 375</math> и коэффициент теплоотдачи <math>\alpha = 375 \cdot 2,59 \cdot 10^{-2} / 2 = 4,87</math> Вт/(м<sup>2</sup>·°С).</p> <p>22. Плоская пластина длиной <math>L = 1</math> м обтекается продольным потоком воздуха. Скорость и температура набегающего потока воздуха <math>v = 80</math> м/с и <math>t_{\infty} = 10^{\circ}\text{C}</math>. Перед пластиной установлена турбулизирующая решетка, вследствие чего движение в пограничном слое на всей длине пластины турбулентное. Вычислить среднее значение коэффициента теплоотдачи с поверхности пластины. Ответ: Средний коэффициент теплоотдачи <math>\alpha = 202</math> Вт/(м<sup>2</sup>·°С). Решение: При температуре набегающего потока <math>t_{\infty} = 10^{\circ}\text{C}</math> физические</p> |

| Структурный элемент компетенции | Планируемые результаты обучения   | Оценочные средства  |
|---------------------------------|---|---|
|                                 |   | <p>свойства воздуха: <math>\rho = 1,16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}</math>; <math>\lambda = 2,51 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})</math>. Число Рейнольдса <math>Re = 80 \cdot 1/1,16 \cdot 10^{-6} = 5,65 \cdot 10^6 &gt; 5 \cdot 10^5</math>. Режим движения в пограничном слое на пластине турбулентный. Среднее значение коэффициента теплоотдачи при обтекании пластины воздухом для турбулентного пограничного слоя можно вычислить по формуле . Подставив полученное значение числа Рейнольдса, получим <math>\alpha = 0,032(5,65 \cdot 10^6)^{0,8} = 8050</math> и <math>q = 8050 \cdot 2,51 \cdot 10^{-2} / 1 = 202 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})</math>.</p>   |
| Владеть                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>– методами решения типовых задач теплофизики;</li> <li>– навыками выполнения теплофизических экспериментов и оценки их результатов</li> <li>– практическими навыками решения задач теоретического, экспериментального и прикладного характера</li> </ul> | <p>Контрольные работы</p> <p>Вариант 1</p> <p>1. Плоскую поверхность необходимо изолировать так, чтобы потери теплоты с единицы поверхности в единицу времени не превышали <math>q = 650 \text{ Вт}/\text{м}^2</math>. Температура поверхности под изоляцией <math>t_1 = 400^\circ\text{С}</math>, температура внешней поверхности изоляции <math>t_2 = 40^\circ\text{С}</math>. Определить толщину изоляции для случая, когда изоляция выполнена из диатомитовой крошки, для которой <math>\lambda = 0,113 + 0,00023 \cdot t</math>.</p> <p>2. В нагревательной печи, где температура газов <math>t_{\text{газ}}</math>, стенка сделана из трех слоев: шамотного кирпича толщиной 70 мм, красного кирпича толщиной 250 мм и снаружи слоя изоляции толщиной <math>\delta</math>. Воздух в цехе имеет температуру <math>t_{\text{возд}}</math>. Коэффициент теплоотдачи в печи от газов к стенке <math>\alpha_{\text{газ}}</math>, снаружи от изоляции к воздуху <math>\alpha_{\text{возд}}</math>. Найти коэффициент теплопередачи от газов к воздуху, потери теплоты через стенку, температуры на поверхностях всех слоев. Построить график температур в стенке.</p> <p>Вариант 2      Материал<br/> изоляции <math>\lambda</math>, мм, <math>^\circ\text{С}</math>, <math>\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})</math>      Вари-<br/> ант <math>\alpha_{\text{газ}}</math>, <math>^\circ\text{С}</math>, <math>\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})</math></p> <p>2 Шлаковата 90      30      30      б      1400      130</p> <p>3. Железобетонная дымовая труба внутренним диаметром <math>d_{\text{вн}} = 800</math> мм и наружным диаметром <math>d_{\text{нар}} = 1300</math> мм должна быть футерована внутри огнеупором. Определить толщину футеровки и температуру наружной</p> |



| Структурный элемент компетенции | Планируемые результаты обучения | Оценочные средства   |
|---------------------------------|---------------------------------|--|
|                                 |                                 | <p>поверхности трубы из условий, чтобы тепловые потери с 1 м трубы не превышали 2000 Вт/м, а температура внутренней поверхности железобетонной стенки не превышала 200°С. Температура внутренней поверхности футеровки =425°С; коэффициент теплопроводности футеровки =0,5 Вт/(м·°С).; коэффициент теплопроводности бетона =1,1 Вт/(м·°С).</p> <p>4. По стальному трубопроводу наружным диаметром и толщиной 25 мм протекает газ со средней температурой и коэффициентом теплоотдачи в трубе =35 Вт/(м<sup>2</sup> К). Снаружи труба покрыта двумя слоями изоляции: слоем А толщиной (на поверхности трубы) и слоем Б толщиной . На внешней поверхности изоляции температура . Определить потери теплоты трубопроводом длиной и температуру на поверхности контакта между слоями изоляции.</p> <p>Вари-ант Слои<br/>         изоляции , мм , м<br/>         , 0С Вари-<br/>         ант , м<br/>         , 0С</p> <p>1 А – асбослюда,<br/>         Б - бетон 1000 40 500 а 200<br/>         250 50</p> <p>Контрольная работа 1</p> <p>Вариант 2</p> <p>1. Плоскую поверхность необходимо изолировать так, чтобы потери теплоты с единицы поверхности в единицу времени не превышали =600 Вт/м<sup>2</sup>. Температура поверхности под изоляцией =500°С, температура внешней поверхности изоляции =45°С. Определить толщину изоляции для случая, когда изоляция выполнена из новоасбозурита, для которого =0,144+0,00014 .</p> |

| Структурный элемент компетенции | Планируемые результаты обучения | Оценочные средства   |
|---------------------------------|---------------------------------|--|
|                                 |                                 | <p>2. В нагревательной печи, где температура газов <math>t_{г}</math>, стенка сделана из трех слоев: силикатного кирпича толщиной 40 мм, красного кирпича толщиной 350 мм и снаружи слоя изоляции толщиной <math>\delta_{из}</math>. Воздух в цехе имеет температуру <math>t_{в}</math>. Коэффициент теплоотдачи в печи от газов к стенке <math>\alpha_{гкст}</math>, снаружи от изоляции к воздуху <math>\alpha_{изкв}</math>. Найти коэффициент теплопередачи от газов к воздуху, потери теплоты через стенку, температуры на поверхностях всех слоев. Построить график температур в стенке.</p> <p>Вари-ант      Материал<br/> изоляции      , мм      , <math>^{\circ}\text{C}</math>      , <math>\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})</math>      Вари<br/> ант      , <math>^{\circ}\text{C}</math>      , <math>\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})</math><br/> 1 Асбест      100      27      25      а      1500      120</p> <p>3. Железобетонная дымовая труба внутренним диаметром <math>d_{вн} = 800</math> мм и наружным диаметром <math>d_{нар} = 1300</math> мм должна быть футерована внутри огнеупором. Определить толщину футеровки и температуру наружной поверхности трубы из условий, чтобы тепловые потери с 1 м трубы не превышали <math>2000 \text{ Вт}/\text{м}</math>, а температура внутренней поверхности железобетонной стенки не превышала <math>200^{\circ}\text{C}</math>. Температура внутренней поверхности футеровки <math>t_{фв} = 425^{\circ}\text{C}</math>; коэффициент теплопроводности футеровки <math>\lambda_{ф} = 0,5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})</math>; коэффициент теплопроводности бетона <math>\lambda_{б} = 1,1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})</math>.</p> <p>4. По стальному трубопроводу наружным диаметром <math>d_{нар}</math> и толщиной 25 мм протекает газ со средней температурой <math>t_{г}</math> и коэффициентом теплоотдачи в трубе <math>\alpha_{гкст} = 35 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})</math>. Снаружи труба покрыта двумя слоями изоляции: слоем А толщиной <math>\delta_{А}</math> (на поверхности трубы) и слоем Б толщиной <math>\delta_{Б}</math>. На внешней поверхности изоляции температура <math>t_{изв}</math>. Определить потери теплоты трубопроводом длиной <math>L</math> и температуру на поверхности контакта между слоями изоляции.</p> <p>Вари-ант      Слои<br/> изоляции      , мм      , м</p> |

| Структурный элемент компетенции | Планируемые результаты обучения | Оценочные средства   |
|---------------------------------|---------------------------------|--|
|                                 |                                 | <p>, 0С Вари-<br/>ант , м<br/>, 0С<br/>2 А – вермикулит,<br/>Б - асбест 1200 90 600 б 300<br/>180 60</p> <p>Контрольная работа 2</p> <p>Вариант 1</p> <p>1. Определить время , необходимое для нагрева листа стали толщиной =24 мм, который имел начальную температуру =25°С, а затем был помещен в печь с температурой =600°С. Нагрев считать законченным, когда температура листа достигнет значения =450°С. Коэффициент теплопроводности, теплоемкость и плотность стали соответственно =45,4 Вт/(м·°С); =0,502 кДж/(кг·°С); =7800 кг/м<sup>3</sup>, а коэффициент теплоотдачи к поверхности листа = 23,3 Вт/(м<sup>2</sup>·°С).</p> <p>2. Стальная пластина толщиной =400 мм нагревается в печи, имеющей постоянную температуру =800°С. Температура пластины в момент помещения ее в печь была всюду одинаковой и равной =30°С. Коэффициенты теплопроводности и температуропроводности стали равны соответственно =37,2 Вт/(м·°С); =7·10<sup>-6</sup> м<sup>2</sup>/с, коэффициент теплоотдачи к поверхности листа =200 Вт/(м<sup>2</sup>·°С). Определить среднюю безразмерную температуру в момент времени =2 часа. ( )</p> <p>3. Длинный стальной вал диаметром =120 мм, который имел температуру =20°С, был помещен в печь с температурой =820°С. Определить значения температур на поверхности и на оси вала по истечении 40 мин после загрузки вала в печь. Коэффициенты теплопроводности и температуропроводности стали равны соответственно =21 Вт/(м·°С); =6,11·10<sup>-6</sup> м<sup>2</sup>/с. Коэффициент теплоотдачи к поверхности вала =140 Вт/(м<sup>2</sup>·К).</p> <p>4. Стальная цилиндрическая болванка диаметром =620 мм, которая имела температуру =600°С, охлаждается в среде с постоянной температурой</p> |

| Структурный элемент компетенции | Планируемые результаты обучения | Оценочные средства  |
|---------------------------------|---------------------------------|---|
|                                 |                                 | <p><math>t = 20^{\circ}\text{C}</math>. Определить количество теплоты, которое будет отдано цилиндром окружающей среде через 2,8 часа после начала охлаждения с 1 м длины болванки. Коэффициенты теплопроводности и температуропроводности и плотности стали равны соответственно <math>\lambda = 49 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})</math>; <math>\alpha = 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}</math>, <math>\rho = 7850 \text{ кг}/\text{м}^3</math>. Коэффициент теплоотдачи к поверхности вала <math>\alpha_{\text{в}} = 160 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})</math>. (<math>\Delta t</math>, где изменение энтальпии и средняя безразмерная температура при <math>\text{Bi} = 0,25</math>.)</p> <p>Контрольная работа 2</p> <p>Вариант 2</p> <p>1. Лист стали толщиной <math>\delta = 30 \text{ мм}</math>, имеющий начальную температуру <math>t_0 = 20^{\circ}\text{C}</math>, помещен в печь с температурой <math>t_{\text{п}} = 620^{\circ}\text{C}</math> и нагревается до температуры <math>t_1 = 420^{\circ}\text{C}</math>. Коэффициент теплопроводности, теплоемкость и плотность стали равны соответственно <math>\lambda = 45 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})</math>; <math>c = 500 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})</math>; <math>\rho = 7800 \text{ кг}/\text{м}^3</math>, а коэффициент теплоотдачи к поверхности листа <math>\alpha = 22 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C})</math>. Определить время, необходимое для нагревания листа стали.</p> <p>2. Стальной лист толщиной 30 мм (теплоемкость <math>c = 0,42 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})</math>, плотность <math>\rho = 7000 \text{ кг}/\text{м}^3</math>) нагрет до <math>400^{\circ}\text{C}</math> и охлаждается в воздухе с температурой <math>10^{\circ}\text{C}</math> при коэффициенте теплоотдачи <math>\alpha = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C})</math>. Через сколько часов температура листа на поверхности будет на <math>11^{\circ}\text{C}</math> отличаться от температуры воздуха? Сколько теплоты будет отдано с 1 м<sup>2</sup> листа за время охлаждения?</p> <p>3. Длинный стальной вал диаметром <math>d = 140 \text{ мм}</math>, который имел температуру <math>t_0 = 25^{\circ}\text{C}</math>, был помещен в печь с температурой <math>t_{\text{п}} = 720^{\circ}\text{C}</math>. Определить значения температур на поверхности и на оси вала по истечении 80 мин после загрузки вала в печь расчетным путем и с помощью графиков. Коэффициенты теплопроводности и температуропроводности стали равны соответственно <math>\lambda = 20 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})</math>; <math>\alpha = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}</math>. Коэффициент теплоотдачи к поверхности вала <math>\alpha_{\text{в}} = 150 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})</math>.</p> <p>4. Колонна радиусом 0,15 м из бетона с начальной температурой <math>30^{\circ}\text{C}</math>.</p> |

| Структурный элемент компетенции  | Планируемые результаты обучения   | Оценочные средства   |
|--|---|--|
|  |   | <p><i>охлаждается в воздухе с постоянной температурой <math>-10^{\circ}\text{C}</math>, коэффициент теплоотдачи равен <math>4,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})</math>. Найти температуры на поверхности, на оси колонны и на радиусе <math>10 \text{ см}</math> через <math>5 \text{ ч}</math> после начала охлаждения. Принять для бетона плотность <math>1700 \text{ кг}/\text{м}^3</math>, теплоемкость <math>700 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})</math>. Определить количество теплоты, которая будет отдана воздуху <math>1 \text{ м}</math> длины колонны за <math>5 \text{ ч}</math> процесса охлаждения.</i></p>   |
| <p><b>ПК-4 готовностью использовать основные понятия, законы и модели термодинамики, химической кинетики, переноса тепла и массы</b></p> |   |  |
| <p>Знать</p>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>– основные закономерности процессов переноса тепла и массы</li> <li>– методы решения типовых теплофизических задач</li> <li>– сущность законов и моделей термодинамики, переноса тепла и массы, их взаимосвязь, значение для развития современной техники</li> </ul> | <p><i>Перечень тем для подготовки к практическим занятиям:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Основные понятия и определения. Виды переноса теплоты и массы: теплопроводность, конвекция, излучение, диффузия. Законы Фурье, Ньютона, Фика.</li> <li>2. Теплопроводность при стационарном режиме. Однослойная и многослойная плоская стенка плоская стенка.</li> <li>3. Распространение теплоты теплопроводностью в однородной однослойной и многослойной цилиндрической стенке.</li> <li>4. Теплопроводность при нестационарном режиме. Нестационарные процессы теплопроводности в неограниченной пластине.</li> <li>5. Нестационарные процессы теплопроводности в цилиндре.</li> <li>6. Основные положения конвективного тепло-массообмена. Основные понятия и определения. Ламинарный и турбулентный режимы движения жидкости. Пограничный слой.</li> <li>7. Подобие процессов конвективного теплообмена. Критерии подобия.</li> <li>8. Теплоотдача при вынужденном движении жидкости. Расчетные формулы для теплоотдачи при продольном обтекании пластины. Теплоотдача при движении потока внутри труб (каналов).</li> <li>9. Конвективный теплообмен при вынужденном течении жидкости в трубах и каналах. Особенности течения и теплообмена в трубах. Вязкостный и вязкостно-гравитационный режимы течения. Теплоотдача при ламинарном и турбулентном режимах течения. Теплоотдача в трубах некруглого сечения, в изогнутых трубах.</li> </ol> |

| Структурный элемент компетенции | Планируемые результаты обучения  | Оценочные средства  |
|---------------------------------|--|---|
|                                 |  | <p>10. Теплоотдача при свободном движении жидкости.</p> <p>11. Теплообмен излучением. Основные понятия и законы. Природа теплового излучения. Законы Планка, Вина, Стефана-Больцмана, Кирхгофа, Ламберта. Понятие о сером излучении.</p>  |
| Уметь                           | <p>– пользоваться таблицами, учебной, справочной и методической литературой, составлять отчеты по выполненным экспериментальным работам, уметь делать выводы.</p> <p>– пользоваться современной научной аппаратурой для проведения теплофизических экспериментов;</p> <p>– строить и анализировать математические модели теплопереноса</p> <p>– применять методы теплофизики для решения задач теоретического, экспериментального и прикладного характера;</p> <p>– описывать, рассчитывать и анализировать процессы переноса тепла и массы, выделять факторы, определяющие их интенсивность</p> | <p>Вариант 2</p> <p>1. Обмен энергиями между закрытой ТД системой и внешней средой может осуществляться путем ____ (совершения работы и теплообмена).</p> <p>2. Энергия, передаваемая ТД системе внешними телами путем силового воздействия между телами, называется ____ (работой).</p> <p>3. Энергия, передаваемая системе путем теплообмена, называется ____ (теплотой).</p> <p>4. Теплообмен возможен путем ____ (конвекции, теплопроводности, излучения).</p> <p>5. Запишите первое начало термодинамики ____ ( ).</p> <p>6. Что такое энтальпия ____ ( есть функция состояния. - энтальпию можно определить как функцию состояния, приращение которой при изобарическом процессе дает теплоту, полученную системой).</p> <p>7. Дайте определения: а) Теплопроводность ____ (молекулярный перенос теплоты в телах (или между ними), обусловленный переменной температурой в рассматриваемом пространстве). б) Конвекция ____ (процесс переноса теплоты при перемещении объемов жидкости или газа (текучей среды) в пространстве из области с одной температурой в область с другой. При этом перенос теплоты неразрывно связан с переносом самой среды). в) тепловое излучение - ____ (процесс распространения теплоты с помощью электромагнитных волн, обусловленный только температурой и оптическими свойствами излучающего тела; при этом внутренняя энергия тела (среды) переходит в энергию излучения). г) конвективный теплообмен ____ (Совместный процесс переноса теплоты конвекцией и теплопроводностью). д) конвективная теплоотдача или теплоотдача ____ (конвективный теплообмен между потоками жидкости или газа и поверхностью твердого тела). е) теплопередача ____ (процесс передачи теплоты от горячей жидкости к холодной через разделяющую их стенку).</p> |

| Структурный элемент компетенции | Планируемые результаты обучения | Оценочные средства  |
|---------------------------------|---------------------------------|---|
|                                 |                                 | <p>8. Сформулируйте законы Фурье, Ньютона, Фика.</p> <p>9. В чем заключается тройная аналогия (принцип линейности Онзагера) ____ (Закономерности всех трех процессов переноса могут быть обобщены и сформулированы следующим образом: поток субстанции пропорционален движущей силе, а коэффициентом пропорциональности является коэффициент переноса. Движущей силой в каждом случае является градиент объемной плотности соответствующей субстанции. В этой формулировке отражено существо известного в термодинамике необратимых процессов принципа линейности Онзагера, являющегося одним из общих принципов процессов переноса. Аналогия процессов молекулярного переноса импульса, тепла и массы при определенных условиях приводит к тождественности соответствующих дифференциальных уравнений и позволяет создать общую теорию процессов переноса).</p> <p>10. Запишите дифференциальное уравнение теплопроводности ____.( )</p> <p>11. В чем заключаются условия однозначности? ____ (Условия однозначности содержат геометрические, физические, временные и граничные условия. Геометрические условия определяют форму и размеры тела, в котором протекает изучаемый процесс. Физические условия задаются теплофизическими параметрами тела и и распределением внутренних источников теплоты. Временные (начальные) условия содержат распределение температуры в теле в начальный момент времени. Граничные условия определяют особенности протекания процесса на поверхности тела).</p> <p>12. Сформулируйте граничные условия I – IV рода ____ (Граничные условия I рода - задается распределение температуры на поверхности тела для каждого момента времени: . Граничные условия II рода - заданной является величина плотности теплового потока для каждой точки поверхности тела в любой момент времени, т.е. . Граничные условия III рода - задаются температуры среды и условия теплообмена этой среды с поверхностью тела. Для описания интенсивности теплообмена между поверхностью тела и средой используется гипотеза Ньютона-Рихмана . Граничные условия IV рода характеризуют условия теплообмена системы тел или тела с окружающей средой по закону теплопроводности и формулируются на</p> |

| Структурный элемент компетенции | Планируемые результаты обучения | Оценочные средства  |
|---------------------------------|---------------------------------|---|
|                                 |                                 | <p>основании равенства тепловых потоков, проходящих через поверхность соприкосновения тел, т. е. .</p> <p>13. Опишите ламинарный и турбулентный режимы движения жидкости, пограничный слой ____ (При ламинарном режиме отдельные струйки жидкости не перемешиваются друг с другом, или, иначе, каждая частичка жидкости движется параллельно стенке твердого тела (в частности, стенке канала). При турбулентном режиме каждая частица потока, участвуя в общем поступательном движении, кроме того, совершает различные поперечные движения, в связи с чем поток движется в виде беспорядочной массы, сильно возмущенной вихрями).</p> <p>14. Система дифференциальных уравнений конвективного теплообмена. Уравнение теплоотдачи. Уравнение энергии. Уравнение движения вязкой жидкости. Уравнение сплошности. (уравнение теплоотдачи - , уравнение энергии - , , , - уравнение движения вязкой жидкости, - уравнение сплошности).</p> <p>15. Из уравнения Навье-Стокса , используя гидромеханическое подобие, получите число Эйлера и число Рейнольдса . (Условия подобия . Из условия получим индикатор подобия . Из этого индикатора выводится число Эйлера: . Пользуясь правилом замещения одноименных величин, представим число Эйлера в виде , где - перепад давлений. Число Эйлера является мерой отношения перепада статических давлений (гидравлическое сопротивление) в потоке жидкости к динамическому давлению потока. Из условия получим индикатор подобия . Из этого индикатора получим число Рейнольдса: . Так как , где - кинематическая вязкость, то число Рейнольдса может быть записано в виде . Физический смысл числа легко выяснить, написав его в виде . Критерий Рейнольдса является мерой отношения динамического давления, к давлению силы вязкого трения.)</p> <p>16. Из уравнений , , используя тепловое подобие, получите число Фурье , число Пекле и число Нуссельта . (Условия подобия , . Из условия получим индикатор подобия . Этому индикатору соответствует число Фурье: , который характеризует нестационарность тепловых процессов. Число Фурье является безразмерным временем и выражает</p> |



| Структурный элемент компетенции | Планируемые результаты обучения | Оценочные средства   |
|---------------------------------|---------------------------------|--|
|                                 |                                 | <p><i>определенное соответствие между темпом изменения условий в окружающей среде и темпом перестройки температурного поля внутри тела. Из условия получим индикатор подобия . Из этого индикатора выводится число Пекле: . Число Пекле - критерий подобия температурных полей. В этот критерий не входит температура, но входит скорость. Следовательно, число Пекле, как и число Рейнольдса, характеризует кинематическую обстановку процесса. Для теплого подобия скоростные поля должны удовлетворять не только тому требованию, которое вытекает из условия , но и дополнительному требованию . Из условия получим индикатор подобия и соответствующее число Нуссельта . Число Нуссельта представляет собой безразмерный коэффициент теплоотдачи. Оно характеризует интенсивность теплообмена на границе твердое тело - жидкость. Число Нуссельта является определяемым, так как в него входит искомый коэффициент теплоотдачи (не входящий в условие однозначности.)</i></p> <p><i>17. Вычислить плотность теплового потока через плоскую однородную стенку, толщина которой значительно меньше ширины и высоты, если стенка выполнена из бетона <math>\lambda = 1,1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}</math>. Толщина стенки <math>\delta = 50 \text{ мм}</math>. Температуры на поверхностях стенки поддерживаются постоянными: <math>t_1 = 100^\circ\text{C}</math> и <math>t_2 = 90^\circ\text{C}</math>. Решение: Ответ: <math>q = 220 \text{ Вт/м}^2</math>.</i></p> <p><i>18. Плоскую поверхность необходимо изолировать так, чтобы потери теплоты с единицы поверхности в единицу времени не превышали <math>q = 450 \text{ Вт/м}^2</math>. Температура поверхности под изоляцией <math>t_1 = 450^\circ\text{C}</math>, температура внешней поверхности изоляции <math>t_2 = 50^\circ\text{C}</math>. Определить толщину изоляции для случая, если изоляция выполнена из асбоперлита, для которого <math>\lambda = 0,109 + 0,000146 \cdot t</math>. Ответ: <math>\delta = 130 \text{ мм}</math>. Решение: , где . Сравнивая и формулы для каждого материала, имеем значения и .</i></p> <p><i>19. Определить термический коэффициент сопротивления кирпичной стены помещения толщиной в два кирпича (<math>\delta = 510 \text{ мм}</math>) с коэффициентом теплопроводности <math>\lambda = 0,8 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}</math>. Коэффициент теплоотдачи к внутренней поверхности стенки <math>\alpha_1 = 7,5 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}</math>; коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности стены, обдуваемой ветром, <math>\alpha_2 = 20 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}</math>. Ответ: <math>R_{\text{тер}} = 1,22</math>. Решение: термический коэффициент</i></p> |

| Структурный элемент компетенции | Планируемые результаты обучения | Оценочные средства   |
|---------------------------------|---------------------------------|--|
|                                 |                                 | <p>сопротивления по формуле: <math>\alpha = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}}</math>.</p> <p>20. Пользуясь номограммами Будрина, выполните следующие расчеты:<br/> 1) при заданном числе <math>Nu = 6</math> и числе <math>Bi = 0,5</math> определите температуру <math>t_{ср} = 0,08</math> в середине плоской пластины;<br/> 2) при заданных температуре на поверхности пластины <math>t_{поверх} = 0,3</math> и <math>t_{ср} = 0,5</math> определите продолжительность нагрева, т.е. <math>\tau = 3</math>;<br/> 3) при заданных числе <math>Nu = 3</math> и температуре на оси цилиндра <math>t_{оси} = 0,05</math> определите интенсивность теплоотдачи, т.е. <math>\alpha = 0,6</math>.</p> <p>21. Резиновая пластина толщиной <math>\delta = 20</math> мм, нагретая до температуры <math>t_1 = 140^\circ\text{C}</math>, помещена в воздушную среду с температурой <math>t_2 = 15^\circ\text{C}</math>. Определить температуры в середине и на поверхности пластины через <math>\tau = 20</math> мин после начала охлаждения. Коэффициент теплопроводности резины <math>\lambda = 0,175</math> Вт/(м·°C), коэффициент температуропроводности резины <math>a = 0,833 \cdot 10^{-7}</math> м<sup>2</sup>/с, коэффициент теплоотдачи от поверхности пластины к окружающему воздуху <math>\alpha = 65</math> Вт/(м<sup>2</sup>·°C). Ответ: <math>t_{ср} = 25,4^\circ\text{C}</math>, <math>t_{поверх} = 47,5^\circ\text{C}</math>. Решение: Температуры в середине и на поверхности безграничной пластины при охлаждении (нагревании) в среде с постоянной температурой можно определить с помощью графиков <math>\tau_{ср}</math> и <math>\tau_{поверх}</math>. В рассматриваемом случае <math>\tau_{ср} = 3,73</math>, <math>\tau_{поверх} = 1</math>. При этих значениях критериев <math>Nu</math> и <math>Bi</math> по графикам находим <math>\alpha_{ср} = 0,26</math> и <math>\alpha_{поверх} = 0,083</math>. Безразмерная температура <math>\theta_{ср} = 15 + 0,26(140 - 15) = 47,5^\circ\text{C}</math>, <math>\theta_{поверх} = 15 + 0,083(140 - 15) = 25,4^\circ\text{C}</math>.</p> <p>22. Тонкая пластина длиной <math>L = 2</math> м и шириной <math>b = 1,5</math> м обтекается продольным потоком воздуха. Скорость и температура набегающего потока равны соответственно <math>v = 3</math> м/с; <math>t_2 = 20^\circ\text{C}</math>. Температура поверхности пластины <math>t_1 = 90^\circ\text{C}</math>. Определить средний по длине пластины коэффициент теплоотдачи. Ответ: <math>\alpha = 4,87</math> Вт/(м<sup>2</sup>·°C). Решение: Для воздуха при <math>t_2 = 20^\circ\text{C}</math> <math>\lambda = 15,06 \cdot 10^{-6}</math> м<sup>2</sup>/с; <math>\nu = 2,59 \cdot 10^{-2}</math> Вт/(м·°C); <math>\alpha = 0,703</math>. Число Рейнольдса <math>Re = 3,98 \cdot 10^5 &lt; 5 \cdot 10^5</math>, следовательно, режим течения в пограничном слое ламинарный. В этих условиях средняя по длине теплоотдача может быть рассчитана по формуле <math>\alpha_{ср} = \alpha_{поверх} \cdot \left( \frac{L}{\delta} \right)^{1/2}</math>, где <math>\delta</math> и <math>\alpha_{поверх}</math>, а физические свойства выбираются по температуре набегающего потока <math>t_2</math>. В рассматриваемом случае <math>\delta = 0,67</math> (3,98·10<sup>5</sup>)<sup>1/2</sup> (0,703)<sup>1/3</sup> = 375 и коэффициент теплоотдачи <math>\alpha_{ср} = 375 \cdot 2,59 \cdot 10^{-2}</math></p> |

| Структурный элемент компетенции | Планируемые результаты обучения  | Оценочные средства   |
|---------------------------------|--|--|
|                                 |  | <p><math>\lambda/2=4,87 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ }^\circ\text{C})</math>.</p> <p>23. Плоская пластина длиной <math>l=1\text{ м}</math> обтекается продольным потоком воздуха. Скорость и температура набегающего потока воздуха <math>v=80 \text{ м}/\text{с}</math> и <math>t=10^\circ\text{C}</math>. Перед пластиной установлена турбулизирующая решетка, вследствие чего движение в пограничном слое на всей длине пластины турбулентное. Вычислить среднее значение коэффициента теплоотдачи с поверхности пластины. Ответ: Средний коэффициент теплоотдачи <math>\alpha=202 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ }^\circ\text{C})</math>.<br/>Решение: При температуре набегающего потока <math>t=10^\circ\text{C}</math> физические свойства воздуха: <math>\nu=14,16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}</math>; <math>\lambda=2,51 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})</math>. Число Рейнольдса <math>Re=80 \cdot 1/14,16 \cdot 10^{-6}=5,65 \cdot 10^6 &gt; 5 \cdot 10^5</math>. Режим движения в пограничном слое на пластине турбулентный. Среднее значение коэффициента теплоотдачи при обтекании пластины воздухом для турбулентного пограничного слоя можно вычислить по формуле <math>\alpha=0,32(5,65 \cdot 10^6)^{0,8} \cdot 2,51 \cdot 10^{-2}/1=202 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ }^\circ\text{C})</math>.</p> <p>24. Необходимо опытным путем определить распределение температур в длинном стальном вале диаметром <math>d=400 \text{ мм}</math> через <math>t=2,5 \text{ ч}</math> после загрузки его в печь. Для стали коэффициенты теплопроводности и температуропроводности равны соответственно: <math>\lambda=42 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})</math>; <math>a=1,18 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}</math>. Коэффициент теплоотдачи к валу в печи <math>\alpha=116 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ }^\circ\text{C})</math>. Исследование решено проводить в небольшой печи на геометрически подобной модели вала, выполненной из легированной стали. Для модели <math>\lambda=16 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})</math>; <math>a=0,53 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}</math>; <math>\alpha=150 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ }^\circ\text{C})</math>. Определить диаметр модели вала и промежуток времени, через который после загрузки модели в печь необходимо измерить распределение температур в модели. Ответ: <math>d=117,5 \text{ мм}</math>; <math>t=1735 \text{ с}</math>.<br/>Решение: Подобие температурных полей вала и модели будет иметь место при равенстве критериев для образца и модели: <math>Bi</math> и <math>Four</math>. Критерии Био и Фурье для вала равны: <math>Bi_{\text{вал}}=116 \cdot 0,2/42=0,55</math>, <math>Four_{\text{вал}}=42 \cdot 2,5/1,18 \cdot 10^{-5} \cdot 400^2=3,5 \cdot 10^6</math>. Из условия находим диаметр модели вала: <math>d=117,5 \text{ мм}</math>. Из условия находим искомый промежуток времени: <math>t=1735 \text{ с}</math>.</p> |
| Владеть                         | – методами решения типовых задач термодинамики, химической кинетики, переноса тепла и массы; | Контрольные работы<br>Контрольная работа 1   |

| Структурный элемент компетенции | Планируемые результаты обучения   | Оценочные средства  |
|---------------------------------|---|---|
|                                 | <p>– методами решения типовых задач теплофизики</p> <p>– навыками выполнения теплофизических экспериментов и оценки их результатов. навыками расчета процессов конвективного тепло- и массопереноса, передачи тепла излучением и молекулярной теплопроводностью</p> | <p><i>Вариант 1</i></p> <p>1. Плоскую поверхность необходимо изолировать так, чтобы потери теплоты с единицы поверхности в единицу времени не превышали <math>q = 650 \text{ Вт/м}^2</math>. Температура поверхности под изоляцией <math>t_1 = 400^\circ\text{C}</math>, температура внешней поверхности изоляции <math>t_2 = 40^\circ\text{C}</math>. Определить толщину изоляции для случая, когда изоляция выполнена из диатомитовой крошки, для которой <math>\lambda = 0,113 + 0,00023 t</math>.</p> <p>2. В нагревательной печи, где температура газов <math>t_{\text{газ}}</math>, стенка сделана из трех слоев: шамотного кирпича толщиной 70 мм, красного кирпича толщиной 250 мм и снаружи слоя изоляции толщиной <math>\delta</math>. Воздух в цехе имеет температуру <math>t_{\text{возд}}</math>. Коэффициент теплоотдачи в печи от газов к стенке <math>\alpha_1</math>, снаружи от изоляции к воздуху <math>\alpha_2</math>. Найти коэффициент теплопередачи от газов к воздуху, потери теплоты через стенку, температуры на поверхностях всех слоев. Построить график температур в стенке.</p> <p><i>Вариант 2</i>      <i>Материал</i></p> <p>изоляции <math>\lambda</math>, мм, <math>0\text{C}</math>, <math>\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{K})</math>    <i>Вариант</i></p> <p>ант <math>t_1</math>, <math>0\text{C}</math>, <math>\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{K})</math></p> <p>2 Шлаковата 90      30      30      б      1400      130</p> <p>3. Железобетонная дымовая труба внутренним диаметром <math>d_{\text{вн}} = 800 \text{ мм}</math> и наружным диаметром <math>d_{\text{нар}} = 1300 \text{ мм}</math> должна быть футерована внутри огнеупором. Определить толщину футеровки и температуру наружной поверхности трубы из условий, чтобы тепловые потери с 1 м трубы не превышали <math>2000 \text{ Вт/м}</math>, а температура внутренней поверхности железобетонной стенки не превышала <math>200^\circ\text{C}</math>. Температура внутренней поверхности футеровки <math>t_1 = 425^\circ\text{C}</math>; коэффициент теплопроводности футеровки <math>\lambda = 0,5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})</math>; коэффициент теплопроводности бетона <math>\lambda_{\text{бет}} = 1,1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})</math>.</p> <p>4. По стальному трубопроводу наружным диаметром <math>d_{\text{нар}}</math> и толщиной 25 мм протекает газ со средней температурой <math>t_{\text{газ}}</math> и коэффициентом теплоотдачи в</p> |

| Структурный элемент компетенции | Планируемые результаты обучения | Оценочные средства   |
|---------------------------------|---------------------------------|--|
|                                 |                                 | <p>трубе <math>\lambda = 35 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})</math>. Снаружи труба покрыта двумя слоями изоляции: слоем А толщиной <math>\delta_A</math> (на поверхности трубы) и слоем Б толщиной <math>\delta_B</math>. На внешней поверхности изоляции температура <math>t_{\text{вн}}</math>. Определить потери теплоты трубопроводом длиной <math>L</math> и температуру на поверхности контакта между слоями изоляции.</p> <p>Вариант      Слои<br/> изоляции      , мм      , м<br/> , <math>^{\circ}\text{C}</math> Вари-<br/> ант      , м<br/> , <math>^{\circ}\text{C}</math><br/> I А – асбослюда,<br/> Б - бетон      1000    40      500    а      200<br/> 250    50</p> <p>Контрольная работа 1</p> <p>Вариант 2</p> <p>1. Плоскую поверхность необходимо изолировать так, чтобы потери теплоты с единицы поверхности в единицу времени не превышали <math>q = 600 \text{ Вт}/\text{м}^2</math>. Температура поверхности под изоляцией <math>t_{\text{вн}} = 500^{\circ}\text{C}</math>, температура внешней поверхности изоляции <math>t_{\text{вн}} = 45^{\circ}\text{C}</math>. Определить толщину изоляции для случая, когда изоляция выполнена из новоасбозурита, для которого <math>\lambda = 0,144 + 0,00014 t</math>.</p> <p>2. В нагревательной печи, где температура газов <math>t_{\text{г}}</math>, стенка сделана из трех слоев: силикатного кирпича толщиной 40 мм, красного кирпича толщиной 350 мм и снаружи слоя изоляции толщиной <math>\delta_{\text{из}}</math>. Воздух в цехе имеет температуру <math>t_{\text{в}}</math>. Коэффициент теплоотдачи в печи от газов к стенке <math>\alpha_{\text{г}}</math>, снаружи от изоляции к воздуху <math>\alpha_{\text{в}}</math>. Найти коэффициент теплопередачи от газов к воздуху, потери теплоты через стенку, температуры на поверхностях всех слоев. Построить график температур в стенке.</p> |

| Структурный элемент компетенции | Планируемые результаты обучения | Оценочные средства  |
|---------------------------------|---------------------------------|---|
|                                 |                                 | <p>Вариант      Материал<br/> изоляция      , мм      , 0С      , Вт/(м<sup>2</sup> К) Вари-<br/> ант      , 0С      , Вт/(м<sup>2</sup> К)</p> <p>1 Асбест      100      27      25      а      1500      120</p> <p>3. Железобетонная дымовая труба внутренним диаметром <math>t_{вн} = 800</math> мм и наружным диаметром <math>t_{нар} = 1300</math> мм должна быть футерована внутри огнеупором. Определить толщину футеровки и температуру наружной поверхности трубы из условий, чтобы тепловые потери с 1 м трубы не превышали 2000 Вт/м, а температура внутренней поверхности железобетонной стенки не превышала 200°C. Температура внутренней поверхности футеровки <math>t_{фв} = 425</math>°С; коэффициент теплопроводности футеровки <math>\lambda_{фв} = 0,5</math> Вт/(м·°С).; коэффициент теплопроводности бетона <math>\lambda_{б} = 1,1</math> Вт/(м·°С).</p> <p>4. По стальному трубопроводу наружным диаметром <math>t_{нар}</math> и толщиной 25 мм протекает газ со средней температурой <math>t_{ср}</math> и коэффициентом теплоотдачи в трубе <math>\alpha = 35</math> Вт/(м<sup>2</sup> К). Снаружи труба покрыта двумя слоями изоляции: слоем А толщиной <math>t_A</math> (на поверхности трубы) и слоем Б толщиной <math>t_B</math>. На внешней поверхности изоляции температура <math>t_{вн}</math>. Определить потери теплоты трубопроводом длиной <math>L</math> и температуру на поверхности контакта между слоями изоляции.</p> <p>Вариант      Слои<br/> изоляция      , мм      , м<br/> , 0С Вари-<br/> ант      , м<br/> , 0С</p> <p>2 А – вермикулит,<br/> Б - асбест      1200      90      600      б      300<br/> 180      60</p> <p>Контрольная работа 2</p> |

| Структурный элемент компетенции | Планируемые результаты обучения | Оценочные средства  |
|---------------------------------|---------------------------------|---|
|                                 |                                 | <p><i>Вариант 1</i></p> <p>1. Определить время , необходимое для нагрева листа стали толщиной <math>\delta = 24</math> мм, который имел начальную температуру <math>t_0 = 25^\circ\text{C}</math>, а затем был помещен в печь с температурой <math>t_{\text{печ}} = 600^\circ\text{C}</math>. Нагрев считать законченным, когда температура листа достигнет значения <math>t = 450^\circ\text{C}</math>. Коэффициент теплопроводности, теплоемкость и плотность стали равны соответственно <math>\lambda = 45,4 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})</math>; <math>c = 0,502 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})</math>; <math>\rho = 7800 \text{ кг}/\text{м}^3</math>, а коэффициент теплоотдачи к поверхности листа <math>\alpha = 23,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})</math>.</p> <p>2. Стальная пластина толщиной <math>\delta = 400</math> мм нагревается в печи, имеющей постоянную температуру <math>t_{\text{печ}} = 800^\circ\text{C}</math>. Температура пластины в момент помещения ее в печь была всюду одинаковой и равной <math>t_0 = 30^\circ\text{C}</math>. Коэффициенты теплопроводности и температуропроводности стали равны соответственно <math>\lambda = 37,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})</math>; <math>a = 7\cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}</math>, коэффициент теплоотдачи к поверхности листа <math>\alpha = 200 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})</math>. Определить среднюю безразмерную температуру в момент времени <math>\tau = 2</math> часа. ( )</p> <p>3. Длинный стальной вал диаметром <math>d = 120</math> мм, который имел температуру <math>t_0 = 20^\circ\text{C}</math>, был помещен в печь с температурой <math>t_{\text{печ}} = 820^\circ\text{C}</math>. Определить значения температур на поверхности и на оси вала по истечении 40 мин после загрузки вала в печь. Коэффициенты теплопроводности и температуропроводности стали равны соответственно <math>\lambda = 21 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})</math>; <math>a = 6,11\cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}</math>. Коэффициент теплоотдачи к поверхности вала <math>\alpha = 140 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})</math>.</p> <p>4. Стальная цилиндрическая болванка диаметром <math>d = 620</math> мм, которая имела температуру <math>t_0 = 600^\circ\text{C}</math>, охлаждается в среде с постоянной температурой <math>t_{\text{ср}} = 20^\circ\text{C}</math>. Определить количество теплоты <math>Q</math>, которое будет отдано цилиндром окружающей среде через 2,8 часа после начала охлаждения с 1 м длины болванки. Коэффициенты теплопроводности и температуропроводности и плотности стали равны соответственно <math>\lambda = 49 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})</math>; <math>a = 1,4\cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}</math>, <math>\rho = 7850 \text{ кг}/\text{м}^3</math>. Коэффициент теплоотдачи к поверхности вала <math>\alpha = 160 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})</math>. ( , где изменение энтальпии <math>\Delta h</math> и средняя безразмерная температура <math>\theta_{\text{ср}}</math> при <math>\theta = 0,25</math>.)</p> |

| Структурный элемент компетенции | Планируемые результаты обучения | Оценочные средства   |
|---------------------------------|---------------------------------|--|
|                                 |                                 | <p><i>Контрольная работа 2</i></p> <p><i>Вариант 2</i></p> <p>1. Лист стали толщиной <math>\delta = 30</math> мм, имеющий начальную температуру <math>t_0 = 20^\circ\text{C}</math>, помещен в печь с температурой <math>t_{\text{печ}} = 620^\circ\text{C}</math> и нагревается до температуры <math>t = 420^\circ\text{C}</math>. Коэффициент теплопроводности, теплоемкость и плотность стали равны соответственно <math>\lambda = 45 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})</math>; <math>c = 500 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})</math>; <math>\rho = 7800 \text{ кг}/\text{м}^3</math>, а коэффициент теплоотдачи к поверхности листа <math>\alpha = 22 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})</math>. Определить время <math>\tau</math>, необходимое для нагревания листа стали.</p> <p>2. Стальной лист толщиной 30 мм (теплоемкость <math>c = 0,42 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})</math>, плотность <math>\rho = 7000 \text{ кг}/\text{м}^3</math>) нагрет до <math>400^\circ\text{C}</math> и охлаждается в воздухе с температурой <math>t_{\text{возд}} = 10^\circ\text{C}</math> при коэффициенте теплоотдачи <math>\alpha = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})</math>. Через сколько часов температура листа на поверхности будет на <math>11^\circ\text{C}</math> отличаться от температуры воздуха? Сколько теплоты будет отдано с <math>1 \text{ м}^2</math> листа за время охлаждения?</p> <p>3. Длинный стальной вал диаметром <math>d = 140</math> мм, который имел температуру <math>t_0 = 25^\circ\text{C}</math>, был помещен в печь с температурой <math>t_{\text{печ}} = 720^\circ\text{C}</math>. Определить значения температур на поверхности и на оси вала по истечении 80 мин после загрузки вала в печь расчетным путем и с помощью графиков. Коэффициенты теплопроводности и температуропроводности стали равны соответственно <math>\lambda = 20 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})</math>; <math>a = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}</math>. Коэффициент теплоотдачи к поверхности вала <math>\alpha = 150 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})</math>.</p> <p>4. Колонна радиусом <math>r = 0,15</math> м из бетона с начальной температурой <math>30^\circ\text{C}</math> охлаждается в воздухе с постоянной температурой <math>-10^\circ\text{C}</math>, коэффициент теплоотдачи равен <math>4,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})</math>. Найти температуры на поверхности, на оси колонны и на радиусе 10 см через 5 ч после начала охлаждения. Принять для бетона плотность <math>1700 \text{ кг}/\text{м}^3</math>, теплоемкость <math>700 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})</math>. Определить количество теплоты, которая будет отдана воздуху 1 м длины колонны за 5 ч процесса охлаждения.</p> |



б) Порядок проведения промежуточной аттестации, показатели и критерии оценивания:

Промежуточная аттестация по дисциплине «Теплофизика» включает теоретические вопросы, позволяющие оценить уровень усвоения обучающимися знаний, и практические задания, выявляющие степень сформированности умений и владений, проводится в форме экзамена.

Экзамен по данной дисциплине проводится в устной форме по экзаменационным билетам, каждый из которых включает 2 теоретических вопроса и одно практическое задание.

**Показатели и критерии оценивания экзамена:**

– на оценку **«отлично»** (5 баллов) – обучающийся демонстрирует высокий уровень сформированности компетенций, всестороннее, систематическое и глубокое знание учебного материала, свободно выполняет практические задания, свободно оперирует знаниями, умениями, применяет их в ситуациях повышенной сложности.

– на оценку **«хорошо»** (4 балла) – обучающийся демонстрирует средний уровень сформированности компетенций: основные знания, умения освоены, но допускаются незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях, переносе знаний и умений на новые, нестандартные ситуации.

– на оценку **«удовлетворительно»** (3 балла) – обучающийся демонстрирует пороговый уровень сформированности компетенций: в ходе контрольных мероприятий допускаются ошибки, проявляется отсутствие отдельных знаний, умений, навыков, обучающийся испытывает значительные затруднения при оперировании знаниями и умениями при их переносе на новые ситуации.

– на оценку **«неудовлетворительно»** (2 балла) – обучающийся демонстрирует знания не более 20% теоретического материала, допускает существенные ошибки, не может показать интеллектуальные навыки решения простых задач.

– на оценку **«неудовлетворительно»** (1 балл) – обучающийся не может показать знания на уровне воспроизведения и объяснения информации, не может показать интеллектуальные навыки решения простых задач.