

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
БОРИСОГЛЕБСКИЙ ФИЛИАЛ
(БФ ФГБОУ ВО «ВГУ»)

МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ
Физика тепло- и массопереноса

1. Код и наименование направления подготовки:

15.03.01 Машиностроение

2. Профиль подготовки:

Технологии, оборудование и автоматизация машиностроительных производств

3. Квалификация (степень) выпускника:

Бакалавр

4. Форма обучения:

Очная, заочная

5. Кафедра, отвечающая за реализацию дисциплины:

кафедра прикладной математики, информатики, физики и методики их преподавания

6. Составитель(и):

Зульф리카рова Т.В., кандидат технических наук, доцент, кафедры прикладной математики, информатики, физики и методики их преподавания

7. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

Вид учебных занятий	Деятельность студента
Лекция	<p>При написании лекций студент должен кратко, схематично, последовательно фиксировать основные положения, выводы, формулировки, обобщения, помечать важные мысли, выделять ключевые слова, термины. В некоторых случаях требуется проверка терминов, понятий с помощью энциклопедий, словарей, справочников с выписыванием толкований в тетрадь.</p> <p>При изучении теоретического материала необходимы выделение вопросов, терминов, материала, который вызывает трудности, поиск ответов в учебной и справочной литературе. Если самостоятельно не удастся разобраться в материале, необходимо сформулировать вопрос и задать преподавателю на консультации, на практическом занятии.</p>
Практические занятия	<p>В процессе освоения дисциплины студенты решают типовые задачи, выполняют самостоятельные работы. Решение каждой задачи необходимо сопровождать краткими пояснениями о том, какие законы используются для решения, какие математические преобразования приводят к результату и т.п.</p>
Подготовка к зачету	<p>При подготовке к зачету необходимо ориентироваться на конспекты лекций, рекомендуемую литературу, отработанные методы решения задач и приобретенные навыки анализа и проверки выполненных решений.</p>

8. Методические материалы для обучающихся по освоению теоретических вопросов дисциплины

№	Тема лекции	Рассматриваемые вопросы
1	<p>Введение. Способы переноса теплоты. Теплопроводность. Конвективный теплообмен.</p>	<p>Возникновение и история развития науки о теплообмене. Виды теплообмена. Роль теплообмена в машиностроении. Связь с технической термодинамикой.</p> <p>Температурное поле, температурный градиент, закон Фурье, тепловой поток, коэффициент теплопроводности, характеристика теплоизоляционных свойств различных материалов. Дифференциальное уравнение теплопроводности. Граничные условия.</p> <p>Стационарная теплопроводность. Теплопроводность через плоскую и цилиндрическую стенку, однослойную и многослойную. Эквивалентный коэффициент теплопроводности. Теплопроводность при наличии внутренних источников тепла. Нестационарная теплопроводность. Дифференциальное уравнение, краевые условия. Методы решения краевой задачи нестационарной теплопроводности.</p> <p>Конвективный теплообмен. Уравнение Ньютона-Рихмана. Пограничный слой. Система уравнений конвективного теплообмена.</p>
2	<p>Теория подобия и ее использование для решения задач</p>	<p>Основы теории подобия. Теоремы подобия. Критерии (числа) подобия и уравнения подобия. Критериальное урав-</p>

	теплообмена.	<p>нение конвективного теплообмена.</p> <p>Теплоотдача при ламинарном и турбулентном режиме течения жидкости в канале. Теплоотдача при вынужденно поперечном омывании одиночных труб и трубных пучков. Теплоотдача при свободном движении жидкости. Теплоотдача при кипении жидкости и конденсации пара. Пузырьковый и пленочный режимы кипения.</p> <p>Решение задач нестационарной теплопроводности на основе теории подобия. Аналитическое описание процесса охлаждения (нагрева) плоской неограниченной пластины. Определение количества тепла, отдаваемого (воспринимаемого) плоской неограниченной пластиной. Анализ решения охлаждения (нагрева) сплошного неограниченного цилиндра. Расчет нестационарного температурного поля для тел конечных размеров. Зависимость температурного поля от числа Фурье. Численные методы решения задач нестационарной теплопроводности. Электротепловая аналогия.</p>
3	Теплообмен излучением.	<p>Тепловое излучение и его характеристики: интегральная энергетическая светимость, спектральная плотность, яркость излучения. Эффективное и результирующее излучение. Абсолютно черное и серое тела. Степень черноты. Законы теплового излучения: Кирхгофа, Стефана-Больцмана, Планка, Ламберта. Лучистый теплообмен между телами в диатермичной среде. Использование экранов для защиты от излучения. Тепловое излучение в поглощающей среде. Степень черноты газа. Сложный теплообмен. Числа подобия Кирпичева и Больцмана. Технические применения теплообмена излучением.</p>
4	Теплопередача. Теплообменные аппараты.	<p>Теплопередача через плоскую и цилиндрическую стенки при граничных условиях третьего рода. Критический диаметр тепловой изоляции. Пути интенсификации теплопередачи. Теплопередача через оребренную стенку. Коэффициент эффективности ребра.</p> <p>Классификация теплообменных аппаратов. Основы теплового расчета рекуперативных теплообменников: уравнения теплового баланса, теплопередачи, коэффициент теплопередачи теплообменного аппарата. Определение среднего температурного напора теплообменного аппарата. Особенности теплового расчета регенеративных теплообменных аппаратов. Основы технико-экономической оптимизации теплообменных аппаратов.</p>
5	Массообмен.	<p>Основные понятия и определения. Виды диффузии. Молекулярная диффузия, закон Фика, Стефановский поток. Дифференциальные уравнения тепло- и массообмена. Аналогия процессов тепло- и массообмена. Диффузионные числа подобия. Процесс тепло- и массопереноса при испарении жидкости.</p>

При самостоятельной работе с теоретическим материалом студентам рекомендуется, пользуясь конспектами лекций и рекомендованными литературными источни-

ками, составить словарь основных понятий и ответить на контрольные вопросы по каждой теме. Примерные списки основных понятий и вопросов по каждой теме приводятся ниже.

Тема: Стационарная теплопроводность
Основные понятия и положения

1. Коэффициент теплопроводности.
2. Температурное поле.
3. Изотермическая поверхность и изотерма.
4. Тепловой поток.
5. Плотность теплового потока.
6. Закон Фурье.
7. Объемная плотность теплового потока.
8. Коэффициент температуропроводности.
9. Закон Ньютона–Рихмана.
Граничные условия.
10. Температурный напор.
11. Безразмерная избыточная температура.
12. Тепловая проводимость.
13. Термическое сопротивление.
14. Эквивалентный коэффициент теплопроводности многослойной плоской стенки.

Контрольные вопросы

1. Могут ли изотермические поверхности пересекаться?
2. Могут ли изотермические поверхности быть замкнутыми?
3. Верно ли, что градиент температуры параллелен изотерме?
4. Можно ли, зная градиенты температурного поля, определить разность температур между точками поля?
5. Достаточно ли знать продолжительность нагрева и количество теплоты, подведенной к телу произвольных размеров, чтобы определить плотность теплового потока на его поверхности?
6. Может ли средняя объемная мощность внутренних источников теплоты быть равной дивергенции потока теплоты?
7. Могут ли быть выражены в одинаковых единицах плотность теплового потока и объемная мощность внутренних источников теплоты?
Возможна ли дивергенция потоков теплоты в отсутствие внутренних источников (стоков) теплоты?
8. Входят ли физические параметры тела в состав условий однозначности, необходимых для решения дифференциального уравнения теплопроводности?
9. Тождественны ли понятия «граничные условия» и «краевые условия»?
10. Верно ли, что при стационарном режиме теплообмена перепад температур в стенке прямо пропорционален ее термическому сопротивлению?
11. Одинаковую ли размерность имеют плотность теплового потока и линейная плотность теплового потока?
12. Везде ли одинакова плотность теплового потока по толщине плоских многослойных стенок в отсутствие в них тепловыделений (теплопоглощений) и в условиях стационарного режима?

13. Может ли увеличиваться эквивалентный коэффициент теплопроводности многослойной стенки при увеличении ее общего термического сопротивления, но при сохранении толщины стенки?

Тема: Теория подобия и ее использование для решения задач теплообмена. Конвективный теплообмен

Основные понятия

1. Коэффициент кинематической вязкости.
2. Коэффициент динамической вязкости.
3. Ламинарный режим течения жидкости.
4. Турбулентный режим течения жидкости.
5. Гидродинамический пограничный слой.
6. Температурный пограничный слой.
7. Независимые переменные, зависимые переменные и параметры.
8. Определяющие и определяемые критерии подобия.
9. Число Нуссельта.
10. Число Прандтля.
11. Средняя по длине трубы температура жидкости.
12. Число Эйлера.
13. Число Пекле.
14. Число Рейнольдса.
15. Число Грасгофа.
16. Критическое значение числа Рейнольдса.
17. Профиль Пуазейля.
18. Вязкостный режим течения.
19. Вязкостно-гравитационный режим течения.
20. Гидродинамически стабилизированное течение.
21. Термически стабилизированное течение.

Контрольные вопросы

1. Можно ли коэффициент теплопроводности λ и коэффициент теплоотдачи α выразить в одинаковых единицах?
2. Могут ли быть одинаковыми единицы коэффициентов вязкости - динамического и кинематического?
3. Можно ли определить коэффициент объемного расширения газов и жидкостей по формуле $\beta=1/T$?
4. Является ли система дифференциальных уравнений: конвективного теплообмена; энергии; движения; сплошности – системой, полностью характеризующей совокупность законов, определяющих процесс конвективного теплообмена?
5. Одинаково ли содержание граничных условий, характеризующих процессы нестационарной теплопроводности твердого тела и конвективного теплообмена?
6. Могут ли совпадать по толщине гидродинамический и тепловой слои?
7. *Основы метода подобия и моделирования.*
8. Совпадают ли по форме безразмерные комплексы, выражающие число Био и число Нуссельта?

9. Содержится ли одноименная физическая величина в каждом из комплексов, выражающих числа Нуссельта, Пекле, Рейнольдса и Грасгофа?
10. Содержится ли одноименная физическая величина в числителе комплексов, выражающих числа Эйлера и Прандтля?
11. Могут ли удовлетворять два процесса теплообмена – при ламинарном и при турбулентном режимах движения жидкости – первому из условий подобия?
12. В ряду безразмерных величин θ , w , Eu , Re , Nu , Pr , Gr , Pe – содержатся ли независимые переменные? зависимые переменные?
13. В том случае, когда подобие двух процессов достигнуто, равны ли в сходственных точках одноименные зависимые безразмерные величины?
14. Могут ли быть одинаковыми значения среднеинтегрального (по поверхности) коэффициента теплоотдачи и среднего коэффициента теплоотдачи, полученного делением теплового потока на среднеинтегральный (по поверхности) перепад температур в пограничном слое?
15. Существуют ли процессы конвективной теплоотдачи, при которых числовые значения определяющих температур жидкости больше, чем температуры стенки?
16. Можно ли по среднему температурному напору вычислить начальный и конечный температурные напоры?
17. Можно ли по начальному и конечному температурным напорам вычислить средний температурный напор?
18. Возможна ли свободная конвекция вдоль вертикальной стенки без участка с ламинарным движением?
19. Возможна ли свободная конвекция вдоль вертикальной стенки без участка с турбулентным движением?
20. Зависит ли местный коэффициент теплоотдачи при турбулентном движении возле вертикальной стенки в неограниченном объеме от высоты участка стенки?
21. Известен ли при свободной конвекции режим теплообмена с постоянным значением числа Нуссельта?
22. Можно ли исключить свободную конвекцию в зазоре между двумя горизонтальными поверхностями, имеющими разные температуры?
23. Верно ли, что первый по ходу жидкости ряд труб в пучке имеет более высокий коэффициент теплоотдачи, чем последующие ряды?
24. Верно ли, что при шахматном расположении труб в пучке коэффициент теплоотдачи выше, чем при коридорном, при равенстве всех других условий?

Тема: Теплообмен при кипении и конденсации

Основные понятия

1. Кипение.
2. Пузырьковое кипение.
3. Пленочное кипение.
Условие существования пузырька пара.
4. Центры кипения (парообразования).
5. Перегретая жидкость.
6. Первая критическая плотность теплового потока.
7. Вторая критическая плотность теплового потока.

8. Равновесная тепловая нагрузка.
9. Число Архимеда.
10. Конденсация.
11. Чистый пар.
12. Насыщенный пар.
13. Перегретый пар.
14. Пленочная конденсация.
15. Капельная конденсация.
16. Объемная конденсация.
17. Поверхностная конденсация.
18. Термическое сопротивление фазового перехода.
19. Коэффициент конденсации.
20. Уравнение Нуссельта.
21. Ламинарное течение пленки конденсата.
22. Смешанное течение пленки конденсата.

Контрольные вопросы

1. Верно ли, что увеличение краевого угла θ свидетельствует об ухудшении смачиваемости?
2. Одинаковы ли процессы перехода от пузырькового к пленочному режиму кипения в случаях регулируемой температуры стенки и регулируемой плотности теплового потока?
3. Всегда ли температура кипящей жидкости выше, чем температура в пузырьке пара?
4. Зависит ли коэффициент теплоотдачи при пленочном режиме кипения от плотности теплового потока?
5. Верно ли, что для критического числа Рейнольдса $Re_{кр}=400$, характеризующего при конденсации пара переход от ламинарного режима стекания пленки к турбулентному, определяющим размером служит высота x участка стекающей пленки?
6. Входит ли в состав числа Рейнольдса для пленки конденсата коэффициент теплоотдачи при конденсации?
7. Зависит ли коэффициент теплоотдачи при ламинарном режиме конденсации от температурного напора?
8. При увеличении температурного напора вдвое и при сохранении ламинарного режима конденсации может ли плотность теплового потока увеличиваться вдвое?
9. Верно ли, что коэффициент теплоотдачи при капельной конденсации водяного пара больше, чем при пленочной конденсации этого же пара?
10. Верно ли, что при конденсации пара на вертикальных стенках толщина пленки конденсата увеличивается по мере стекания ее вниз. Может ли при этом возрасти коэффициент теплоотдачи (средний или местный)?
11. Верно ли, что коэффициент теплоотдачи при конденсации движущегося пара на горизонтальной трубе больше коэффициента теплоотдачи при конденсации неподвижного пара при сохранении неизменными прочих условий?
12. Верно ли, что при конденсации движущегося по пучку труб пара коэффициент теплоотдачи увеличивается при возрастании номера ряда?

Тема: Нестационарная теплопроводность

Основные понятия

1. Дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности.
2. Число Био.
3. Средняя безразмерная избыточная температура.
4. Число Фурье.
5. Теорема о перемножении решений.
6. Стадии охлаждения тел.
7. Регулярный режим охлаждения (нагрева) тел.
8. Темп охлаждения.

Контрольные вопросы

1. Достаточно ли знать дифференциальное уравнение теплопроводности, чтобы определить температурное поле в твердом теле (в любой точке и в любой момент времени)?
2. Одинаковы ли единицы коэффициентов теплопроводности и температуропроводности?
3. Возможно ли осуществление граничных условий первого рода на поверхности шара?
4. Верно ли, что безразмерная координата X становится равной нулю в центре пластины толщиной 2δ ?
5. Входит ли в число Био коэффициент теплопроводности жидкой среды (окружающей жидкости)?
6. Верно ли, что в состав числа Фурье для пластины и для цилиндра входят одинаковые (по смыслу) линейные размеры?
7. Может ли безразмерная избыточная температура увеличиваться в режиме нагрева или в режиме охлаждения?
8. Можно ли по типовым диаграммам (номограммам) для цилиндра определить безразмерную избыточную температуру в любой точке неограниченного цилиндра?

Тема: Теплообмен излучением

Основные понятия

1. Тепловое излучение.
2. Шкала электромагнитных волн.
3. Сплошное излучение.
4. Селективное излучение.
5. Объемное излучение.
6. Поверхностное излучение.
7. Равновесное излучение.
8. Неравновесное излучение.
9. Спектр излучения.
10. Коэффициент излучения.
11. Лучистый теплообмен.
12. Диатермичное тело.
13. Абсолютно белая поверхность.
14. Зеркальная поверхность.

15. Абсолютно черное тело.
16. Серое тело.
17. Коэффициент проницаемости.
18. Коэффициент отражения.
Степень черноты.
19. Коэффициент поглощения.
20. Падающее излучение.
21. Отраженное излучение.
22. Собственное излучение.
23. Спектральная яркость излучения.
24. Спектральная интенсивность излучения.
25. Интегральная яркость излучения.
26. Излучательная способность тела.
27. Закон смещения Вина.
28. Закон Стефана–Больцмана.
29. Закон Кирхгофа.
30. Закон косинусов Ламберта.
31. Закон Релея–Джинса.
32. Закон Планка.
33. Интегральный лучистый поток.
34. Поглощенное излучение.
35. Метод многократных отражений.
36. Метод сальдо.
37. Приведенный коэффициент излучения в системе плоскопараллельных тел.
38. Приведенный коэффициент поглощения в системе плоскопараллельных тел.
39. Приведенный коэффициент поглощения в системе плоскопараллельных тел при наличии экранов.
40. Приведенный коэффициент излучения для тела с оболочкой.
41. Приведенный коэффициент поглощения для тела с оболочкой.
42. Приведенный коэффициент поглощения при наличии экранов.
43. Закон Бугера.
44. Оптическая длина луча.
45. Коэффициент ослабления луча.

Контрольные вопросы

1. Может ли тело поглощать больше лучистой энергии, чем излучать?
2. Может ли отраженный лучистый поток быть больше падающего лучистого потока?
3. Одинаковы ли единицы, используемые для поверхностной плотности потока интегрального излучения и для спектральной плотности потока излучения?
4. Всегда ли тело, температура которого выше температуры окружающей среды, излучает энергии больше, чем поглощает?
5. Может ли возрасти спектральная плотность потока излучения при увеличении длины волны излучения?

6. Может ли убывать спектральная плотность потока излучения при увеличении длины волны излучения?
7. Может ли собственное излучение тела быть меньше отраженного этим телом излучения?
8. Может ли собственное излучение тела быть больше поглощенного этим телом излучения?
9. Может ли собственное излучение тела быть больше эффективного излучения этого тела?
10. Может ли собственное излучение тела быть больше потока результирующего излучения, направленного от тела?
11. Существует ли эффективный лучистый поток в зазоре между двумя параллельными стенками, если поверхности стенок имеют одинаковую температуру?
12. Может ли серое тело излучать больше энергии, чем черное тело таких же размеров и в такой же окружающей среде, если температуры серого и черного тел одинаковы?
13. Может ли серое тело поглощать больше энергии, чем черное тело таких же размеров и в такой же окружающей среде, если температуры серого и черного тел одинаковы?
14. Может ли серое тело поглощать больше энергии, чем черное тело, если размеры и температуры серого и черного тел одинаковы, а температура окружающих тел различна?
Зависит ли степень черноты поглощающих газов от толщины слоя газа?

Тема: Массообмен

1. Концентрационная диффузия.
2. Термодиффузия.
3. Бародиффузия.
4. Поток массы.
5. Плотность потока массы.
6. Коэффициент диффузии.
7. Эффект Соре.
8. Эффект Дюфо.
Местная концентрация.
9. Массоотдача.
10. Коэффициент массоотдачи.
11. Закон Фика.
12. Тройная аналогия.
13. Стефанов поток.
14. Диффузионный пограничный слой.
15. Число Шмидта.
16. Число Шервуда.
17. Уравнение Стефана.
18. Уравнение массоотдачи.
19. Диффузионное число Нуссельта.
20. Влажный воздух.

21. Ненасыщенный влажный воздух.
22. Насыщенный влажный воздух.
23. Пересыщенный влажный воздух.
24. Абсолютная влажность.
25. Относительная влажность.
26. Удельное влагосодержание.
27. Молярное влагосодержание.
28. Относительное влагосодержание.
29. Температура сухого термометра.
30. Температура мокрого термометра.
31. Основные термодинамические процессы с влажным воздухом.
32. Скорость испарения капли.
33. Константа испарения.
34. Закон Срезневского.
35. Обдуваемая капля.
36. Летящая капля.
37. неподвижная капля.
38. Удельная энтальпия влажного воздуха.
39. Плотность влажного воздуха.

Контрольные вопросы

1. Одинаковы ли единицы, используемые для местной концентрации вещества и для плотности вещества?
2. Одинаковы ли единицы коэффициента молекулярной диффузии и кинематического коэффициента вязкости?
3. Одинаковы ли единицы коэффициента молекулярной диффузии D для градиента концентрации и коэффициент молекулярной диффузии D_p для градиента парциальных давлений?
4. Одинаковы ли единицы коэффициента термодиффузии и термодиффузионного отношения?
5. Одинаковы ли единицы коэффициента теплоотдачи и коэффициента массоотдачи?
6. Всегда ли плотность потока массы в макроскопически неподвижной бинарной смеси определяется только законом Фика?
7. Могут ли совпадать по направлению градиенты концентрации пара парогазовой смеси над жидкостью в процессе испарения и конденсации?
8. Всегда ли совпадают по направлению градиент температуры и градиент концентрации пара в парогазовой смеси над жидкостью?
9. Может ли процесс испарения в парогазовую смесь усилить теплообмен между жидкостью и парогазовой смесью?
10. Аналогичны ли коэффициенты диффузии D и температуропроводности a ?
11. Всегда ли температура кипения воды равна $100\text{ }^\circ\text{C}$?
12. Может ли испарение воды происходить при температурах ниже $100\text{ }^\circ\text{C}$?
13. Может ли давление ненасыщенного водяного пара быть больше давления насыщенного пара?
14. Может ли вода испаряться, если влажность воздуха равна $100\text{ }\%$?

15. Может ли температура мокрого термометра быть меньше температуры сухого термометра?
16. Может ли скорость испарения капли увеличиваться с уменьшением ее радиуса?
17. Могут ли в условиях вынужденной конвекции одновременно меняться и размеры, и скорость движения капли?
Верно ли, что коэффициент теплоотдачи обдуваемой капли увеличивается?
18. Верно ли, что скорость испарения капли не зависит от коэффициента диффузии?
19. Верно ли, что величина абсолютной влажности выражается в процентах?

9. Методические материалы для обучающихся по подготовке к практическим/лабораторным занятиям

№	Тема занятия	Рассматриваемые вопросы
1	Стационарная теплопроводность.	Решение одномерного стационарного уравнения теплопроводности в декартовых и цилиндрических координатах с граничными условиями первого рода. Решение задач на определение плотности теплового потока, разности температур, коэффициента теплопроводности, теплового сопротивления, толщины плоской и цилиндрической стенок.
2	Конвективный теплообмен в однородной среде.	Приведение системы уравнений конвективного теплообмена к безразмерному виду с использованием критериев подобия. Вычисление критериев подобия.
3	Конвективный теплообмен в однородной среде.	Решение задач на определение коэффициентов теплоотдачи и тепловых потоков.
4	Теплообмен при кипении и конденсации.	Решение задач на определение коэффициента теплоотдачи и количества пара, конденсирующегося в единицу времени на поверхности труб и пучка труб. Определение коэффициента теплоотдачи и тепловой нагрузки при пузырьковом кипении воды.
5	Нестационарная теплопроводность.	Обсуждение методов решения задач нестационарной теплопроводности. Решение задач на определение температурного поля в пластине графическим и аналитическим методами. Определение времени нагрева пластины до заданной температуры и количества полученной теплоты. Вычисление коэффициентов тепло- и температуропроводности.
6	Теплообмен излучением.	Решение задач на определение излучательной способности поверхности и длины волны, при которой наблюдается ее максимум. Определение истинной температуры и степени черноты. Вычисление плотности теплового потока между двумя излучающими стенками. Расчет тепловых потерь в отсутствие и при наличии экрана.
7	Теплопередача.	Решение задач теплопередачи через стенки при граничных условиях третьего рода. Расчет термического сопротивления однородной и многослойной стенок, плоской и цилиндрической.
8	Теплообменные аппа-	Конструкционный и поверочный расчеты рекуперативного тепло-

	раты.	обменника.
9	Массообмен.	Решение задач на расчет параметров влажного воздуха.
10	Массообмен.	Расчет плотности диффузионного потока, времени испарения.

10. Тематика рефератов/докладов/эссе, методические рекомендации по выполнению контрольных и курсовых работ, иные материалы

Методические рекомендации к самостоятельной работе по решению задач

Самостоятельная работа в межсессионный период включает решение определенного количества задач по изучаемым разделам. Решение задач позволяет лучше понять и запомнить основные физические закономерности, осмыслить наиболее важные приложения законов теплообмена к профессиональной деятельности.

Перед зачетом проводится собеседование по самостоятельной работе. Студент должен ответить на вопросы преподавателя и дать все необходимые пояснения по решению задач. Примеры оформления и пояснительного сопровождения некоторых решений приведены ниже.

Задачи для самостоятельного решения по теме «Теплопроводность»

1. Решить дифференциальное уравнение теплопроводности в общем виде $\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0$ со следующими граничными условиями: $t(0) = t_{c1}$, $t(\delta) = t_{c2}$.

Ответ: $t = t_{c1} - \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\delta} x$.

Решение

Первое интегрирование дифференциального уравнения $\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0$ дает $\frac{\partial t}{\partial x} = C_1$.

После второго интегрирования получаем $t = C_1 x + C_2$.

Подставляем граничные условия: при $x = 0$ $t = t_{c1}$, следовательно, $C_2 = t_{c1}$; при $x = \delta$ $t = t_{c2}$, следовательно, $\frac{\partial t}{\partial x} = C_1 = -\frac{t_{c1} - t_{c2}}{\delta}$.

Получаем $t = t_{c1} - \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\delta} x$.

2. Решить одномерную задачу теплопроводности для пластины с внутренними источниками тепла: $\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{q_v}{\lambda} = 0$. Граничные условия: при $x = \pm \delta$

$\alpha(t_c - t_{ж}) = \pm \lambda (\partial t / \partial x)_{x=\pm \delta}$.

Ответ: $t(x) = t_{ж} + \frac{\delta \cdot q_v}{\alpha} + \frac{q_v}{2\lambda} (\delta^2 - x^2)$.

Указания к решению

Поскольку граничные условия для обеих сторон пластины одинаковые, температурное поле внутри пластины должно быть симметричным относительно плоскости $x = 0$. Тепло с одинаковой интенсивностью отводится через левую и правую поверхности тела. Одинаково и тепловыделение в обеих половинах пластины. Решить задачу для правой половины пластины.

Ответ: $t(x) = t_{ж} + \frac{\delta \cdot q_v}{\alpha} + \frac{q_v}{2\lambda} (\delta^2 - x^2)$.

3. Решить уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах: $\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} = 0$ со следующими граничными условиями: $t(r_1) = t_{c1}$, $t(r_2) = t_{c2}$.

Ответ: $t = t_{c1} - (t_{c1} - t_{c2}) \frac{\ln(r/r_1)}{\ln(r_2/r_1)}$.

Указания к решению

Решить задачу, воспользовавшись заменой переменных $u = \frac{\partial t}{\partial r}$.

4. Решить задачу теплопроводности с внутренними источниками тепла в цилиндрических координатах: $\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{q_v}{\lambda} = 0$. Граничные условия:

а) условие симметрии относительно оси стержня: при $r = 0$ $(\partial t / \partial r)_{r=0} = 0$;

б) теплоотдача с поверхности: при $r = r_0$ $\alpha(t_c - t_{ж}) = -\lambda(\partial t / \partial r)_{r=r_0}$

Ответ: $t(r) = t_{ж} - \frac{r_0 \cdot q_v}{2\alpha} + \frac{q_v}{4\lambda} (r_0^2 - r^2)$.

5. Решить нестационарную одномерную задачу теплопроводности без внутренних источников тепла в декартовых координатах: $\frac{\partial v}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}$.

Начальные условия: при $\tau = 0$ $v = v_0 = t_0 - t_{ж}$.

Граничные условия из-за симметрии задачи запишем для одной половины пластины: при $x = 0$ $(\partial v / \partial x)_{x=0} = 0$; при $x = \delta$ $(\partial v / \partial x)_{x=\delta} = -\frac{\alpha}{\lambda} v_{x=\delta}$.

Решить дифференциальное уравнение методом Фурье.

Ответ: $\text{ctg}(k\delta) = \frac{k\lambda}{\alpha}$.

6. Вычислить плотность теплового потока через плоскую однородную стенку, толщина которой значительно меньше ширины и высоты, если стенка выполнена: а) из стали [$\lambda = 50$ Вт/(м·°С)]; б) из бетона [$\lambda = 1,1$ Вт/(м·°С)]; в) из диатомитового кирпича [$\lambda = 0,11$ Вт/(м·°С)]. Во всех трех случаях толщина стенки $\delta = 50$ мм. Температуры на поверхностях стенки поддерживаются постоянными: $t_{c1} = 100$ °С и $t_{c2} = 90$ °С.

Ответ: а) $q = 10000$ Вт/м²; б) $q = 220$ Вт/м²; в) $q = 22$ Вт/м².

7. Плотность теплового потока через плоскую стенку толщиной $\delta = 100$ мм $q = 70$ Вт/м². Определить разность температур на поверхностях стенки и численные значения градиента температуры в стенке, если она выполнена а) из латуни [$\lambda = 70$ Вт/(м·°С)]; б) из красного кирпича [$\lambda = 0,7$ Вт/(м·°С)]; в) из пробки [$\lambda = 0,07$ Вт/(м·°С)].

Ответ: а) $\Delta t = 0,1$ °С и $|\text{grad } t| = 1$ °С/м; б) $\Delta t = 10$ °С и $|\text{grad } t| = 100$ °С/м; в) $\Delta t = 10$ °С и $|\text{grad } t| = 1000$ °С/м.

8. Определить потерю теплоты Q (Вт) через стенку из красного кирпича длиной $l = 5$ м, высотой $h = 4$ м и толщиной $\delta = 500$ мм, если температуры на поверхностях стенки поддерживаются $t_{c1} = 110$ °С и $t_{c2} = 40$ °С. Коэффициент теплопроводности красного кирпича $\lambda = 0,7$ Вт/(м·°С).

Ответ: $Q = 1960$ Вт.

9. Определить коэффициент теплопроводности материала стенки, если при толщине ее $\delta = 50$ мм и разности температур на поверхностях $\Delta t = 25^\circ\text{C}$, плотность теплового потока $q = 175$ Вт/м².

Ответ: $\lambda = 0,35$ Вт/(м·°C).

10. Плоская стенка выполнена из шамотного кирпича толщиной $\delta = 250$ мм. Температура ее поверхностей $t_{c1} = 1350^\circ\text{C}$ и $t_{c2} = 50^\circ\text{C}$. Коэффициент теплопроводности шамотного кирпича является функцией от температуры $\lambda = 0,838 \cdot (1 + 0,00007t)$. Вычислить и изобразить в масштабе распределение температуры в стенке.

Ответ:

x, мм	0	50	100	125	150	200	225	250
t, °C	1350	1145	920	800	670	390	230	50

12. Плоская стенка бака площадью $F = 5$ м² покрыта двухслойной тепловой изоляцией. Стенка бака стальная, толщиной $\delta_1 = 8$ мм, с коэффициентом теплопроводности $\lambda_1 = 46,5$ Вт/(м·°C). Первый слой изоляции выполнен из новоасбозурита толщиной $\delta_2 = 50$ мм, коэффициент теплопроводности которого определяется уравнением $\lambda_2 = 0,144 + 0,00014t$. Второй слой изоляции толщиной $\delta_3 = 10$ мм представляет собой известковую штукатурку, коэффициент теплопроводности которой $\lambda_3 = 0,698$ Вт/(м·°C). Температуры внутренней поверхности стенки бака $t_{c1} = 250^\circ\text{C}$ и внешней поверхности изоляции $t_{c4} = 50^\circ\text{C}$. Вычислить количество теплоты, передаваемой через стенку, температуры на границах слоев изоляции и построить график распределения температуры.

Ответ: $Q=3170$ Вт; $t_{c2} = 249,9^\circ\text{C}$ и $t_{c3} = 59^\circ\text{C}$.

13. Обмуровка печи состоит из слоев шамотного и красного кирпича, между которыми расположена засыпка из диатомита. Толщина шамотного слоя $\delta_1 = 120$ мм, диатомитовой засыпки $\delta_2 = 50$ мм и красного кирпича $\delta_3 = 250$ мм. Коэффициенты теплопроводности материалов, соответственно, равны $\lambda_1 = 0,93$; $\lambda_2 = 0,13$ и $\lambda_3 = 0,7$ Вт/(м·°C). Какой толщины следует сделать слой из красного кирпича, если отказаться от применения засыпки из диатомита, чтобы тепловой поток через обмуровку остался неизменным?

Ответ: Толщина слоя красного кирпича должна быть равна 500 мм.

14. Стенка незранированной топочной камеры парового котла выполнена из слоя пеношамота толщиной $\delta_1 = 125$ мм и слоя красного кирпича толщиной $\delta_2 = 500$ мм. Слои плотно прилегают друг к другу. Температура на внутренней поверхности топочной камеры $t_{c1} = 1100^\circ\text{C}$, а на наружной $t_{c3} = 50^\circ\text{C}$. Коэффициент теплопроводности пеношамота $\lambda_1 = 0,28 + 0,00023t$, красного кирпича $\lambda_2 = 0,7$ Вт/(м·°C). Вычислить тепловые потери через 1 м² стенки топочной камеры и температуру в плоскости соприкосновения слоев.

Ответ: $q=1090$ Вт/м²; $t_{c2} = 828^\circ\text{C}$.

15. Толщину слоя красного кирпича в стенке топочной камеры, рассмотренной в предыдущей задаче, решено уменьшить в 2 раза, а между слоями поместить слой засыпки из диатомитовой крошки, коэффициент теплопроводности которой $\lambda = 0,113 + 0,00023t$.

Какую нужно сделать толщину диатомитовой засыпки, чтобы при тех же температурах на внешних поверхностях стенки, потери теплоты оставались неизменными?

Ответ: $\delta = 94$ мм.

16. Определить промежуток времени, по истечении которого лист стали, прогретый до температуры $t_0 = 500$ °С, будучи помещен в воздушную среду, температура которой $t_{ж} = 20$ °С, примет температуру, отличающуюся не более чем на 1 % от температуры окружающей среды. Толщина листа стали $2\delta = 20$ мм. Коэффициент теплопроводности стали $\lambda = 45,5$ Вт/(м·°С) теплоемкость стали $c = 46,0$ кДж/(кг·°С), плотность стали $\rho = 7900$ кг/м³. Коэффициент теплоотдачи от поверхности листа к окружающему воздуху $\alpha = 35$ Вт/(м²·°С).

Ответ: 2 ч 15 мин.

17. Определить время τ , необходимое для нагрева листа стали толщиной $2\delta = 24$ мм, который имел начальную температуру $t_0 = 25$ °С, а затем был помещен в печь с температурой $t_{ж} = 600$ °С. Нагрев считать законченным, когда температура листа достигнет значения $t = 450$ °С. Коэффициент теплопроводности, теплоемкость и плотность стали, соответственно, $\lambda = 45,4$ Вт/(м·°С), $c = 502,0$ кДж/(кг·°С), $\rho = 7800$ кг/м³, а коэффициент теплоотдачи к поверхности листа $\alpha = 23,3$ Вт/(м²·°С).

Ответ: $\tau = 45$ мин.

Задачи для самостоятельного решения по теме «Конвективный теплообмен»

1. Записать систему дифференциальных уравнений конвективного теплообмена в условиях свободной конвекции на вертикальной стенке. Привести ее к безразмерному виду методом масштабных преобразований.

2. По трубке диаметром $d = 16$ мм и длиной $l = 2,1$ м течет горячая вода, отдающая теплоту через стенку трубы среде, омывающей трубку снаружи. Расход воды через трубку $G = 0,0091$ кг/с; температура воды на входе $t_{ж1} = 87,2$ °С; температура воды на выходе $t_{ж2} = 29$ °С; средняя температура стенки трубки $t_c = 15,3$ °С. Вычислить значения критериев Nu , Re и Pe , приняв в качестве определяющей температуры среднеарифметическую температуру жидкости. Коэффициент теплоотдачи отнести к средней арифметической разности температур между водой и стенкой.

Ответ: $Nu = 11,9$; $Re = 1485$; $Pe = 4600$.

3. Вычислить коэффициент теплоотдачи и число Nu для условий предыдущей задачи, если коэффициент теплоотдачи отнести к средней логарифмической разности температур между жидкостью и стенкой. Сравнить полученные результаты с предыдущим решением.

Ответ: $\alpha = 597$ Вт/(м²·°С); $Nu = 14,5$.

4. Необходимо опытным путем определить распределение температур в длинном стальном вале диаметром $d = 400$ мм через $\tau = 2,5$ ч после загрузки его в печь. Для стали коэффициенты теплопроводности и температуропроводности равны: $\lambda = 42$ Вт/(м·°С); $a = 1,18 \cdot 10^{-5}$ м²/с. Коэффициент теплоотдачи к валу в печи $\alpha = 116$ Вт/(м²·°С). Исследование решено проводить на геометрически подобной модели вала, выполненной из легированной стали. Для модели $\lambda_m = 16$ Вт/(м·°С); $a_m = 0,53 \cdot 10^{-5}$ м²/с; $\alpha_m = 116$ Вт/(м²·°С). Оп-

ределить диаметр d_m модели вала и промежуток времени t_m , через который после загрузки модели в печь необходимо измерить распределение температур в модели.

Ответ: $d_m=117,5$ мм; $t_m=1735$ с.

5. Плоская пластина обтекается продольным потоком воздуха. Скорость и температура набегающего потока, соответственно, $w_0 = 6$ м/с и $t_0 = 20$ °С. Вычислить количество теплоты, отдаваемой воздуху, при условии, что температура поверхности пластины $t_c = 80$ °С, а ее размер вдоль потока $l = 1$ м и поперек потока $b = 9,0$ м.

Ответ: $Q = 13$ кВт.

6. Цилиндрическая трубка диаметром $d = 20$ мм охлаждается поперечным потоком воды. Скорость потока $w = 1$ м/с. Средняя температура воды $t_{ж} = 10$ °С и температура поверхности трубки $t_c = 50$ °С. Определить коэффициент теплоотдачи от поверхности трубки к охлаждающей воде.

Ответ: $\alpha=7050$ Вт/(м² °С).

7. Сравнить коэффициенты теплоотдачи для третьего ряда труб по ходу воздуха для двух воздухоподогревателей, конструктивно выполненных в виде трубных пучков с шахматным расположением труб. Оба пучка обтекаются поперечными потоками воздуха с одинаковой скоростью $w = 10$ м/с и средней температурой потока $t_{ж} = 100$ °С. Диаметры труб в пучках, соответственно, $d_1 = 50$ мм и $d_2 = 25$ мм. Сравнение провести при одинаковом для обоих воздухоподогревателей отношении шагов s_2/s_1 .

Ответ: $\alpha_2=2^{0,4}\alpha_1$, $\alpha_3=1,32\alpha_1$

8. Определить коэффициент теплоотдачи α и температуру поверхности нагрева при пузырьковом кипении воды в большом объеме. Тепловая нагрузка $q = 200$ кВт/м², а давление $p = 5,5$ МПа.

Ответ: $\alpha = 37\,788$ Вт/(м²°С), $t_c=276,3$ °С.

9. Определить коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности трубки испарителя к кипящей воде, если тепловая нагрузка поверхности нагрева $q = 200$ кВт/м², режим кипения пузырьковый, и вода находится под давлением $p = 200$ кПа.

Ответ: $\alpha= 13\,293$ Вт/(м² °С).

10. На вертикальной трубе водоподогревателя конденсируется сухой насыщенный пар. Давление пара $p = 8,6$ МПа. Температура наружной поверхности трубы $t_c = 287$ °С. Высота трубы $H = 1,8$ м. Определить средний коэффициент теплоотдачи от пара к стенке трубы.

Ответ: $\alpha = 8\,100$ Вт/(м² °С).

11. На наружной поверхности горизонтальной трубы $d = 20$ мм и длиной $l = 2$ м конденсируется сухой насыщенный пар при давлении $p = 100$ кПа. Температура поверхности трубы $t_c = 94,5$ °С. Определить средний коэффициент теплоотдачи от пара к трубе и количество пара G , которое конденсируется на поверхности трубы. Сравнить результаты расчета с ответом к предыдущей задаче.

Ответ: $\alpha = 15\,600$ Вт/(м²°С); $G = 15,9$ кг/ч.

Задачи для самостоятельного решения по теме «Теплообмен излучением»

1. Определить излучательную способность поверхности Солнца, если известно, что ее температура равна 5700°C и условия излучения близки к излучению абсолютно черного тела. Вычислить также длину волны, при которой будет наблюдаться максимум спектральной интенсивности излучения и общее количество лучистой энергии, испускаемой Солнцем в единицу времени, если диаметр Солнца можно принять равным $1,391 \cdot 10^9$ м.

Ответ: $E_0 = 72,2 \cdot 10^6$ Вт/м²; $\lambda_{\text{макс}} = 0,65$ мкм; $Q = 4,38 \cdot 10^{26}$ Вт.

2. Поверхность стального изделия имеет температуру $t = 727^\circ\text{C}$ и степень черноты 0,7. Излучающую поверхность можно считать серой. Вычислить плотность собственного излучения поверхности изделия и длину волны, которой будет соответствовать максимальное значение спектральной интенсивности излучения.

Ответ: $E = 3,97 \cdot 10^4$ Вт/м²; $\lambda_{\text{макс}} = 2,898$ мкм.

3. Найти максимальные значения спектральной интенсивности излучения для условий двух предыдущих задач.

Ответ: $J_{0\lambda_{\text{макс}}} = 9,94 \cdot 10^{13}$ Вт/м²; $J_{\lambda_{\text{макс}}} = 9,15 \cdot 10^9$ Вт/м².

4. Прибор для измерения высоких температур – оптический пирометр – основан на сравнении яркости исследуемого тела с яркостью нити накаливания. Прибор градуирован по излучению абсолютно черного источника, и поэтому он измеряет температуру, которую имело бы абсолютно черное тело при той же яркости излучения, какой обладает исследуемое тело. В пирометре используется красный светофильтр ($\lambda = 0,65$ мкм). Какова истинная температура тела, если пирометр зарегистрировал температуру $t = 1400^\circ\text{C}$, а степень черноты тела при $\lambda = 0,65$ мкм равна 0,6? Найти степень черноты исследуемого тела, если оптический пирометр зарегистрировал температуру $t_0 = 1600^\circ\text{C}$, а его истинная температура $t = 1700^\circ\text{C}$.

Ответ: $t = 1467^\circ\text{C}$; $\varepsilon_\lambda = 0,55$.

Решение

Яркость исследуемого тела

$$B_\lambda = \frac{J_\lambda}{\pi} = \frac{1}{\pi} \frac{\varepsilon_\lambda c_1 \lambda^{-5}}{\exp(c_2/\lambda T) - 1},$$

где T – абсолютная температура исследуемого тела.

Яркость абсолютно черного тела

$$B_{0\lambda} = \frac{J_{0\lambda}}{\pi} = \frac{1}{\pi} \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp(c_2/\lambda T_0) - 1},$$

где T_0 – абсолютная температура черного тела.

При $B_\lambda = B_{0\lambda}$ это температура, которую показывает пирометр. Так как здесь $c_2/\lambda T_0 = 13,2$, то $\exp(c_2/\lambda T_0) \gg 1$, поэтому в формулах в знаменателе единицей можно пренебречь. Из условия $B_\lambda = B_{0\lambda}$ получаем

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} - \frac{\lambda}{c_2} \ln \frac{1}{\varepsilon_\lambda},$$

$$\text{откуда } T = \frac{1}{\frac{1}{T_0} - \frac{\lambda}{c_2} \ln \frac{1}{\varepsilon_\lambda}} = \frac{1}{\frac{1}{1675} - \frac{0,65 \cdot 10^{-6}}{1,459 \cdot 10^{-2}} \ln \frac{1}{0,6}} = 1740\text{K} = 1467^\circ\text{C}.$$

5. Температура тела измеряется двумя оптическими пирометрами с разными светофильтрами. В первом пирометре установлен красный светофильтр ($\lambda = 0,65$ мкм),

во втором – зеленый ($\lambda = 0,50$ мкм). Температуры, показываемые пирометрами, соответственно, $t_{01} = 1400^\circ\text{C}$ и $t_{02} = 1420^\circ\text{C}$. Найти истинную температуру тела и его степень черноты, считая тело серым.

Ответ: $t = 1492^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 0,71$.

Задачи для самостоятельного решения по теме «Массообмен»

1. Плоское влажное изделие длиной $l = 0,5$ м продольно омывается потоком сухого воздуха, для которого температура $t_\infty = 20^\circ\text{C}$, давление $p = 0,202$ МПа, скорость $w_\infty = 1$ м/с. Температура изделия постоянна по всей длине ($t_c = 20^\circ\text{C}$). Найти коэффициент массоотдачи β .

Решение

Для нахождения коэффициента массоотдачи воспользуемся аналогией процессов тепло- и массообмена. Для процесса теплообмена при вынужденной конвекции жидкости $Nu = f(Re, Pr)$.

Следуя аналогии процесса: $Sc = \frac{v}{D}$; $Sh = \frac{\beta l_0}{D}$,

получаем функциональную зависимость для числа Шервуда: $Sh = f(Re, Sc)$.

Найдем число Рейнольдса при $l=0,5$ м с учетом зависимости коэффициента вязкости от давления:

$$Re = \frac{w_\infty l}{\nu} = \frac{1 \cdot 0,5 \cdot 2}{15,06 \cdot 10^{-6}} = 6,64 \cdot 10^4.$$

Так как течение в пограничном слое ламинарное, то для процесса массообмена

$$Sh = 0,332 \cdot Re^{0,5} Sc^{0,33}.$$

Коэффициент диффузии

$$D = 0,216 \cdot 10^{-4} \left(\frac{293}{273}\right)^{1,8} \frac{0,101}{0,202} = 0,123 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}.$$

Число Шмидта

$$Sc = \frac{15,06 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 0,123 \cdot 10^{-4}} = 0,61.$$

$$D = 0,216 \cdot 10^{-4} \left(\frac{293}{273}\right)^{1,8} \frac{0,101}{0,202} = 0,123 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}.$$

Число Шервуда

$$Sh = 0,332(6,64 \cdot 10^4)^{0,5} \cdot 0,61^{0,33} = 72,55.$$

Коэффициент массоотдачи

$$\beta = Sh \frac{\rho D}{l} = 72,55 \frac{1,205 \cdot 2 \cdot 0,123 \cdot 10^{-4}}{0,5} = 4,3 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}.$$

Ответ: $\beta = 4,3 \cdot 10^{-3}$ кг/(м²·с).

2. На воздушной модели, выполненной в масштабе 1/8 натуральной величины, производилось изучение массоотдачи конвекцией. Для первого газохода модели при различных скоростях воздуха были получены следующие значения коэффициента массоотдачи:

$w_m, \text{ м/с}$	2	3,14	4,65	8,8
$\beta_m, \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$	50,4	68,6	90,6	141

Средняя температура воздуха, проходящего через модель, $t_{ж.м} = 20^\circ\text{C}$. Диаметр трубок модели $d_m = 12,5$ мм. Коэффициент массоотдачи β_m при обработке опытных данных был отнесен к средней арифметической разности температур между жидкостью и стенкой. На основе данных, полученных на модели, найти формулу для расчета массоотдачи конвекцией в первом газоходе котла в виде зависимости $Sh = f(Re)$.

Указания к решению

Зависимость для массоотдачи искать в виде $Sh = CRe^n$. Для воздуха $D_{ж.м} = 0,026$ м²/с и $v_{ж.м} = 15,06 \cdot 10^{-6}$ м²/с при $t_{ж.м} = 20^\circ\text{C}$. Плотность принять $\rho = 1$ кг/м³.

Ответ: $Sh = 0,15 \cdot Re^{0,665}$.

3. Тонкая пластина длиной $l_0 = 2$ м и шириной $a = 1,5$ м обтекается продольным потоком воздуха. Скорость и температура набегающего потока, соответственно, $w_0 = 5$ м/с; $t_0 = 20^\circ\text{C}$. Определить средний по длине пластины коэффициент массоотдачи.

Решение

Для определения режима движения жидкости вычисляем значение числа Рейнольдса $Re = \frac{w_0 l_0}{\nu} = 6,64 \cdot 10^5$. Так как $Re > 5 \cdot 10^5$, то режим течения турбулентный, поэтому средняя по длине массоотдача может быть рассчитан по формуле

$$Sh_{ж} = 0,037 \cdot Re_{ж}^{0,8} Sc_{ж}^{0,43} = 1365, \quad \beta = \frac{Sh \cdot D \cdot \rho}{l_0} = 0,02 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$$

Ответ: $\beta = 0,02 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$.

4. Плоская пластина длиной $l = 1$ м обтекается продольным потоком воздуха. Скорость и температура набегающего потока воздуха $w_0 = 80$ м/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 массоотдачи с поверхности пластины. Кроме того, вычислить местные значения коэффициентов массоотдачи на расстояниях $x = 0,1 l_0$; $0,2 l_0$; $0,5 l_0$; $0,8 l_0$ и $1,0 l_0$ от передней кромки пластины.

Ответ: Средний коэффициент массоотдачи $\beta = 0,217$ кг/(м²с).

x / l_0	0,1	0,2	0,5	0,8	1,0
$\beta_x, \text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$	0,27	0,24	0,19	0,18	0,17
	5		9	15	36

Решение

Для определения режима движения жидкости вычисляем значение числа Рейнольдса: $Re = \frac{w_0 l_0}{\nu} = 5,65 \cdot 10^6$. Так как $Re > 5 \cdot 10^5$, то режим течения турбулентный, поэтому для воздуха средняя по длине массоотдача может быть рассчитана по формуле $Sh_{ж} = 0,037 \cdot Re_{ж}^{0,8} Sc_{ж}^{0,43} = 7575$, а для вычисления местного коэффициента теплоотдачи можно использовать формулу $\beta = \frac{Sh \cdot D \cdot \rho}{l_0} = 0,217 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$.

Ответ: $\beta = 0,217$ кг/(м²с).

5. Капля воды находится во влажном воздухе. Парциальное давление водяного пара равно $7,01 \cdot 10^4$ Па, а полное давление составляет $9,01 \cdot 10^4$ Па. В данный момент времени диаметр капли $d = 2$ мм, а её температура $t_c = 86^\circ\text{C}$. Найти плотность диффу-

зионного потока j_{1c} , плотность полного потока J_{1c} , а также плотность теплового потока q_c на поверхности капли. Движением капли относительно воздуха пренебречь и считать, что число Льюиса $Le=1$.

Ответ: $j_{1c}=8,22 \cdot 10^{-4}$ кг/(м²·с), $J_{1c}=23,76 \cdot 10^{-4}$ кг/(м²·с) и $q_c=79,69$ Вт/м².