МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

«УТВЕРЖДАЮ»

Декан ФМАТ _____ Ряжских В.И.

31 августа 2021 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

дисциплины «Тепломассообмен при фазовых превращениях»

Направление подготовки:	13.06.01 Электро- и теплотехника
Направленность подготовки:	01.04.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника
Квалификация выпускника:	Исследователь. Преподаватель-исследователь
Нормативный период обучения:	4 года
Форма обучения:	Очная
Год начала подготовки:	2020

Автор программы: _____ Хвостов А.А.

Заведующий кафедрой
прикладной математики и механики: _____ Ряжских В.И.

Руководитель ОПОП: _____ Ряжских В.И.

Воронеж
2021

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

1.1. Цели дисциплины

Формирование компетенций, необходимых для овладения методами математического и физического моделирования переносов теплоты и массы при решении исследовательских и практических задач с фазовыми превращениями в одно- и многокомпонентных средах.

1.2. Задачи освоения дисциплины

- Изучить и научиться применять методы математического и физического моделирования для исследования тепломассообмена при фазовых превращениях в одно- и многокомпонентных средах.
- Изучить и научиться использовать методы проведения экспериментальных исследований и технических испытаний, связанных с процессами тепломассообмена при фазовых превращениях в одно- и многокомпонентных средах.
- Изучить и овладеть навыками критического анализа существующих и построения новых решений исследовательских и практических задач тепломассообмена при фазовых превращениях в одно- и многокомпонентных средах.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП

Дисциплина «Тепломассообмен при фазовых превращениях» относится к дисциплинам вариативной части блока Б1 «Дисциплины (модули)».

3. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Процесс изучения дисциплины «Тепломассообмен при фазовых превращениях» направлен на формирование следующих компетенций.

- **ПК-2.** Способность и готовность ставить и решать инновационные задачи, анализировать, искать и вырабатывать научно-обоснованные решения с использованием глубоких специальных знаний.
- **ПК-3.** Способность и готовность проводить инновационные исследования, технические испытания и (или) сложные эксперименты, разрабатывать соответствующие методики, формулировать выводы с применением глубоких теоретических и экспериментальных методов исследований, современных достижений науки и передовых технологий, строить и использовать модели с применением системного подхода для описания и прогнозирования различных явлений, осуществлять их качественный и количественный анализ, описывать результаты выполненной работы, составлять практические рекомендации по их использованию.
- **УК-1.** Способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях.

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции
ПК-2	**Знать** основные направления исследований тепломассообмена при фазовых превращениях в одно- и многокомпонентных средах и используемые в этой области методы математического моделирования. **Уметь** использовать методы математического моделирования для проведения исследований тепломассообмена при фазовых превращениях в одно- и многокомпонентных средах.

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции
	Владеть навыками применения методов математического моделирования для проведения исследований тепломассообмена при фазовых превращениях в одно- и многокомпонентных средах.
ПК-3	**Знать** основные методы экспериментальных исследований тепломассообмена при фазовых превращениях в одно- и многокомпонентных средах. **Уметь** использовать методы проведения экспериментальных исследований процессов тепломассообмена при фазовых превращениях в одно- и многокомпонентных средах. **Владеть** навыками проведения технических испытаний, связанных с процессами тепломассообмена при фазовых превращениях в одно- и многокомпонентных средах.
УК-1	**Знать** основные методы критического анализа и оценки новых и существующих решений задач тепломассообмена при фазовых превращениях в одно- и многокомпонентных средах. **Уметь** осуществлять критический анализ существующих решений задач тепломассообмена при фазовых превращениях в одно- и многокомпонентных средах. **Владеть** навыками построения новых решений исследовательских и практических задач тепломассообмена при фазовых превращениях в одно- и многокомпонентных средах.

4. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины «Тепломассообмен при фазовых превращениях» составляет 4 з.е.

4.1. Распределение трудоемкости дисциплины по видам занятий

Виды учебной работы	Всего часов	Семестры		
		4		
Аудиторные занятия, в том числе:	36	36		
Лекции	36	36		
Практические занятия	–	–		
Самостоятельная работа	108	108		
Часы на контроль	–	–		
Виды промежуточной аттестации: зачет с оценкой	+	+		
Общая трудоемкость:				
Академических часов	144	144		
Зачетных единиц	4	4		

5. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

5.1. Содержание разделов и распределение трудоемкости дисциплины

Содержание разделов дисциплины	Трудоемкость, часов			
	Л	ПЗ	СР	Итого
1. Основные понятия тепломассообмена. 1.1. Классификация процессов конвективного теплообмена. Основное содержание задач конвективного теплообмена. Связь молекулярного и конвективного переноса тепла. Физический смысл коэффициента теплоотдачи. Толщина эквивалентной пленки. Коэффициент теплоотдачи как гидродинамический параметр. 1.2. Качественные закономерности процесса и расчетные формулы для теплообмена в пограничном слое. Теплообмен при ламинарном обтекании плоской пластины. Число Прандтля. Теплообмен при турбулентном обтекании плоской пластины. 1.3. Качественные закономерности процесса и расчетные формулы для теплообмена при течении в каналах. Тепловой баланс, среднемассовая температура. Изменение закономерностей течения и теплообмена по длине трубы. Теплообмен при ламинарном течении в трубах. Теплообмен при турбулентном течении в круглой трубе	6	–	18	24
2. Математическое моделирование тепломассообмена. 2.1. Общая форма законов сохранения. Закон сохранения массы. Закон сохранения импульса. Тензоры плотности потока импульса, давлений и вязких напряжений. Различные формы дифференциального уравнения сохранения импульса. 2.2. Закон сохранения энергии. Вывод в общей форме. Плотность потока энергии. Различные формы дифференциального уравнения энергии. 2.3. Законы сохранения для смесей. Уравнение сохранения массы компонента в бинарной смеси. Молекулярный поток массы компонента в смеси. Влияние молекулярных потоков массы компонента на перенос импульса и энергии в смеси.	6	–	18	24
3. Основы теорий подобия и размерностей. 3.1. Подобие физических явлений. Теоремы теории подобия. Первая теорема теории подобия. Физический смысл критериев подобия. 3.2. Гидродинамические числа подобия. Числа подобия в процессах теплообмена. Числа подобия в процессах массообмена. Параметрические числа подобия (симплексы). 3.3. Практическое использование теории подобия. Теория подобия как научная основа экспериментальных исследований. Теория подобия и моделирование. Теория размерностей.	6	–	18	24
4. Теплообмен в пограничном слое при внешнем обтекании. 4.1. Уравнения температурного пограничного слоя. Теплообмен при ламинарном обтекании плоской пластины. Постановка задачи и анализ методами теории размерностей. Основные результаты задачи Блазиуса. 4.2. Точное решение задачи о теплообмене. Теплоотдача в предельных по числу Прандтля случаях. Переход к турбулентному течению. О результатах теоретического анализа. Анализ влияния различных факторов на турбулентный переход. Осредненные уравнения импульса и энергии при турбулентном течении. Осредненные уравнения в приближении пограничного слоя. 4.3. Механизм турбулентного переноса импульса и методы его моделирования. О внутренних масштабах турбулентного течения. Структура пристеночной турбулентной области. Моделирование переноса импульса в пристеночной турбулентной области. Теплообмен при турбулентном течении в пограничном слое. Аналогия Рейнольдса.	6	–	18	24
5. Теплообмен при свободной конвекции и в каналах. 5.1. Механизм и математическое описание свободной конвекции. Качественный анализ. Приближение Буссинеска. Математическое	6	–	18	24

Содержание разделов дисциплины		Трудоемкость, часов			
		Л	ПЗ	СР	Итого
описание свободной конвекции в приближениях Буссинеска и пограничного слоя. Максимальная скорость свободной конвекции. Оценка толщины свободноконвективного пограничного слоя. Теплообмен при свободной конвекции у вертикальной плоскости. 5.2. Теплообмен для круглой трубы. Общие закономерности стабилизированного течения и теплообмена. Гидродинамическая и тепловая (температурная) стабилизация. Влияние вида граничных условий на стабилизированный теплообмен.					
6. Тепломассообмен при фазовых превращениях. 6.1. Предмет, методы анализа и модели двухфазных систем. Универсальные условия совместности. Вывод в общей форме. Развернутая запись универсальных условий совместности. Универсальные условия совместности для частных случаев. 6.2. Универсальные условия совместности в системе отсчета наблюдателя. Скорость движения границы раздела фаз. Запись универсальных условий совместности в лабораторной системе отсчета. 6.3. Специальные условия совместности. Общие положения. Специальные условия совместности в квазиравновесном приближении. 6.4. Количественные характеристики двухфазных потоков в каналах. Паросодержание. Скорости компонент и плотность смеси. Гомогенная модель для трения.		6	–	18	24
Итого	Очная форма обучения	36	–	108	144

5.2. Перечень лабораторных работ

Проведение лабораторных работ не предусмотрено учебным планом.

6. ПРИМЕРНАЯ ТЕМАТИКА КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ (РАБОТ) И КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

Выполнение курсового проекта (работы) или контрольной работы не предусмотрено учебным планом.

7. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

7.1. Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание шкал оценивания

7.1.1. Этап текущего контроля

Результаты текущего контроля знаний и межсессионной аттестации обучающихся оцениваются по двухбалльной шкале:

- «аттестован»;
- «не аттестован».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Аттестован	Не аттестован
ПК-2	**Знать** основные направления исследований тепломассообмена при фазовых превращениях в одно- и многокомпонентных средах и используемые в этой области	Правильные ответы не менее чем на половину теоретических вопросов в тестах и задачах.	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах.	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах.

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Аттестован	Не аттестован
	методы математического моделирования.			
	Уметь использовать методы математического моделирования для проведения исследований тепломассообмена при фазовых превращениях в одно- и многокомпонентных средах.	Решение не менее половины стандартных задач в тестах и задачах.	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах.	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах.
	Владеть навыками применения методов математического моделирования для проведения исследований тепломассообмена при фазовых превращениях в одно- и многокомпонентных средах.	Решение не менее половины прикладных задач в тестах и задачах.	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах.	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах.
ПК-3	**Знать** основные методы экспериментальных исследований тепломассообмена при фазовых превращениях в одно- и многокомпонентных средах.	Правильные ответы не менее чем на половину теоретических вопросов в тестах и задачах.	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах.	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах.
	Уметь использовать методы проведения экспериментальных исследований процессов тепломассообмена при фазовых превращениях в одно- и многокомпонентных средах.	Решение не менее половины стандартных задач в тестах и задачах.	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах.	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах.
	Владеть навыками проведения технических испытаний, связанных с процессами тепломассообмена при фазовых превращениях в одно- и многокомпонентных средах.	Решение не менее половины прикладных задач в тестах и задачах.	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах.	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах.
УК-1	**Знать** основные методы критического анализа и оценки новых и существующих решений задач тепломассообмена при фазовых превращениях в одно- и многокомпонентных средах.	Правильные ответы не менее чем на половину теоретических вопросов в тестах и задачах.	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах.	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах.
	Уметь осуществлять критический анализ существующих решений задач тепломассообмена при фазовых превращениях в одно- и многокомпонентных средах.	Решение не менее половины стандартных задач в тестах и задачах.	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах.	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах.
	Владеть навыками построения новых решений исследовательских и практических задач тепломассообмена при фазовых превращениях в одно- и многокомпонентных средах.	Решение не менее половины прикладных задач в тестах и задачах.	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах.	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах.

7.1.2. Этап промежуточного контроля знаний

Результаты промежуточного контроля знаний обучающихся оцениваются по четырехбалльной шкале:

- «отлично»;
- «хорошо»;
- «удовлетворительно»;
- «неудовлетворительно».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Отлично	Хорошо	Удовл.	Неудовл.
ПК-2	**Знать** основные направления исследований тепломассообмена при фазовых превращениях в одно- и многокомпонентных средах и используемые в этой области методы математического моделирования.	Тестовые задания.	Выполнение тестовых заданий на 90-100%.	Выполнение тестовых заданий на 80-90%.	Выполнение тестовых заданий на 70-80%.	Выполнение тестовых заданий менее чем на 70%.
	Уметь использовать методы математического моделирования для проведения исследований тепломассообмена при фазовых превращениях в одно- и многокомпонентных средах.	Решение стандартных практических задач.	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы.	Верный ход решения всех задач, но верные ответы получены не во всех задачах.	Верный ход решения для большей части задач.	Большая часть задач не решена.
	Владеть навыками применения методов математического моделирования для проведения исследований тепломассообмена при фазовых превращениях в одно- и многокомпонентных средах.	Решение прикладных задач из конкретной предметной области.	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы.	Верный ход решения всех задач, но верные ответы получены не во всех задачах.	Верный ход решения для большей части задач.	Большая часть задач не решена.
ПК-3	**Знать** основные методы экспериментальных исследований тепломассообмена при фазовых превращениях в одно- и многокомпонентных средах.	Тестовые задания.	Выполнение тестовых заданий на 90-100%.	Выполнение тестовых заданий на 80-90%.	Выполнение тестовых заданий на 70-80%.	Выполнение тестовых заданий менее чем на 70%.
	Уметь использовать методы проведения экспериментальных исследований процессов тепломассообмена при фазовых превращениях в одно- и многокомпонентных средах.	Решение стандартных практических задач.	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы.	Верный ход решения всех задач, но верные ответы получены не во всех задачах.	Верный ход решения для большей части задач.	Большая часть задач не решена.

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Отлично	Хорошо	Удовл.	Неудовл.
	Владеть навыками проведения технических испытаний, связанных с процессами тепломассообмена при фазовых превращениях в одно- и многокомпонентных средах.	Решение прикладных задач из конкретной предметной области.	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы.	Верный ход решения всех задач, но верные ответы получены не во всех задачах.	Верный ход решения для большей части задач.	Большая часть задач не решена.
УК-1	**Знать** основные методы критического анализа и оценки новых и существующих решений задач тепломассообмена при фазовых превращениях в одно- и многокомпонентных средах.	Тестовые задания.	Выполнение тестовых заданий на 90-100%.	Выполнение тестовых заданий на 80-90%.	Выполнение тестовых заданий на 70-80%.	Выполнение тестовых заданий менее чем на 70%.
	Уметь осуществлять критический анализ существующих решений задач тепломассообмена при фазовых превращениях в одно- и многокомпонентных средах.	Решение стандартных практических задач.	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы.	Верный ход решения всех задач, но верные ответы получены не во всех задачах.	Верный ход решения для большей части задач.	Большая часть задач не решена.
	Владеть навыками построения новых решений исследовательских и практических задач тепломассообмена при фазовых превращениях в одно- и многокомпонентных средах.	Решение прикладных задач из конкретной предметной области.	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы.	Верный ход решения всех задач, но верные ответы получены не во всех задачах.	Верный ход решения для большей части задач.	Большая часть задач не решена.

7.2. Примерный перечень оценочных средств (типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности)

7.2.1. Примерный перечень заданий для подготовки к тестированию

1. Чем различаются внешние и внутренние задачи конвективного теплообмена?
2. Что является непосредственной целью решения задач конвективного теплообмена?
3. Как определяется коэффициент теплоотдачи, если поле температур найдено аналитически или численно?
4. Что такое толщина эквивалентной пленки?
5. Почему в процессах пузырькового и переходного кипения коэффициент теплоотдачи объективно не имеет физического содержания?
6. Какие требования определяют подобие физических явлений?
7. Что такое сходственные точки пространства?
8. Что утверждает первая теорема теории подобия?
9. Какой физический смысл имеют гидродинамические числа подобия?
10. Как определяется автомодельная переменная Блазиуса?
11. Какие виды свободной конвекции встречаются в природе и используются в технике?
12. Как соотносятся толщины динамического и температурного пограничных слоев при термогравитационной свободной конвекции?

13. При каких допущениях обычно рассматривается математическое описание теплообмена в круглой трубе?
14. В каких случаях при анализе теплообмена в трубе необходимо учитывать эффект осевой теплопроводности?
15. В каких промышленных технологиях имеют дело с многофазными системами?
16. Что представляют собой межфазные границы и как они интерпретируются при математическом описании?
17. Для каких парожидкостных систем подходит модель раздельного течения и в чем ее основные положения?
18. Каковы объективные ограничения применимости модели взаимопроникающих континуумов?

7.2.2. Примерный перечень заданий для решения стандартных задач

1. Плоскую поверхность необходимо изолировать так, чтобы потери теплоты с единицы поверхности в единицу времени не превышали 450 Вт/м^2. Температура поверхности под изоляцией t_1 = 450 °С, температура внешней поверхности изоляции t_2 = 50 °С. Определить толщину изоляции, если $\lambda = 0{,}09 + 0{,}0000874t$ Вт/(м·К).
2. Вычислить тепловые потери через 1 м^2 двухслойной плоской стенки и температуру в плоскости соприкосновения слоев, если известно, что: δ_1 = 125 мм; δ_2 = 500 мм; t_1 = 1100 °С; t_3 = 50 °С; $\lambda_1 = 0{,}28+0{,}00023t$; λ_2 = 0,7 Вт/(м·К).
3. Определить тепловые потери через 1 м длины трехслойной цилиндрической стенки и температуры на границе соприкосновения слоев если известно, что: δ_1 = 5 мм; $\delta_2 = \delta_3$ = 50 мм; λ_1 = 50 Вт/(м·К); λ_2 = 0,06 Вт/(м·К); λ_3 = 0,12 Вт/(м·К); t_1 = 250 °С; t_4 = 50 °С; d = 100 мм.
4. Вычислить потери теплоты с 1 м неизолированного трубопровода с внутренним и наружным диаметрами d_1/d_2 = 150/160 мм, проложенного на открытом воздухе, если внутри трубы протекает вода со средней температурой t_1 = 90 °С при температуре окружающего воздуха t_2 = −15 °С. Для материала трубы λ = 50 Вт/(м·К); α_1 = 1000 Вт/(м^2·К); α_2 = 12 Вт/(м^2·К). Определить также температуру на внешней и внутренней поверхностях трубы.
5. Определить время, необходимое для нагрева листа стали толщиной 2δ = 24 мм, который имел начальную температуру t_0 = 25 °С, а затем помещён в печь с температурой t_1 = 600 °С. Нагрев считать законченным, когда температура листа достигнет значения t_2 = 450 °С. Для стали: λ = 45,4 Вт/(м·К); c_p = 0,502 кДж/(кг·К); ρ = 7800 кг/м^3; α = 23,3 Вт/(м^2·К).
6. Длинный стальной вал диаметром $d = 2r$ = 120 мм, имеющий температуру t_0 = 20 °С помещён в печь с t_1 = 820 °С. Определить время нагрева вала до $t_{r=0}$ = 800 °С. Определить также температуру на поверхности вала $t_{r=60}$ в конце нагрева. Для вала: λ = 21 Вт/(м·К); $a = 6{,}11\cdot10^{-6}$ м^2/с; α = 140 Вт/(м^2·К).
7. Слиток в форме параллелепипеда размерами 200×400×500 мм с начальной температурой t_0 = 20 °С был помещён в печь с температурой t_1 = 1400 °С. Определить температуру в центре слитка через 1,5 часа. Для слитка: λ = 37,2 Вт/(м·К); $a = 6{,}94\cdot10^{-6}$ м^2/с; α = 168 Вт/(м^2·К).
8. Стальная цилиндрическая болванка диаметром 80 мм и длиной 160 мм была равномерно нагрета до t_0 = 800 °С. Болванка охлаждается на воздухе с t_1 = 30 °С. Определить температуру в центре болванки и в середине торцевой поверхности через 30 мин после начала охлаждения, если известно, что: λ = 23,3 Вт/(м^2·К); $a = 6{,}11\cdot10^{-6}$ м^2/с; α = 118 Вт/(м^2·К).
9. Определить коэффициент теплоотдачи от вертикальной плиты высотой h = 2 м к окружающему воздуху, если температура поверхности плиты t_0 = 100 °С, а температура окружающего воздуха вдали от поверхности плиты t_1 = 20 °С.

7.2.3. Примерный перечень заданий для решения прикладных задач

1. Определить эквивалентный коэффициент теплопроводности и плотность теплового потока через вертикальную щель толщиной $\delta = 20$ мм, заполненную воздухом. Температура горячей стенки щели $t_1 = 200$ °С, а холодной $t_2 = 80$ °С.
2. Определить значение коэффициента теплоотдачи и количество передаваемой теплоты за 1 с при течении воды в горизонтальной трубе диаметром $d = 10$ мм длиной $l = 1{,}2$ м, если средние по длине температуры воды и стенки трубы соответственно равны: $t_0 = 30$ °С, $t_1 = 60$ °С, а расход воды $G = 7 \cdot 10^{-3}$ кг/с.
3. Какой длины необходимо использовать трубу диаметром $d = 18$ мм для нагрева воды от $t_1 = 5$ °С до $t_2 = 55$ °С, при заданных температуре стенки трубы $t_0 = 70$ °С и расходе воды $G = 72$ кг/ч.
4. Определить коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к охлаждающей воде, если внутренний диаметр трубы $d = 16$ мм, температура стенки $t_0 = 28$ °С, а вода нагревается от $t_1 = 10$ °С до $t_2 = 18$ °С при средней скорости течения $w = 2$ м/с.
5. По трубе внутренним диаметром $d = 18$ мм движется вода со скоростью $w = 1{,}2$ м/с, нагреваясь от $t_1 = 15$ °С до $t_2 = 45$ °С от стенок трубы с температурой $t_0 = 90$ °С. Определить плотность теплового потока и коэффициент теплоотдачи от трубы к воде, если известно, что длина трубы много больше ее диаметра $l > 50d$.
6. Труба диаметром $d = 20$ мм охлаждается потоком воды, движущейся со скоростью $w = 0{,}8$ м/с. Определить коэффициент теплоотдачи от поверхности трубы к охлаждающей воде для средней температуры воды $t_1 = 10$ °С и температуры стенок трубы $t_0 = 50$ °С.
7. Пучок труб с шахматным расположением обтекается поперечным потоком трансформаторного масла со скоростью $w = 0{,}6$ м/с при температуре $t_1 = 40$ °С. Определить коэффициент теплоотдачи от стенок труб к потоку масла, если он обтекает трубы с внешним диаметром $d = 20$ мм под углом $\varphi = 90°$ при температуре стенок труб $t_0 = 90$ °С.
8. Пучок труб с коридорным расположением обтекается потоком трансформаторного масла со скоростью $w = 0{,}6$ м/с при температуре $t_1 = 40$ °С. Определить коэффициент теплоотдачи от стенок труб к потоку масла, если он обтекает трубы с внешним диаметром $d = 20$ мм под углом $\varphi = 90°$ при температуре стенок труб $t_0 = 90$ °С.
9. На наружной поверхности горизонтальной трубы диаметром $d = 20$ мм и длиной $l = 2$ м конденсируется сухой насыщенный водяной пар при давлении $P = 100$ кПа. Температура поверхности трубы $t_0 = 94{,}5$ °С. Определить средний коэффициент теплоотдачи от пара к трубе и количество конденсирующегося пара.

7.2.4. Примерный перечень вопросов для подготовки к зачету с оценкой

1. Почему на качественные закономерности конвективного теплообмена влияет не только режим течения, но и абсолютное значение скорости потока (в газах)?
2. Как связаны молекулярный и конвективный потоки энергии в случае стабилизированного теплообмена в канале?
3. Что является непосредственной целью решения задач конвективного теплообмена?
4. Как определяется коэффициент теплоотдачи, если поле температур найдено аналитически или численно?
5. Что такое толщина эквивалентной пленки? В какой мере эта величина определяет физический смысл коэффициента теплоотдачи?
6. В каком смысле коэффициент теплоотдачи — гидродинамический параметр?
7. Почему в процессах пузырькового и переходного кипения коэффициент теплоотдачи объективно не имеет физического содержания?
8. Какие закономерности формирования динамического пограничного слоя на плоской пластине установлены Блазиусом?

9. Как влияет на толщину пограничного слоя кинематическая вязкость жидкости? Какой коэффициент переноса играет в процессах теплообмена роль, аналогичную роли кинематической вязкости при переносе импульса?
10. Какие требования определяют подобие физических явлений?
11. Как определяются сходственные моменты времени в периодических и переходных процессах?
12. Чем различаются подобие и аналогия?
13. Какие числа подобия получаются из уравнений сохранения импульса и энергии при преобразовании их к безразмерной форме с использованием естественных масштабов?
14. Что понимается под группой подобных явлений, для которых могут быть получены идентичные уравнения подобия?
15. Как формулируются необходимые и достаточные условия подобия физических явлений?
16. Какой физический смысл имеют гидродинамические числа подобия?
17. Как определяется число Галилея и какие числа подобия могут быть получены на его основе?
18. Каковы исходные положения теории пограничного слоя, разработанной Прандтлем? К каким упрощениям математического описания они приводят?
19. Как определяются понятия температурного и диффузионного пограничных слоев?
20. Как записывается система уравнений теплообмена в приближении пограничного слоя?
21. Какие параметры и как могут быть приближенно (с точностью до коэффициентов) определены из системы уравнений пограничного слоя методами анализа размерностей?
22. Что такое автомодельное решение? Как определяется автомодельная переменная Блазиуса?
23. Как преобразуется система уравнений динамического пограничного слоя при использовании переменной Блазиуса и безразмерной функции тока?
24. Как изменяется скорость течения в пограничном слое вблизи стенки (при малых η)?
25. Какую практически важную информацию несет величина $f''(0)$ в решении Блазиуса?
26. Как связаны поля безразмерной скорости и безразмерной температуры при ламинарном обтекании изотермической плоской пластины и почему?
27. Как решается уравнение энергии для теплообмена при обтекании изотермической пластины?
28. Какие виды свободной конвекции встречаются в природе и используются в технике?
29. Как соотносятся толщины динамического и температурного пограничных слоев при термогравитационной свободной конвекции?
30. В чем суть и практическая значимость приближения Буссинеска для свободной конвекции?
31. Как получена система уравнений свободноконвективного пограничного слоя? Каким путем из уравнения импульса исключен (в явном виде) градиент продольного давления?
32. Какой смысл имеет максимальная скорость свободной конвекции, как выводится формула для расчета этой величины?
33. Какие оценки для толщин динамического и температурного пограничного слоя следуют из уравнений движения и энергии свободноконвективного пограничного слоя?
34. При каких условиях уравнения свободноконвективного погранслоя на вертикальной плоскости идентичны для подъемного и опускного течения?
35. При каких допущениях обычно рассматривается математическое описание теплообмена в круглой трубе? К каким упрощениям приводит приближение длинной трубы?

36. В каких случаях при анализе теплообмена в трубе необходимо учитывать эффект осевой теплопроводности?
37. Что является условием гидродинамической стабилизации при течении в трубах? Как упрощается математическое описание для стабилизированного течения?
38. Как выражается условие стабилизации теплообмена в канале и как оно зависит от вида граничных условий?
39. Как изменяется температура жидкости при стабилизированном теплообмене в случае изотермической стенки? Как в этом случае рассчитывается средняя по длине плотность теплового потока?
40. Что включает в себя математическое описание газожидкостных систем?
41. С чем связаны принципиальные трудности строгого моделирования газожидкостных систем и какие альтернативные подходы используются на практике?
42. В чем существо гомогенной модели двухфазной системы и в каких случаях гомогенное приближение дает хорошие результаты?
43. Для каких парожидкостных систем подходит модель раздельного течения и в чем ее основные положения?
44. Что такое модель многоскоростного континуума и каковы объективные ограничения ее применимости?
45. В чем существо метода контрольной ячейки и как он используется в анализе двухфазных систем?

7.2.6. Методика выставления оценки при проведении промежуточной аттестации

На основании вопросов для подготовки к зачету с оценкой или экзамену формируются билеты. В каждом билете содержатся три теоретических вопроса и три задачи из разных разделов дисциплины.

Зачет с оценкой или экзамен проводятся по смешанной системе (письменно-устно). Обучающийся должен дать полный письменный ответ на билет. Затем преподаватель беседует со обучающимся. Возможны уточняющие вопросы.

Каждый ответ на вопрос и решение каждой задачи оценивается баллами от 0 до 3, в соответствии с критериями пункта 7.1.2. Максимальное количество набранных баллов – 18.

- Оценка «Неудовлетворительно» ставится в случае, если даны правильные ответы только на теоретические вопросы или решены только практические и прикладные задачи, или студент набрал менее 10 баллов.
- Оценка «Удовлетворительно» ставится в случае, если студент набрал 10-13 баллов.
- Оценка «Хорошо» ставится в случае, если студент набрал 14-16 баллов.
- Оценка «Отлично» ставится в случае, если студент набрал 17-18 баллов.

7.2.7. Паспорт оценочных материалов

№ п/п	Контролируемые разделы (темы) дисциплины	Код контролируемой компетенции	Наименование оценочного средства
1	Основные понятия тепломассообмена.	ПК-2, ПК-3, УК-1	Тест, зачёт с оценкой
2	Математическое моделирование тепломассообмена.	ПК-2, ПК-3, УК-1	Тест, зачёт с оценкой
3	Основы теорий подобия и размерностей.	ПК-2, ПК-3, УК-1	Тест, зачёт с оценкой
4	Теплообмен в пограничном слое при внешнем обтекании.	ПК-2, ПК-3, УК-1	Тест, зачёт с оценкой

№ п/п	Контролируемые разделы (темы) дисциплины	Код контролируемой компетенции	Наименование оценочного средства
5	Теплообмен при свободной конвекции и в каналах.	ПК-2, ПК-3, УК-1	Тест, зачёт с оценкой
6	Тепломассообмен при фазовых превращениях.	ПК-2, ПК-3, УК-1	Тест, зачёт с оценкой

7.3. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Тестирование осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных тест-заданий на бумажном носителе. Время тестирования 30 мин. Затем осуществляется проверка теста экзаменатором и выставляется оценка согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение стандартных задач осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач экзаменатором и выставляется оценка, согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение прикладных задач осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач экзаменатором и выставляется оценка, согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

8. УЧЕБНО МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

8.1. Перечень учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины

1. Архипов, В.А. Физико-химические основы процессов тепломассообмена : учебное пособие / В.А. Архипов. — Томск: ТПУ, 2015. — 199 с. — URL: https://e.lanbook.com/book/82841
2. Буш, А.А. Фазовые диаграммы, одно-, двух- и трёхкомпонентных систем : учебное пособие / А.А. Буш. — М.: РТУ МИРЭА, 2019. — 75 с. — URL: https://e.lanbook.com/book/171472
3. Горбачев, М.В. Тепломассообмен : учебное пособие / М.В. Горбачев. — Новосибирск: НГТУ, 2015. — 443 с. — URL: https://e.lanbook.com/book/118074
4. Левицкий, И.А. Применение современных программно-вычислительных комплексов для решения задач тепломассообмена в промышленных агрегатах. Модели физических процессов в Ansys Fluent : учебник / И.А. Левицкий. — М.: МИСИС, 2021. — 500 с. — URL: https://e.lanbook.com/book/263504
5. Сахин, В.В. Теплообмен при фазовых превращениях теплоносителей (теплопередача) : учебное пособие / В.В. Сахин. — СПб.: БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, 2018. — 123 с. — URL: https://e.lanbook.com/book/122089
6. Скрипов, В.П. Фазовые переходы кристалл-жидкость-пар и термодинамическое подобие : учебное пособие / В.П. Скрипов, М.З. Файзуллин. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. — 160 с. — URL: https://e.lanbook.com/book/59358
7. Сокотущенко, В.Н. Физико-математическая модель фильтрации многокомпонентной смеси с учетом неравновесности фазовых переходов : учебное пособие / В.Н. Сокотущенко. — Дубна: ГУ «Дубна», 2018. — 74 с. — URL: https://e.lanbook.com/book/154515

8. Теория тепломассообмена : учебное пособие / С. И. Исаев, И. А. Кожинов, В. И. Кофанов [и др.] ; под редакцией А. И. Леонтьева. — 3-е изд. — М.: МГТУ им. Баумана, 2018. — 462 с. — URL: https://e.lanbook.com/book/106409

8.2. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень лицензионного программного обеспечения, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем

1	Операционные системы, средства работы с веб-сайтами, поисковые системы, средства работы с текстовой, графической и видео информацией	Лицензионное ПО: Windows 7 и выше. Свободное ПО: Astra Linux Common Edition, Mozilla Firefox, Yandex, OpenOffice или LibreOffice, VLC media player.
2	Системы компьютерной математики	Лицензионное ПО: Maple 14. Свободное ПО: Wolfram Alpha, Maxima+wxMaxima.
3	Научная библиотека и ЭИОС ВГТУ	https://cchgeu.ru/
4	Электронные библиотеки, профессиональные базы данных и информационные справочные системы	https://www.elibrary.ru https://e.lanbook.com https://www.iprbookshop.ru

9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

Для проведения лекционных занятий необходимы учебные аудитории, оснащенные доской и проекционным оборудованием.

10. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

По дисциплине «Тепломассообмен при фазовых превращениях» читаются лекции и организуется самостоятельная работа. Основой изучения дисциплины являются лекции, на которых излагаются наиболее существенные и трудные вопросы, а также вопросы, не нашедшие отражения в учебной литературе.

Самостоятельные занятия обучающихся направлены на приобретение практических навыков использования понятийного аппарата для решения как стандартных задач, так и задач прикладного характера.

Вид учебных занятий	Деятельность студента
Лекция	Написание конспекта лекций: кратко, схематично, последовательно фиксировать основные положения, выводы, формулировки, обобщения; помечать важные мысли, выделять ключевые слова, термины. Проверка терминов, понятий с помощью энциклопедий, словарей, справочников с выписыванием толкований в тетрадь. Обозначение вопросов, терминов, материала, которые вызывают трудности, поиск ответов в рекомендуемой литературе. Если самостоятельно не удается разобраться в материале, необходимо сформулировать вопрос и задать преподавателю на лекции или на практическом занятии.

Вид учебных занятий	Деятельность студента
Самостоятельная работа	Самостоятельная работа обучающихся способствует глубокому усвоению учебного материала и развитию навыков самообразования. Самостоятельная работа предполагает следующие составляющие: • работа с текстами: конспектами лекций, учебниками, справочниками, дополнительной литературой; • решение задач и выполнение расчетов; • работа над темами для самостоятельного изучения; • участие в работе студенческих научных конференций, олимпиад; • подготовка к промежуточной аттестации.
Подготовка к промежуточной аттестации	Готовиться к промежуточной аттестации следует систематически, на протяжении всего семестра. Интенсивная подготовка должна начаться не позднее, чем за месяц-полтора до промежуточной аттестации. Последние два-три дня непосредственно перед экзаменом следует использовать для повторения и систематизации изученного ранее материала.