

Министерство образования Российской Федерации

Ивановский государственный энергетический университет

Кафедра теоретических основ теплотехники

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ

ТЕПЛОМАССОБМЕН

Программа дисциплины, методические указания и задания
для выполнения контрольной работы
для студентов заочного факультета теплотехнических специальностей

Часть 1

Иваново 2002

Составители: В.В. БУХМИРОВ
Т.Е. СОЗИНОВА
М.И. ЧАСТУХИНА

Редактор А.А. ВАРЕНЦОВ

Методические указания предназначены для студентов теплотехнических специальностей заочного факультета Ивановского государственного энергетического университета. Они включают программу дисциплины "Теоретические основы теплотехники" — раздел "Тепломассообмен". Программа дисциплины содержит требования государственного образовательного стандарта (ГОС), перечень всех тем и список рекомендуемой литературы по данной дисциплине. Методические указания к выполнению контрольной работы содержат основные теоретические положения, задачи и варианты заданий, а также требования к оформлению работы.

Рецензент

кафедра теоретических основ теплотехники Ивановского государственного энергетического университета

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА
дисциплины
"ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ"
раздел **"ТЕПЛОМАСООБМЕН"**

При составлении рабочей программы были учтены требования ГОС по общим естественнонаучным дисциплинам — ЕН, общепрофессиональным дисциплинам – ОПД и по специальным дисциплинам — СД.

Студенты заочного факультета специальности 100500 изучают курс ТМО в один семестр. Студенты, работающие по двухсеместровой программе, во втором семестре выполняют курсовую работу "Тепловой расчет теплообменного аппарата".

ВВЕДЕНИЕ

Предмет тепломассообмена. Область применения и значение тепломассообмена. Количество теплоты. Тепловой поток. Удельные тепловые потоки: поверхностная плотность теплового потока, линейная плотность теплового потока, объемная плотность тепловыделений. Виды теплообмена и их характеристики. Теплоотдача и теплопередача. Температурное поле. Изотермическая поверхность. Градиент температуры.

Тема 1. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

1.1. Основной закон теории теплопроводности — постулат Фурье. Коэффициент теплопроводности. Коэффициент температуропроводности. Критерии Фурье и Био.

1.2. Дифференциальные уравнения теплопроводности (без вывода). Частные случаи записи дифференциального уравнения теплопроводности.

1.3. Условия однозначности для решения дифференциального уравнения теплопроводности. Методы решения дифференциального уравнения теплопроводности.

1.4. Аналитические решения дифференциального уравнения теплопроводности при граничных условиях I, II и III рода. Режимы нагрева (охлаждения) твердых тел.

1.5. Графическое представление аналитического решения дифференциального уравнения теплопроводности при граничных условиях III рода.

1.6. Численные методы исследования нестационарного теплообмена.

1.7. Стационарная теплопроводность. Передача теплоты через плоскую и стенку при граничных условиях I и III родов.

1.8. Теплопередача через цилиндрическую стенку.

1.9. Теплопередача через шаровую стенку.

1.10. Критический диаметр цилиндрической и шаровой стенок.

Тема 2. КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН

2.1. Основные понятия и определения. Дифференциальное уравнение энергии движущейся среды. Уравнения движения среды (уравнения Навье – Стокса) и уравнение неразрывности. Условия однозначности при решении дифференциальных уравнений конвективного теплообмена.

2.2. Основы теории подобия. Закон конвективной теплоотдачи — закон Ньютона – Рихмана. Правила и требования теории подобия. Дифференциальные уравнения конвективной теплоотдачи. Вывод критериев Нуссельта и относительной безразмерной температуры приведением дифференциального уравнения конвективной теплоотдачи к безразмерному виду.

2.3. Вывод критериев гомохронности, Фруда, Галилея, Архимеда, Грасгофа, Эйлера, Рейнольдса и Пекле. Критерий Прандтля.

2.4. Уравнения подобия. Моделирование процессов конвективного теплообмена. Получение эмпирических формул. Определяющие размер и температура.

2.5. Применение эмпирических формул для расчета конвективной теплоотдачи. Теплоотдача при свободной конвекции около вертикальной и горизонтальной поверхности, около горизонтальной трубы, в ограниченном пространстве.

2.6. Теплоотдача при продольном омывании плоской пластины, при вынужденной движении в трубах и каналах, при поперечном омывании труб и трубных пучков.

Тема 3. ТЕПЛООБМЕН ИЗЛУЧЕНИЕМ

3.1 Основные понятия и определения лучистого теплообмена. Виды лучистых потоков. Основные законы излучения абсолютно черного тела: закон Планка и закон Стефана-Больцмана. Закон Кирхгофа. Понятие серого тела.

3.2. Понятие углового коэффициента. Свойства угловых коэффициентов. Теплообмен излучением в замкнутой системе, состоящей из двух тел, разделенных лучепрозрачной средой. Лучистый теплообмен при наличии экранов.

3.3. Собственное излучение газа. Теплообмен излучением между газом и окружающей его замкнутой серой оболочкой.

3.4. Сложный теплообмен. Коэффициент теплоотдачи излучением.

Тема 4. ТЕПЛОТДАЧА ПРИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ

4.1. Теплоотдача при конденсации. Основные понятия и определения. Критерий Рейнольдса при конденсации. Режимы движения пленки конденсата.

4.2. Теплоотдача при пленочной конденсации неподвижного пара на вертикальной поверхности.

4.3. Теплоотдача при пленочной конденсации неподвижного пара на наклонной поверхности и горизонтальной трубе. Теплоотдача при конденсации в трубных пучках. Факторы, влияющие на теплообмен при конденсации.

4.4. Теплообмен при кипении. Физические особенности процесса кипения. Кривая кипения при граничных условиях 1 рода и 2 рода. Теплоотдача при пузырьковом кипении в большом объеме. Теплоотдача при пленочном кипении жидкости. Кризисы кипения.

4.5. Теплоотдача при кипении в трубах. Вертикальная труба. Горизонтальная труба. Расчет теплоотдачи при кипении в трубах.

Тема 5. ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ

5.1. Классификация теплообменников. Виды расчетов теплообменников. Уравнение теплового баланса теплообменника. Понятие водяного эквивалента.

5.2. Уравнение теплопередачи. Изменение температуры теплоносителей вдоль поверхности нагрева. Средняя разность температур.

5.3. Тепловой конструктивный и тепловой поверочный расчеты рекуперативного теплообменника.

Тема 6. МАССООБМЕН

6.1. Массообмен, молекулярная диффузия, концентрационная диффузия, термодиффузия.

6.2. Поток массы, вектор плотности потока массы.

6.3. Математическое описание процессов массо – и теплообмена.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература

1. **Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.** Теплопередача: Учебник для вузов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.

2. **Краснощеков Е.А., Сукомел А.С.** Задачник по теплопередаче: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 288 с.

Дополнительная литература

3. **Михеев М.А., Михеева И.М.** Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.

4. **Пример** расчета теплообменника: Метод. указания к курсовой работе /В.М. Шипилов, В.В. Бухмиров. – Иваново, 1988.

5. **Кириллов Л.П., Юрьев Ю.С., Бобков В.П.** Справочник по теплофизическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). – М.: Энергоатомиздат, 1984.

6. **Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А.** Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. – М. Metallургия, 1990.

7. **Основные** понятия теории теплообмена: Метод. указания / Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина; Сост. А.А. Варенцов.- Иваново, 1994.- 32 с.

8. **Типовые** вопросы и задачи по курсу "Тепломассообмен". Раздел "Стационарные процессы теплопроводности и теплопередачи" : Метод. указания / Иван. энерг. ин-т им. В.И. Ленина; Сост. В.В. Бухмиров, А.А. Варенцов.– Иваново, 1991. - 28 с.

9. **Исследование** процесса нестационарной теплопроводности на численной имитационной математической модели: Метод. указания/ Иван. гос. энерг. ун-т; Сост. Бухмиров В.В., Мезина Е.Е., Созинова Т.Е. – Иваново, 1999. – 31 с.

10. **Пакет** задач по разделу "Радиационный теплообмен" курса ТМО Метод. указания/ Иван. гос. энерг. ун-т; Сост. Бухмиров В.В., Созинова Т.Е., Частухина М.И. – Иваново, 1999. – 16 с.

11. **Воскресенский В.Ю.** Тепломассообмен: Методические указания и контрольные задания для студентов–заочников энергетических специальностей вузов.– М.: Высшая школа, 1990.– 64 с.

12. **Ривкин С.Л., Александров А.А.** Термодинамические свойства воды и водяного пара: Справочник. – М.: Энергоиздат, 1984. – 80 с.

КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Общие методические указания

Согласно учебному плану студенту-заочнику, изучающему курс теплообмен в один семестр необходимо выполнить две контрольные работы. При изучении курса в два семестра студент-заочник в первом семестре также выполняет две контрольные работы, а во втором семестре пишет и защищает курсовую работу "Тепловой расчет теплообменного аппарата". И первая и вторая контрольные работы состоят из 4 вопросов и 5 задач. Задания на курсовое проектирование и методические указания к выполнению курсовой работы приведены во второй части методических указаний.

При выполнении контрольных работ отвечать на вопросы и решать задачи следует, строго придерживаясь своего варианта. Номера вопросов и вариантов задач в контрольной работе определяют по табл. В.1 "Варианты заданий" в зависимости от двух последних цифр шифра студента. Например, при шифре 116 или 166 (две последние цифры соответственно 16 и 66) студент отвечает на вопросы и решает следующие варианты задач: 4, 20, 29, 37, 44. Формулировки контрольных вопросов и условия вариантов задач в контрольной работе нужно переписывать полностью.

Решения задач должны сопровождаться краткими объяснениями и подробными вычислениями. При расчете какой-либо величины нужно словами указать, какая величина определяется. В процессе решения задач необходимо сначала привести формулы, лежащие в основе вычислений, проделать с ними все выкладки (в буквенном выражении) и лишь затем подставлять соответствующую

щие числовые значения и производить вычисления. Нужно указать единицы величин, как заданных в условии задач, так и найденных в результате решения.

Ответы на контрольные вопросы должны быть исчерпывающими, хотя и не пространными. Лаконичные ответы, так же как и ответы, списанные с учебника, не допускаются. При решении задач и в ответах на вопросы следует придерживаться принятой в учебнике [1] системы обозначений, терминов и Международной системы единиц (СИ).

Точность вычислений зависит от точности заданных величин или выбранных исходных данных, но в общем случае не следует стремиться к точности выше, чем 0,5 %.

Контрольные работы выполняются в тетради. Для заметок рецензента оставляют поля и в конце работы несколько чистых страниц.

Перед выполнением контрольного задания студент – заочник должен ознакомиться с методикой решения соответствующих задач по примерам, приведенным в задачнике [2]. В конце контрольной работы должна стоять подпись студента.

Таблица В.1. Варианты заданий

Две последние цифры шифра студента	Номера вопросов и вариантов задач	Две последние цифры шифра студента	Номера вопросов и вариантов задач
01, 51	2, 12, 23, 34, 41	26, 76	7, 16, 25, 34, 48
02, 52	6, 14, 26, 38, 42	27, 77	6, 15, 24, 33, 44
03, 53	4, 15, 27, 39, 43	28, 78	5, 14, 23, 32, 50
04, 54	5, 14, 24, 34, 44	29, 79	4, 13, 22, 31, 43
05, 55	6, 15, 25, 35, 45	30, 80	3, 12, 21, 40, 48
06, 56	10, 16, 26, 36, 46	31, 81	4, 12, 30, 38, 47
07, 57	9, 17, 27, 37, 47	32, 82	6, 14, 22, 36, 46
08, 58	8, 18, 28, 38, 48	33, 83	8, 16, 24, 34, 45
09, 59	7, 19, 29, 39, 49	34, 84	10, 18, 26, 32, 44
10, 60	6, 20, 30, 40, 50	35, 85	2, 20, 28, 40, 43
11, 61	9, 18, 27, 36, 49	36, 86	1, 15, 25, 35, 42
12, 62	8, 17, 26, 35, 48	37, 87	3, 16, 30, 31, 41
13, 63	7, 18, 22, 40, 47	38, 88	5, 15, 21, 35, 42
14, 64	6, 17, 21, 39, 46	39, 89	7, 17, 28, 38, 43
15, 65	5, 16, 30, 38, 45	40, 90	9, 18, 23, 34, 44
16, 66	4, 20, 29, 37, 44	41, 91	10, 20, 21, 33, 45
17, 67	3, 19, 28, 36, 43	42, 92	9, 13, 30, 33, 46
18, 68	2, 13, 27, 35, 42	43, 93	6, 14, 29, 40, 47
19, 69	1, 11, 26, 34, 41	44, 94	4, 16, 30, 36, 48
20, 70	10, 12, 25, 33, 42	45, 95	2, 20, 27, 35, 49
21, 71	10, 18, 24, 32, 43	46, 96	9, 11, 26, 40, 50
22, 72	9, 16, 23, 31, 44	47, 97	7, 12, 25, 39, 48
23, 73	6, 14, 22, 38, 45	48, 98	6, 15, 22, 31, 47
24, 74	7, 17, 21, 39, 46	49, 99	5, 13, 24, 38, 48
25, 75	8, 18, 22, 40, 47	50, 00	3, 14, 23, 34, 45

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 1

В О П Р О С Ы

1. Дайте определение температурного поля. Назовите характеристики температурного поля. Приведите примеры.
2. Укажите, в чем состоят условия, характеризующие наряду с формой, размерами и физическими свойствами однозначность теплопередачи через твердое тело.
3. Опишите одномерное стационарное температурное поле в неограниченной пластине. Дайте его аналитическое и графическое изображение. Приведите примеры.
4. Опишите одномерное стационарное температурное поле в неограниченном цилиндре. Дайте его аналитическое и графическое изображение. Приведите примеры.
5. Укажите основные способы и приведите примеры графического изображения температурного поля.
6. Опишите одномерное стационарное температурное поле в сфере. Дайте его аналитическое и графическое изображение. Приведите примеры.
7. Как изменяется градиент температуры по толщине плоской и цилиндрической стенки при стационарном тепловом потоке в случае, когда коэффициент теплопроводности λ не зависит от температуры?
8. Дайте объяснение понятиям: тепловой поток, поверхностная плотность теплового потока, линейная плотность теплового потока; приведите их единицы.
9. Какую роль играет коэффициент теплопроводности в расчетах теплопроводности твердых тел? Приведите числовые значения этого коэффициента для серебра, нержавеющей стали, бетона, минеральной ваты и воздуха при нормальных условиях.
10. Сформулируйте закон теплопроводности Фурье. Дайте пояснение к величинам, входящим в аналитическое выражение закона; приведите единицы измерения этих величин.
11. Сформулируйте закон теплоотдачи Ньютона–Рихмана. Дайте пояснение к величинам, входящим в аналитическое выражение закона; проиллюстрируйте графиком характер изменения температуры жидкости вблизи поверхности теплообмена.
12. В какой мере должна быть отдалена от поверхности точка, в которой фиксируется температура жидкости в соответствии с законом Ньютона–Рихмана? Проиллюстрируйте графиком характер изменения температуры жидкости вблизи теплоотдающей поверхности.
13. Изобразите схематично графики распределения температуры, если коэффициент теплопроводности не зависит от температуры: а) в плоской стенке; б) в цилиндрической стенке при подводе теплоты извне.

14. Изобразите графически распределение температуры в двухслойной плоской стенке ($\delta_1 = \delta_2$), если $\lambda_1 > \lambda_2$ в случае стационарного теплообмена. Объясните различие в полях температуры каждого слоя.

15. Изобразите графически распределение температуры в двухслойной плоской стенке ($\delta_1 = \delta_2$), если $\lambda_1 < \lambda_2$ в случае стационарного теплообмена. Объясните различие в полях температуры каждого слоя.

16. Изобразите графически распределение температуры в двухслойной плоской стенке для случая, если коэффициенты теплопроводности равны $\lambda_1 = \lambda_2$, а толщины слоев разные $\delta_1 > \delta_2$ в случае стационарного теплообмена.

17. Изобразите графически распределение температуры в двухслойной плоской стенке для случая, если коэффициенты теплопроводности равны $\lambda_1 = \lambda_2$, а толщины — разные $\delta_1 < \delta_2$ в случае стационарного теплообмена.

18. Изобразите схематично графики распределения температуры в случае стационарного теплообмена: а) в плоской стенке; б) в цилиндрической стенке при подводе теплоты изнутри.

19. Изобразите схематично графики распределения температуры в плоской стенке в случае стационарного теплообмена, если коэффициент теплопроводности: а) не зависит от температуры; б) увеличивается с ростом температуры.

20. Изобразите схематично графики распределения температуры в плоской стенке в случае стационарного теплообмена, если коэффициент теплопроводности: а) не зависит от температуры; б) уменьшается с ростом температуры. Поясните различие между графиками.

21. Не приводя вывод в целом, укажите, на каких двух основных законах базируется дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье.

22. Опишите дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье, дайте анализ физического или геометрического смысла членов уравнения — производной по времени, коэффициента температуропроводности, оператора Лапласа и мощности внутренних источников теплоты. Приведите их единицы.

23. Покажите, к какому виду приводится оператор Лапласа в случае одномерного плоского и одномерного цилиндрического полей.

24. В чем заключаются условия однозначности. С какой целью они присоединяются к дифференциальному уравнению теплопроводности?

25. В чем заключаются граничные условия третьего рода?

26. Для чего к дифференциальному уравнению присоединяются начальные и граничные условия? Перечислите три способа задания граничных условий?

27. Что характеризует собой коэффициент температуропроводности? Выведите его размерность, используя дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье.

28. Какие известны способы задания граничных условий для дифференциального уравнения теплопроводности? Перечислить и дать краткое определение.

29. Используя дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье, объясните, как влияет на скорость изменения температур в теле увеличения коэффициента температуропроводности.

30. Какова связь между коэффициентом теплопроводности, коэффициентом температуропроводности и удельной теплоемкости материалов? Подтвердите эту связь анализом единиц величин.

31. Опишите черты сходства и различия чисел Био и Нуссельта.
32. Опишите черты сходства и различия чисел Нуссельта и Стантона.
33. Опишите черты сходства и различия чисел Рейнольдса и Пекле.
34. Опишите черты сходства и различия чисел Рейнольдса и Грасгофа.
35. Опишите взаимосвязь чисел Пекле и Рейнольдса.
36. Опишите черты сходства и различия чисел Нуссельта и Био.
37. Опишите черты сходства и различия чисел Стантона и Нуссельта.
38. Опишите черты сходства и различия чисел Пекле и Рейнольдса.
39. Опишите черты сходства и различия чисел Грасгофа и Рейнольдса.
40. Опишите взаимосвязь чисел Пекле, Рейнольдса и Прандтля.

Задача № 1-1

Камера сгорания выполнена из шамотного кирпича ($\lambda_k = 0,9 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$) толщиной $\delta_k = 250 \text{ мм}$. Снаружи стенки камеры изолированы двойным слоем изоляции. Первый слой изоляции ($\lambda_{из1} = 0,08 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$) толщиной $\delta_{из1}$, мм, второй наружный слой изоляции ($\lambda_{из2} = 0,15 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$) толщиной $\delta_{из2}$, мм. Температура газов в камере сгорания $t_{ж1}$, °С, температура воздуха в помещении $t_{ж2}$, °С. Коэффициент теплоотдачи от дымовых газов к кирпичной стенке α_1 , $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, а от наружной поверхности изоляции к воздуху помещения $\alpha_2 = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$

Определить коэффициент теплопередачи, плотность теплового потока (если она не задана), температуры теплоносителей и температуры на границе слоев обмуровки, считая контакт между слоями идеальным.

Определить также термические сопротивления теплоотдачи и теплопроводности для каждого слоя (R_t) и соответствующие им перепады температур (Δt).

Изобразить графически изменение температуры по толщине слоев и в пограничных слоях. Масштаб по толщине слоев и по температуре выбрать самостоятельно.

Исходные данные принять по табл. 1.1 в соответствии с Вашим вариантом задания (см. табл. В.1 раздела "Общие методические указания").

Таблица 1.1. **Варианты к задаче 1-1**

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\delta_{из1}$, мм	190	180	150	230	265	240	195	270	220	300
$\delta_{из2}$, мм	100	70	130	140	135	140	155	165	170	130
α_1 , $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$	100	80	70	130	60	90	80	150	250	150
$t_{ж1}$, °С				1150		1000			1040	1030

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_{c1}, ^\circ\text{C}$		900					1170	1230		
$t_{c2}, ^\circ\text{C}$			890		1170					
$t_{c3}, ^\circ\text{C}$					290		390			275
$t_{c4}, ^\circ\text{C}$		50	52						50	
$t_{ж2}, ^\circ\text{C}$	25			28				30		
$q, \text{Вт/м}^2$	310					225				

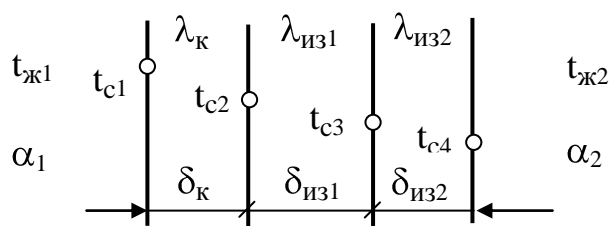


Рис. 1.1

На рис.1.1 схематично показано расположение слоев стенок топочной камеры.

Результаты расчетов необходимо занести в табл. 1.2.

Таблица 1.2. Результаты расчетов

Вариант	$k, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$q, \text{Вт}/\text{м}^2$	$t_{ж1}, ^\circ\text{C}$	$t_{c1}, ^\circ\text{C}$	$t_{c2}, ^\circ\text{C}$	$t_{c3}, ^\circ\text{C}$	$t_{c4}, ^\circ\text{C}$	$t_{ж2}, ^\circ\text{C}$

Задача № 1-2

Определить линейную плотность теплового потока для трубки парового котла ($\lambda_T = 40 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$), если внутренний диаметр паропровода $d_{\text{вн}}$, мм, наружный — $d_{\text{нар}}$, мм. Наружная сторона трубки омывается дымовыми газами с температурой $t_{ж1}, ^\circ\text{C}$, а внутри трубок движется вода с температурой $t_{ж2}, ^\circ\text{C}$. Снаружи трубка покрыта слоем сажи ($\lambda_c = 0,07 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$) толщиной 1,5 мм, а с внутренней стороны — слоем накипи ($\lambda_n = 0,15 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$) толщиной 2,5 мм. Коэффициент теплоотдачи от дымовых газов к стенке трубки $\alpha_1, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а со стороны воды $\alpha_2, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Определить также температуры на поверхностях трубки, сажи и накипи. Как изменится линейная плотность теплового потока для "чистой" трубки (без сажи и накипи) при прочих неизменных условиях.

Изобразить график изменения температуры по толщине слоев стенки трубки, сажи и накипи и в пограничных слоях (график выполнить в масштабе).

Исходные данные принять по табл. 1.4 в соответствии с Вашим вариантом задания (см. табл. В.1 раздела "Общие методические указания").

Таблица 1.4. Варианты к задаче 1-2

Исходные данные	Варианты									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$d_{вн}$, мм	30	36	42	32	38	44	34	40	46	35
$d_{нар}$, мм	36	44	51	38	46	54	40	48	55	42
$t_{ж1}$, °С	800	920	1000	830	950	1030	960	970	1060	900
$t_{ж2}$, °С	150	240	300	170	260	320	200	280	250	220
α_1 , Вт/(м ² ·К)	100	220	320	120	250	350	150	300	400	200
α_2 , Вт/(м ² ·К)	9000	2500	4000	1000	3000	5000	1500	3500	6000	2000

Расположение слоев цилиндрической стенки показано на рис. 1.2.

Результаты расчета необходимо занести в табл. 1.5.

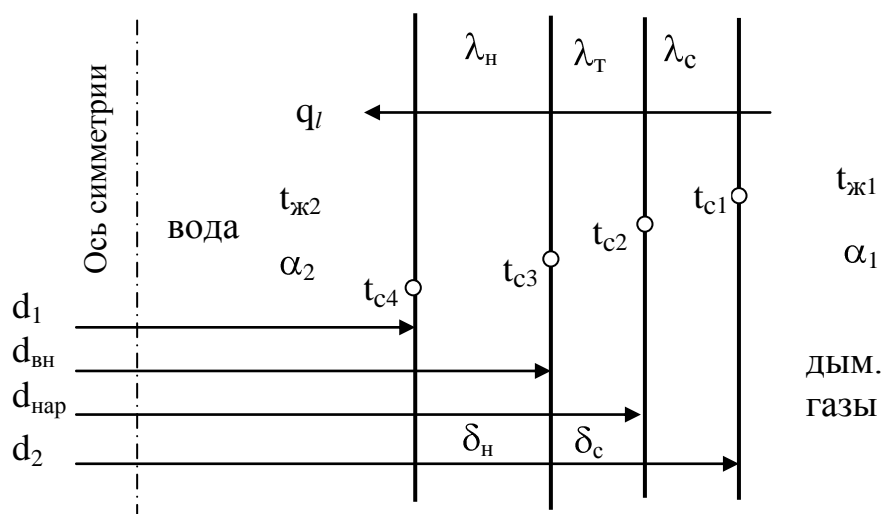


Рис. 1.2

Таблица 1.5. Результаты расчетов

Вариант	q_l , Вт/м	t_{c1} , °С	t_{c2} , °С	t_{c3} , °С	t_{c4} , °С	q_l' , Вт/м

q_l' – линейная плотность теплового потока "чистой" трубки (без сажи и накипи).

Методические указания к решению задач № 1-1 и № 1-2

Перед решением задач № 1-1 и № 1-2 рекомендуем изучить материалы учебника [1] на с. 24 ÷ 40.

Под теплопередачей понимают передачу теплоты от движущейся среды (жидкости) с большей температурой к движущейся среде (жидкости) с меньшей температурой через непроницаемую стенку любой формы. Таким образом, теплопередача включает в себя теплоотдачу от нагретой жидкости к стенке, теплопроводность внутри стенки, которая в общем случае может быть многослойной, и теплоотдачу от стенки к нагреваемой жидкости. Под термином "жидкость" понимают любую текучую среду: и капельные жидкости, и газы.

В стационарном режиме теплопередачи тепловой поток через плоскую, цилиндрическую и сферическую стенки есть величина постоянная ($Q = \text{пост}$) и температурное поле не изменяется во времени, а зависит только от координаты. В этом случае при условии постоянства теплофизических свойств тела, температура в плоской стенке изменяется линейно, а в цилиндрической — по логарифмическому закону.

Теплопередача через плоскую стенку

Расчет теплопередачи через плоскую стенку удобно выполнять, используя поверхностную плотность теплового потока

$$q = \frac{Q}{F}, \quad (1)$$

где Q – тепловой поток, Вт; F – площадь стенки, м^2 .

В этом случае

$$q = \frac{\Delta t}{R_t}, \quad (2)$$

где Δt – перепад температуры на заданном участке теплообмена, К ($^{\circ}\text{C}$), который может состоять из одного или нескольких смежных элементарных участков теплообмена: теплоотдачи и теплопроводности, а R_t – термическое сопротивление теплообмена этого участка или совокупности смежных участков, $(\text{м}^2 \cdot \text{K})/\text{Вт}$.

Термическое сопротивление теплоотдачи рассчитывается по формуле

$$R_{t,\alpha} = \frac{1}{\alpha}, \quad (3)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$, а формула для расчета термического сопротивления теплопроводности через i -й слой плоской стенки имеет вид

$$R_{t,i} = \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \quad (4)$$

где δ_i – толщина i -го слоя, м; λ_i – коэффициент теплопроводности i -го слоя многослойной стенки, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$.

Термическое сопротивление теплопередачи есть сумма термических сопротивлений всех элементарных участков теплообмена.

Рекомендуемая последовательность решения:

- а) определяют термические сопротивления всех элементарных участков;
- б) по двум заданным температурам в системе теплообмена находят плотность теплового потока по формуле (2);
- в) по найденному значению q и одной из известных температур рассчитывают остальные неизвестные температуры слоев и жидкостей.

Теплопередача через цилиндрическую стенку

Для расчета теплопередачи через стенку цилиндрической формы используют удельный тепловой поток, который называется линейной плотностью теплового потока

$$q_l = \frac{Q}{l}, \quad (5)$$

где Q – тепловой поток, Вт; l – длина цилиндрической стенки, м.

Тогда

$$q_l = \frac{\pi \Delta t}{R_l}, \quad (6)$$

где Δt – перепад температуры на заданном участке теплообмена, К ($^{\circ}\text{C}$), который может состоять из ряда элементарных участков теплообмена: теплоотдачи и теплопроводности, а R_l – линейное термическое сопротивление теплообмена этого участка, (м·К)/Вт.

Линейное термическое сопротивление теплоотдачи рассчитывается по формуле

$$R_{l,\alpha} = \frac{1}{\alpha \cdot d}, \quad (7)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{K}$), а d – диаметр омываемой поверхности цилиндрической стенки, м.

Линейное термическое сопротивление теплопроводности i -го слоя цилиндрической стенки определяется по формуле

$$R_{l,i} = \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}, \quad (8)$$

в которой λ_i – коэффициент теплопроводности i -го слоя цилиндрической стенки, Вт/(м·К); d_i и d_{i+1} – внутренний и наружный диаметры i -го слоя цилиндрической стенки, м.

Рекомендуемый порядок решения задачи о теплопередаче через цилиндрическую стенку полностью совпадает с рассмотренным выше для плоской стенки.

При решении задачи 1-2 обратите внимание, что в данном случае тепловой поток направлен от дымовых газов к воде, движущейся внутри трубки.

Задача 1-3

Определить температуру в центре и на поверхности пластины толщиной 2δ через время τ после погружения в горячую среду (масло или газ) либо время нагрева до заданной температуры в центре или на поверхности пластины (согласно своего варианта), если толщина пластины во много раз меньше ее ширины и длины. Найти также среднюю по массе температуру пластины.

Исходные данные принять по табл. 1.6 в соответствии с Вашим вариантом задания (см. табл. В.1 раздела "Общие методические указания").

Таблица 1.6. **Варианты к задаче 1-3**

Наименование	Варианты задач									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Толщина пластины 2δ , мм	60	100	70	90	80	20	36	24	32	28
Материал пластины	Сталь					Огнеупор				
Коэффициент теплопроводности пластины λ , Вт/(м·К)	20	40	25	35	30	1	1,8	1,2	1,6	1,4
Удельная теплоемкость c_p , Дж/(кг·К)	270	520	330	450	390	910	1200	1000	1140	1080
Плотность ρ , кг/м ³	7500	7700	7550	7650	7600	1100	1500	1200	1400	1300
Одинаковая по толщине начальная температура пластины t_0 , °С	10	30	15	25	20	10	30	15	25	20
Среда, в которую помещена пластина	Масло					Газ				
Температура среды (поддерживается постоянной) $t_{ж}$, °С	100	120	105	115	110	1000	1200	1050	1150	1100
Коэффициент теплоотдачи от среды к пластине α , Вт/(м ² ·К)	350	150	300	200	250	26	33	27	30	28
Длительность нагрева τ , мин	10	—	15	—	20	—	30	—	25	—

Наименование	Варианты задач									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Температура в конце нагрева:										
— на поверхности пластины $t_w, ^\circ\text{C}$;	—	89	—	—	—	783	—	—	—	993
— в средней плоскости пластины $t_c, ^\circ\text{C}$	—	—	—	90	—	—	—	887	—	—

Методические указания к решению задачи № 1-3

Теоретические положения расчета температурного поля бесконечной пластины при нестационарном процессе теплопроводности подробно изложены на с.66÷78 учебника [1].

Для решения задачи удобно использовать известную теоретическую зависимость между относительной безразмерной температурой (Θ^*) и критериями Фурье (Fo) и Био (Bi) для характерных точек пластины — поверхности и центра:

$$\Theta^* = f(Fo, Bi), \quad (1)$$

справедливой для тел так называемой простейшей или классической формы, к которым относят бесконечную (неограниченную) пластину, бесконечный (неограниченный) цилиндр и шар (сферу). В зависимости (1):

$$\Theta^* = \frac{t^* - t_{ж}}{t_0 - t_{ж}}; \quad Fo = \frac{a\tau}{\delta^2}; \quad Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}, \quad (2)$$

где $t^* = t_{x=0}$ — температура середины пластины (теплового центра), К ($^\circ\text{C}$), либо $t^* = t_{x=\delta}$ — температура поверхности пластины, К ($^\circ\text{C}$); $t_{ж}$ — температура окружающей среды, К ($^\circ\text{C}$); δ — половина толщины пластины, так как нагрев пластины происходит симметрично с обеих сторон, м; $a = \lambda/(\rho \cdot c_p)$ — коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; λ — коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; c_p — удельная массовая теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; ρ — плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; α — коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; τ — время нагрева, с.

Зависимость (1) для бесконечной пластины изображена на графиках в учебнике [1] на с. 74 и в задачнике [2] на с.38, 39.

Если свойства и размеры пластины заданы, то в инженерных расчетах рассматривают две основные постановки задачи расчета нагрева (охлаждения) тел простейшей формы: прямую и обратную.

При решении прямой задачи известны:

- теплофизические свойства материала пластины: a , λ , c_p , ρ ;
- толщина пластины: 2δ ;
- коэффициент теплоотдачи: α ;
- начальная температура пластины: t_0 ;

— температура окружающей среды: $t_{ж}$;

— время нагрева (охлаждения): τ .

В результате решения прямой задачи находят температуру поверхности $t_{x=\delta}$ и температуру середины пластины (теплового центра) $t_{x=0}$ по следующему алгоритму:

а) рассчитывают значения критериев Фурье и Био по формуле (2);

б) по графикам в учебнике [1] или задачнике [2] находят значения относительной безразмерной температуры середины пластины $\Theta_{x=0}$ и ее поверхности $\Theta_{x=\delta}$;

в) рассчитывают температуру в средней плоскости пластины и на ее поверхности по формуле

$$t^* = t_{ж} + (t_0 - t_{ж}) \Theta^*; \quad (3)$$

г) находят среднюю по массе температуру пластины t_m при допущении параболического распределения температуры по ее сечению:

$$t_m = t_{x=0} + \frac{1}{3}(t_{x=\delta} - t_{x=0}). \quad (4)$$

При решении обратной задачи определяют время (τ), необходимое для достижения заданной температуры поверхности пластины ($t_{x=\delta}$) либо температуры ее средней плоскости ($t_{x=0}$). Также находят неизвестную по условию задачи температуру ($t_{x=0}$ или $t_{x=\delta}$) и среднemasсовую температуру пластины.

Для решения обратной задачи должны быть заданы:

— теплофизические свойства материала пластины: a , λ , c_p , ρ ;

— толщина пластины: 2δ ;

— коэффициент теплоотдачи: α ;

— начальная температура пластины: t_0 ;

— температура окружающей среды: $t_{ж}$;

— температура либо поверхности пластины ($t_{x=\delta}$), либо ее средней плоскости ($t_{x=0}$) в конце нагрева.

Алгоритм определения τ , $t_{x=0}$ или $t_{x=\delta}$ и t_m заключается в следующем:

а) рассчитывают критерий Био и заданную относительную безразмерную температуру $\Theta_{x=\delta}$ или $\Theta_{x=0}$ по формуле (2);

б) по графикам [1] или [2] находят критерий Фурье, по значению которого рассчитывают время нагрева пластины:

$$\tau = \frac{Fo \delta^2}{a}; \quad (5)$$

в) по найденному критерию Фурье и заданному критерию Био находят неизвестную относительную безразмерную температуру $\Theta_{x=\delta}$, если задана $\Theta_{x=0}$, и соответственно, находят $\Theta_{x=0}$, если задана $\Theta_{x=\delta}$. Затем по формуле (3) рассчитывают температуру этой поверхности;

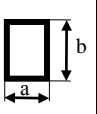

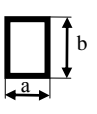

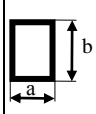
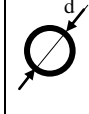
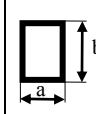
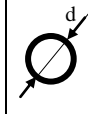
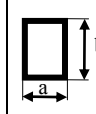
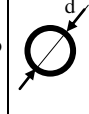
г) в заключение расчета по формуле (4) находят среднemasсовую температуру пластины.

Задача 1-4

Определить тепловой поток, характеризующий конвективную теплоотдачу к струе жидкости, протекающей по каналу длиной 3 м. Обосновать выбор расчетного уравнения, применяемого при решении задачи.

Исходные данные принять по табл. 1.7 в соответствии с Вашим вариантом задания (см. табл. В.1 раздела "Общие методические указания").

Таблица 1.7. **Варианты к задаче 1-4**

Наименование	Варианты задач									
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Температура стенки трубы, °С	-5	15	30	120	90	-5	15	60	85	45
Средняя температура жидкости, °С	0	10	20	30	30	20	10	10	90	50
Род жидкости	Воздух	Вода	Вода	Воздух	Воздух	Воздух	Вода	Воздух	Вода	Вода
Средняя скорость потока, м/с	10	3,9	5	6	4	2,25	2,8	1,9	0,55	1,2
Размер канала, мм	 a = 30 b = 40	 d = 35	 a = 35 b = 45	 d = 40	 a = 30 b = 40	 d = 75	 a = 70 b = 80	 d = 80	 a = 75 b = 85	 d = 85

Задача 1-5

Определить тепловой поток, характеризующий конвективную теплоотдачу от поверхности объекта — трубы заданного диаметра длиной 4,0 м или вертикальной стенки заданной высоты при ширине 10 м. Обосновать выбор безразмерного уравнения, примененного для решения задачи.

Исходные данные принять по табл. 1.8 в соответствии с Вашим вариантом задания (см. табл. В.1 раздела "Общие методические указания").

Таблица 1.8. **Варианты к задаче 1-5**

Наименование	Вариант задач									
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Конвективный теплообмен характеризуется условиями свободной конвекции	Вблизи горизонтальной трубы					Вблизи вертикальной стенки				
Диаметр трубы, м	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	—	—	—	—	—

Наименование	Варианты задач									
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Высота стенки, м	—	—	—	—	—	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Температура на поверхности объекта (трубы, стенки) t_c , °С	90	– 10	30	– 5	15	120	90	60	85	45
Средняя температура жидкости, °С	30	20	20	15	10	15	30	180	90	50
Род жидкости	Вода	Воз- дух	Вода	Воз- дух	Вода	Воз- дух	Воз- дух	Воз- дух	Вода	Вода

Методические указания к решению задач № 1-4 и № 1-5

Основные положения учения о конвективном теплообмене изложены в четвертой главе, а расчет теплоотдачи при вынужденном течении жидкости в трубах и каналах представлен в восьмой главе учебника [1]. Десятая глава того же учебника [1] посвящена расчету теплоотдачи при свободном движении текучей среды.

Тепловой поток Q , передаваемый от поверхности к омывающей ее текучей среде (жидкости) или, наоборот, от жидкости к стенке рассчитывают по закону Ньютона – Рихмана:

$$Q = \alpha |t_c - t_{ж}| F, \quad (1)$$

$$\text{или } Q = \alpha \Delta t F, \quad (2)$$

$$\text{или } q = \alpha \Delta t, \quad (3)$$

где Q – тепловой поток, Вт; $q = Q/F$ – поверхностная плотность теплового потока, Вт/м²; F – площадь поверхности теплообмена, м²; α – средний коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·К); $\Delta t = |t_c - t_{ж}|$ – температурный напор теплоотдачи, °С (К); t_c – температура поверхности теплообмена, °С (К); $t_{ж}$ – температура текучей среды (жидкости) вдали от поверхности теплообмена, °С (К).

При заданных геометрических размерах системы теплообмена и температурах поверхности и жидкости задача расчета теплового потока сводится к определению коэффициента теплоотдачи (α).

Величину коэффициента теплоотдачи находят из безразмерного (критериального) уравнения, которое получают в результате обработки многочисленных экспериментальных данных. Форма критериального уравнения зависит от вида конвекции (свободная или вынужденная) и режима движения жидкости (ламинарный, переходный или турбулентный):

— при вынужденной конвекции и интенсивном движении жидкости (переходный и турбулентный режимы) критериальное уравнение, как правило, имеет вид

$$Nu = c Re^n Pr^m \varepsilon_t \varepsilon_l; \quad (4)$$

— при вынужденном ламинарном течении жидкости

$$\text{Nu} = c \text{Gr}^k \text{Re}^n \text{Pr}^m \varepsilon_t \varepsilon_l; \quad (5)$$

— при свободной конвекции

$$\text{Nu} = c \text{Gr}^n \text{Pr}^m \varepsilon_t. \quad (6)$$

В формулах (4)÷(6): c , n , m , k – эмпирические постоянные; $\text{Nu} = \alpha l_0/\lambda$ – определяемый критерий — число Нуссельта; $\text{Re} = w l_0/\nu$ – определяющий критерий Рейнольдса; $\text{Pr} = \nu/a$ – определяющий критерий Прандтля; $\text{Gr} = (g l_0^3/\nu^2) \cdot \beta \cdot \Delta t$ – определяющий критерий Грасгофа; ε_t – поправочный коэффициент, учитывающий зависимость теплофизических свойств жидкости от температуры; ε_l – поправочный коэффициент, учитывающий особенность теплообмена на начальном участке гидродинамической и тепловой стабилизации течения в трубах и каналах; l_0 – определяющий (характерный) размер системы теплообмена, м; w – определяющая скорость, м/с; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; $\Delta t = |t_c - t_{\text{ж}}|$ – температурный напор теплоотдачи, °С (К).

Часто для расчета поправочного коэффициента ε_t используют формулу

$$\varepsilon_t = \left(\frac{\text{Pr}_{\text{ж}}}{\text{Pr}_c} \right)^{0,25}, \quad (7)$$

где $\text{Pr}_{\text{ж}}$ – критерий Прандтля жидкости, который находят по таблицам свойств жидкости при температуре жидкости, а Pr_c – критерий Прандтля жидкости, но его находят по таблицам свойств жидкости при температуре поверхности теплообмена (стенки).

Физические свойства текучей среды (λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); ν – кинематический коэффициент вязкости, м²/с; a – коэффициент температуропроводности, м²/с; β – коэффициент объемного расширения, 1/К), входящие в критериальные уравнения находят в справочных таблицах [1, 2] при так называемой определяющей (характерной) температуре (t_0), которая наиболее точно учитывает влияние температурного поля жидкости на эти свойства.

Для газов коэффициент объемного расширения в таблицах физических свойств не приводится, поскольку он легко рассчитывается по формуле

$$\beta = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{t_0 + 273}, \quad (8)$$

где T_0 – характерная температура, К.

При движении жидкости в каналах некруглого поперечного сечения в качестве определяющего размера используют так называемый эквивалентный или гидравлический диаметр

$$l_0 = \frac{4f}{\Pi}, \quad (9)$$

где f – площадь поперечного живого сечения канала, м²; Π – смоченный периметр канала, м.

Особо следует обратить внимание на то, что в расчетах по критериальным формулам определяющие размер и температуру следует принимать точно такие же, как их принял автор формулы при ее получении. Принятые автором формулы характерные величины l_0 , t_0 и w_0 указываются в комментариях к формуле.

Алгоритм расчета коэффициента теплоотдачи заключается в следующем:

1. Определяют вид конвективного теплообмена: свободная или вынужденная конвекция и объект, где она происходит. Затем в литературе, например, в учебнике [1] находят критериальные формулы этого вида конвекции. В задаче № 1-4 исследуют конвективный теплообмен при вынужденном течении жидкости в трубах и каналах (см. с. 183÷192 учебника [1]), а в задаче № 1-5 рассмотрена свободная конвекция около вертикальной поверхности и поверхности горизонтальной трубы (см. с. 206÷208 учебника [1]).

2. Согласно требованиям, изложенным в комментариях к критериальным формулам, находят определяющие параметры:

— определяющий размер;

— определяющую температуру, по которой из таблиц свойств жидкости [1, 2] находят ее физические свойства (ν , λ , Pr и т.д.);

— при вынужденном течении жидкости в трубах и каналах по интегральному уравнению неразрывности рассчитывают определяющую скорость жидкости

$$w_0 = \frac{G}{\rho f}, \quad (10)$$

где G – массовый расход жидкости, кг/с; ρ – плотность жидкости, кг/м³; f – площадь поперечного сечения канала, м².

3. Определяют режим течения среды:

— при вынужденном движении по критерию Рейнольдса (Re);

— при свободном движении по критерию Рэлея ($Ra = Gr \cdot Pr$)

и окончательно выбирают значения эмпирических коэффициентов в формулах вида (4)÷(6), приведенных в учебнике [1].

4. По критериальному уравнению находят безразмерный коэффициент теплоотдачи — число Нуссельта (Nu).

5. Зная число Нуссельта рассчитывают величину коэффициента конвективной теплоотдачи α :

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{l_0}. \quad (11)$$

В заключение раздела приведем некоторые наиболее часто встречаемые критериальные уравнения.

1. Теплоотдача при свободной конвекции около горизонтальных труб (формула И.М. Михеевой)

$$Nu = 0,50 Gr^{0,25} \cdot Pr_{ж}/Pr_c^{0,25}, \quad (12)$$

$l_0 = d_n$ – наружный диаметр трубы; $t_0 = t_{ж}$ – температура жидкости вдали от стенки.

Формула справедлива при условии $10^3 < Gr \cdot Pr < 10^9$, что соответствует ламинарному режиму течения жидкости. Турбулентный режим при свободной конвекции на горизонтальных трубах, как правило, не наблюдается из-за малого диаметра труб, используемых в теплообменных установках.

2. Теплоотдача при свободной конвекции около вертикальных поверхностей (вертикальные трубы, пластины и т.д.):

а) ламинарный режим ($10^3 < Gr \cdot Pr < 10^9$):

$$Nu = 0,75 \left(Gr \cdot Pr \right)^{0,25} \cdot \left(Pr_{ж} / Pr_c \right)^{0,25}, \quad (13)$$

б) турбулентный режим ($Gr \cdot Pr \geq 6 \cdot 10^{10}$):

$$Nu = 0,15 \left(Gr \cdot Pr \right)^{1/3} \cdot \left(Pr_{ж} / Pr_c \right)^{0,25}, \quad (14)$$

в) переходный режим ($10^9 < Gr \cdot Pr < 6 \cdot 10^{10}$).

Переходный режим отличается неустойчивостью процесса течения и теплоотдачи, и теплоотдача возрастает от $\alpha_{лам}$ до $\alpha_{турбул}$ [1].

В формулах (13) и (14) приняты следующие определяющие параметры: $l_0 = h$ – высота поверхности; $t_0 = t_{ж}$ – температура жидкости вдали от стенки.

3. Теплоотдача при свободной конвекции около тел различной формы (шаров, горизонтальных и вертикальных труб, вертикальных пластин и т.д.) — формула М.А. Михеева:

$$Nu = C \left(Gr \cdot Pr \right)^n. \quad (15)$$

Ra=Gr·Pr	Режим движения	C	n
$5 \cdot 10^2 \div 2 \cdot 10^7$	ламинарный	0,54	0,25
$> 2 \cdot 10^7$	турбулентный	0,135	0,333

В формуле (15): $t_0 = 0,5 \cdot (t_{ж} + t_c)$ – средняя температура; $l_0 = h$ – высота для вертикальных пластин и труб (цилиндров); $l_0 = d_n$ – наружный диаметр для горизонтальных труб (цилиндров) и шаров.

4. Теплоотдача при вынужденном движении в трубе:

а) ламинарный вязкостно-гравитационный режим ($Re < 2300$ и $Ra > 8 \cdot 10^5$):

$$Nu = 0,15 Re^{0,33} Gr^{0,1} Pr^{0,43} \left(Pr_{ж} / Pr_c \right)^{0,25} \varepsilon_l. \quad (16)$$

Поправка на начальный участок $\varepsilon_l = f(l/d)$, где l – длина трубы.

l/d	1	2	5	10	15	20	30	40	50
ε_l	1,90	1,70	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1,00

б) турбулентный режим ($Re > 10^4$):

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \left(Pr_{ж} / Pr_c \right)^{0,25} \varepsilon_l. \quad (17)$$

Поправка на начальный участок:

$$\varepsilon_l = 1 + \frac{2}{l/d}, \text{ где } l \text{ – длина трубы.}$$

в) переходный режим течения ($8300 \leq Re \leq 10^4$):

$$Nu = Ko \cdot Pr^{0,43} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25}, \quad (18)$$

где значение комплекса Ko зависит от числа Рейнольдса (см. рис. 1.3).

В формулах (16), (17) и (18) в качестве определяющей температуры принята средняя температура жидкости в трубе

$$t_0 = 0,5 \cdot (t_{вх} + t_{вых}),$$

а характерный размер равен внутреннему диаметру трубы $l_0 = d_{вн}$.

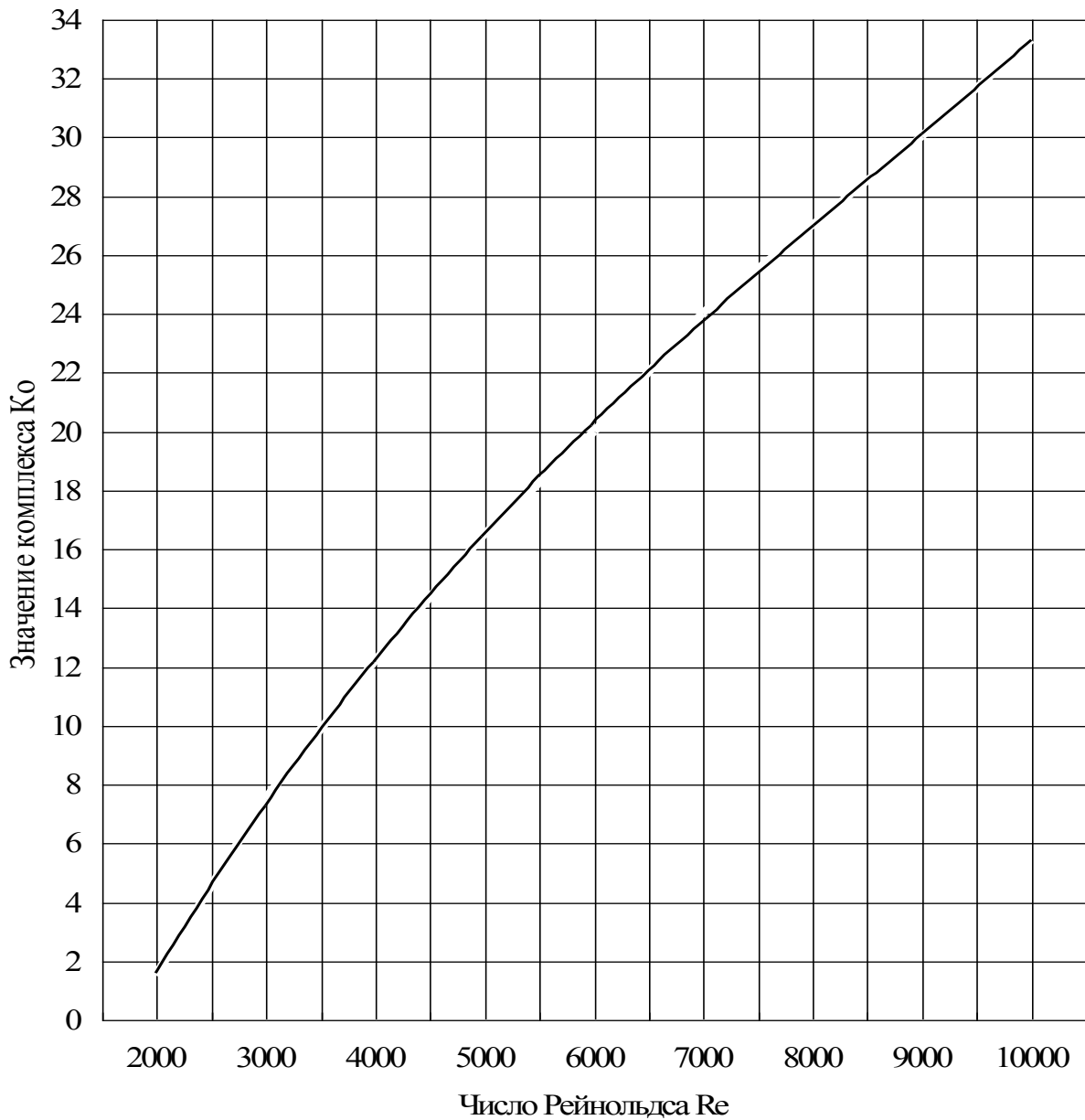


Рис. 1.3. График зависимости комплекса Ko от числа Рейнольдса

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 2

В О П Р О С Ы

1. Дайте описание пленочной и капельной конденсации. Условия существования этих процессов.
2. Опишите особенности критерия Рейнольдса при конденсации.
3. Опишите метод расчета теплоотдачи при пленочной конденсации на вертикальной поверхности.
4. Опишите метод расчета теплоотдачи при пленочной конденсации на поверхности горизонтальной трубы.
5. Опишите метод расчета теплоотдачи при пленочной конденсации на наклонной поверхности.
6. Опишите метод расчета теплоотдачи при конденсации в трубных пучках.
7. Как рассчитать теплоту, выделяющуюся при конденсации влажного насыщенного водяного пара, сухого насыщенного водяного пара и перегретого пара.
8. Опишите условия протекания процесса конденсации.
9. Опишите влияние скорости движения пара на теплоотдачу при конденсации.
10. Опишите влияние примеси в паре неконденсирующихся газов на теплоотдачу при конденсации.
11. Опишите кривую зависимости теплового потока при кипении от температурного напора.
12. Опишите кривую зависимости теплового потока при кипении от температурного напора, если регулируемой является температура стенки (граничные условия I рода).
13. Опишите кривую зависимости теплового потока при кипении от температурного напора, если регулируемой является плотность теплового потока (граничные условия II рода).
14. Укажите параметры первого кризиса кипения воды. Представьте их на графике зависимости теплового потока от температурного напора.
15. Укажите параметры второго кризиса кипения воды. Представьте их на графике зависимости теплового потока от температурного напора.
16. Опишите явление перехода от пузырькового режима кипения к пленочному. Приведите соответствующий график зависимости теплового потока от температурного напора.
17. Опишите явление перехода от пленочного режима кипения к пузырьковому. Приведите соответствующий график зависимости теплового потока от температурного напора.
18. Охарактеризуйте влияние давления на первый кризис кипения.
19. Охарактеризуйте влияние скорости течения жидкости на первый кризис кипения.

20. Охарактеризуйте влияние паросодержания на кризис кипения жидкости в условиях вынужденного движения ее внутри труб и каналов.
21. Поясните следующие термины: излучательная способность, спектральная плотность излучения, интегральная интенсивность излучения. Укажите их единицы измерения.
22. Поясните следующие термины: диффузная и зеркальная поверхности, спектр излучения.
23. Опишите законы излучения абсолютно черного тела: закон Планка и закон Стефана–Больцмана.
24. Дайте понятие "серого" тела.
25. Дайте определение: собственное излучение, результирующее излучение, эффективное излучение.
26. Дайте определение понятия средний угловой коэффициент излучения и опишите свойства угловых коэффициентов.
27. Опишите метод расчета теплового излучения в системах с лучепрозрачной газовой средой.
28. Опишите метод расчета собственного излучения газов.
29. Опишите особенности излучения газов. Закон Бугера–Бэра.
30. Дайте определение понятия коэффициент теплоотдачи излучением.
31. Изобразите схематично график изменения температуры теплоносителей в рекуперативном теплообменнике при прямотоке в случае, если расходная теплоемкость горячего теплоносителя больше, чем холодного.
32. Изобразите схематично график изменения температуры теплоносителей в рекуперативном теплообменнике при прямотоке в случае, если расходная теплоемкость горячего теплоносителя меньше, чем холодного.
33. Изобразите схематично график изменения температуры теплоносителей в рекуперативном теплообменнике при прямотоке в случае, если расходные теплоемкости горячего и холодного теплоносителей равны.
34. Изобразите схематично график изменения температуры теплоносителей в рекуперативном теплообменнике при противотоке в случае, если расходная теплоемкость горячего теплоносителя больше, чем холодного.
35. Изобразите схематично график изменения температуры теплоносителей в рекуперативном теплообменнике при противотоке в случае, если расходная теплоемкость горячего теплоносителя меньше, чем холодного.
36. Изобразите схематично график изменения температуры теплоносителей в рекуперативном теплообменнике при противотоке в случае, если расходные теплоемкости горячего и холодного теплоносителей равны.
37. Изобразите схематично график изменения температуры теплоносителей в рекуперативном теплообменнике при противотоке в случае, если расходная теплоемкость горячего теплоносителя больше, чем холодного.
38. Изобразите схематично график изменения температуры теплоносителей в рекуперативном теплообменнике при противотоке в случае, если расходная теплоемкость горячего теплоносителя больше, чем холодного.
39. Изобразите схематично график изменения температуры теплоносителей в рекуперативном теплообменнике при расходной теплоемкости холодного

теплоносителя большей, чем горячего и при условии противоточного движения теплоносителей.

40. Изобразите схематично график изменения температуры теплоносителей в рекуперативном теплообменнике при расходной теплоемкости холодного теплоносителя большей, чем горячего и при условии прямоточного движения теплоносителей.

ЗАДАЧА № 2-1

При заданных условиях конденсации определить: а) средний коэффициент теплоотдачи; б) тепловой поток, отводимый через стенку трубы при конденсации пара; в) расход конденсата, стекающего с трубы (режим конденсации рассматривать как пленочную конденсацию неподвижного пара).

Данные, необходимые для решения своего варианта задачи, выбрать из табл. 2.1 согласно таблице вариантов (см. табл. В.1, раздел "Общие методические указания").

Таблица 2.1. Варианты к задаче 2-1

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Давление сухого насыщенного пара p , кПа	2,33	4,24	4,24	4,24	7,37	2,33	4,24	4,24	4,24	7,37
Пар конденсируется на внешней стенке трубы	Труба расположена вертикально					Труба расположена горизонтально				
Длина трубы, м	2	2,5	3	3,5	4	2	2,5	3	3,5	4
Диаметр трубы, м	0,02	0,024	0,02	0,024	0,04	0,024	0,02	0,024	0,02	0,024
Средняя температура стенки, °С	15	25	20	27	35	15	25	20	27	35

Методические указания к задаче № 2-1

При пленочной конденсации сухого насыщенного пара на вертикальной трубе средний по высоте коэффициент теплоотдачи определяется по формуле [1]:

а) ламинарный режим течения пленки конденсата ($Z \leq 2300$):

$$Re = 0,95 Z^{0,78}; \quad (1)$$

б) смешанный режим течения пленки конденсата — ламинарный режим на верхнем участке вертикальной трубы и турбулентный режим на нижнем участке:

$$Re = \left[9 + 0,024 Pr^{0,5} (Z - 2300) \right]^{1/3} \varepsilon_t^{-1/4}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_t = (Pr_H/Pr_c)^{0,25}$ – поправочный коэффициент, учитывающий зависимость физических свойств пленки конденсата от температуры; критерии Прандтля Pr_H и Pr_c определяются для конденсата при температурах насыщения и средней температуре стенки.

В вышеприведенных формулах:

$$Re = \frac{\alpha \Delta t h}{r \nu \rho} = \frac{\alpha \Delta t h B}{4} \quad (3)$$

– критерий Рейнольдса при конденсации: α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); $\Delta t = t_H - t_c$ – температурный напор, °С; t_H – температура насыщения, °С; t_c – температура стенки трубы, °С; h – высота трубы, м; r – скрытая теплота парообразования, Дж/кг; ν – кинематический коэффициент вязкости пленки конденсата, м²/с; ρ – плотность конденсата, кг/м³; $B = 4/(r \rho \nu)$ – комплекс, который находят по табл. 8-1 задачника [2, стр. 159].

$$Z = \left(\frac{gh^3}{\nu^2} \right)^{1/3} \frac{\lambda \Delta t}{r \nu \rho} = h \Delta t A \quad (4)$$

– приведенная высота трубы: $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; λ – коэффициент теплопроводности конденсата, Вт/(м·К);

$$A = \left(\frac{g}{\nu} \right)^{1/3} \frac{\lambda}{r \nu \rho} \quad (5)$$

– комплекс, приведенный в табл. 8-1 на стр. 159 задачника [2] в зависимости от температуры насыщения.

Физические свойства конденсата находят по справочным таблицам, например, задачника [2] по температуре насыщения конденсата.

Значение удельной теплоты фазового перехода r также находят по температуре насыщения или по заданному давлению сухого насыщенного пара по таблицам термодинамических свойств воды и водяного пара [12] или воспользоваться данными табл. 2.2 настоящих методических указаний.

Таблица 2.2. Зависимость температуры и теплоты парообразования от давления

p , МПа	t_H , °С	r , кДж/кг	p , МПа	t_H , °С	r , кДж/кг
0,00123	10	2477,4	0,00737	40	2406,5
0,00234	20	2453,8	0,01234	50	2382,5
0,00424	30	2430,2	0,1000	99,63	2258,2

Заметим, что в расчетные формулы теплоотдачи при конденсации r следует подставлять в Дж/кг!

Рассчитав критерий Рейнольдса по одной из формул $Re = f(Z)$ легко можно найти и значение коэффициента теплоотдачи при конденсации:

$$\alpha = Re \frac{r \nu \rho}{\Delta t h} = Re \frac{4}{\Delta t h B} \quad (6)$$

Алгоритм расчета теплоотдачи при конденсации на горизонтальной трубе незначительно отличается от изложенного выше. Поэтому перед началом расчета рекомендуем ознакомиться с примером решения аналогичной задачи, изложенном на с.157–159 задачника [2].

ЗАДАЧА № 2-2

Пользуясь формулой Кутателадзе и формулой Михеева, определить коэффициент теплоотдачи α , температурный напор Δt и температуру t_c поверхности нагрева при пузырьковом кипении воды в неограниченном объеме, если даны плотность теплового потока q , подводимого к поверхности нагрева, и давление p , при котором происходит кипение. Сопоставить результаты расчета по обеим формулам, вычислив процент несовпадения.

Построить схематично график зависимости q и Δt при кипении воды, указав на ней область пузырькового кипения и ориентировочно положение точки, соответствующей заданному режиму.

Данные, необходимые для решения своего варианта задачи, взять из табл. 2.3 согласно таблице вариантов (см. табл. В.1, раздел "Общие методические указания").

Таблица 2.3. **Варианты к задаче 2-2**

Исходные данные	Варианты									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Интенсивность теплового потока q , МВт/м ²	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Давление насыщения p , МПа	1,0	1,56	2,32	3,35	4,7	1,0	1,56	2,32	3,35	4,7

Методические указания к задаче № 2-2

Изучите режимы процессов кипения, а для пузырькового и пленочного режимов — методику определения коэффициентов теплоотдачи.

Заинтересованность в высокой интенсивности теплообмена заставляет обратить внимание, особенно на пузырьковый режим кипения. Однако именно для этой области кипения пока не существует строгой теории. Поэтому, а также вследствие опечаток в ряде изданий, формулы для расчета теплоотдачи при развитом пузырьковом кипении различных жидкостей, в том числе и воды, иногда отличаются друг от друга, так что результаты вычислений по ним существенно не совпадают. Поэтому рекомендуется пользоваться следующими формулами для пузырькового кипения в неограниченном объеме (все величины, входящие в них, выражены в единицах СИ). Для произвольных жидкостей — формула Кутателадзе:

$$\alpha = 7,0 \cdot 10^{-4} \lambda_{\text{ж}} \left[\frac{g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}})}{\sigma_{\text{ж}}} \right]^{0,5} \left[\frac{q p_{\text{н}}}{r \rho_{\text{п}} a_{\text{ж}} g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}})} \right]^{0,7} \text{Pr}_{\text{ж}}^{-0,35},$$

где значение в первых скобках выражается в м⁻², во вторых скобках — безразмерно, $g = 9,81$ м/с²; ρ — плотность кипящей жидкости и сухого насыщенного пара, кг/м³; λ — коэффициент теплопроводности кипящей жидкости, Вт/(м·К); σ — ее поверхностное натяжение, Н/м; a — ее коэффициент температуропроводности, м²/с; $p_{\text{н}}$ — ее давление насыщения, Па; r — удельная теплота парообразования, Дж/кг; q — плотность теплового потока, Вт/м²; Pr — число Прандтля жидкости. Контроль за единицами величин, подставляемых в формулу, должен быть особенно тщательным.

Более простая и точная (± 35 %) формула расчета теплоотдачи при пузырьковом кипении, но применяемая только для воды, рекомендована Михеевым. С учетом последующего уточнения (см.: Рассохин Н.Г., Шведов Р.С., Кузьмин А.В. Расчет теплоотдачи при кипении. Теплоэнергетика, 1970, № 9, с. 58–59) она имеет вид:

$$\begin{aligned} \text{При } 0,1 \text{ МПа} \leq p \leq 3 \text{ МПа} & \quad \alpha = 6,0 p^{1/5} q^{2/3}; \\ \text{при } 3 \text{ МПа} \leq p \leq 20 \text{ МПа} & \quad \alpha = 3,33 p^{3/4} q^{2/3}, \end{aligned}$$

где α — Вт/(м²·К), p — МПа, q — Вт/м².

Наиболее вероятный источник ошибок при вычислении α — недостаточный контроль за единицами величин, подставляемых в формулы. После вычисления по указанным формулам коэффициента теплоотдачи α определяют по формуле Ньютона — Рихмана температурный напор Δt при кипении. Зная давление кипящей воды, определяют по таблицам термодинамических свойств насыщенного водяного пара и воды (или по табл. 5 приложения [1]) температуру насыщения $t_{\text{н}}$, а по $t_{\text{н}}$ и Δt находят температуру поверхности нагрева. График зависимости q и Δt схематично приведен на рис. 13.6 и 13.7 учебника [1]. Правильность решения задачи можно проконтролировать, сопоставив результат с диапазоном значений коэффициента теплоотдачи при пузырьковом (пузырчатом) кипении воды. Нижняя граница этого диапазона $\alpha \approx 20$ кВт/(м²·К), верхняя представлена в зависимости от давления на рис. 13.26 [1].

ЗАДАЧА № 2-3

В муфельную печь, имеющую форму параллелепипеда, помещена заготовка. Определить результирующий тепловой поток излучением, поступающий от обмуровки печи на заготовку.

Исходные данные принять по табл. 2.4 в соответствии с вариантом Вашего задания (см. табл. В.1, раздел "Общие методические указания").

Методические указания к задаче № 2-3

Теоретические положения по расчету радиационного теплообмена в замкнутой системе, состоящей из серых поверхностей, разделенных лучепрозрачной средой, подробно изложены в семнадцатой главе учебника [1].

Поток результирующего излучения в замкнутой системе, состоящей из двух серых поверхностей, разделенных диатермичной средой, рассчитывается по формуле

$$Q_{c,1} = \varepsilon_{\text{пр}} \sigma_0 (T_2^4 - T_1^4) \varphi_{21} F_2 \quad (1)$$

или

$$Q_{c,1} = c_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right] \varphi_{21} F_2, \quad (2)$$

$$Q_{c,2} = -Q_{c,1},$$

где T – абсолютная температура поверхности теплообмена, К; F – площадь поверхности теплообмена; $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана; φ_{12} и φ_{21} – угловые коэффициенты излучения соответственно с 1-го тела на 2-е и со 2-го тела на 1-е; $\varepsilon_{\text{пр}}$ и $c_{\text{пр}} = \sigma_0 \cdot \varepsilon_{\text{пр}}$ приведенная степень черноты и приведенный коэффициент излучения, которые соответственно равны

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) \varphi_{12} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \varphi_{21}}, \quad (3)$$

$$c_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{c_0} + \left(\frac{1}{c_1} - \frac{1}{c_0} \right) \varphi_{12} + \left(\frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_0} \right) \varphi_{21}}. \quad (4)$$

Угловые коэффициенты излучения в системе, состоящей из двух поверхностей удобно рассчитывать, используя свойства угловых коэффициентов:

а) свойство замкнутости

$$\sum_{k=1}^n \varphi_{ik} = 1; \quad (5)$$

б) свойство взаимности

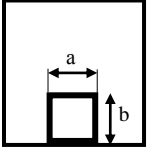
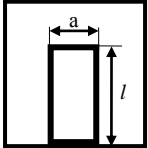
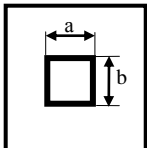
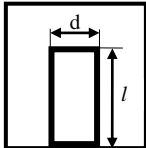
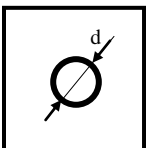
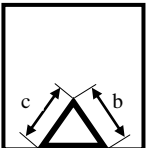
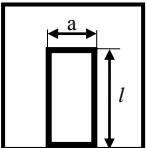
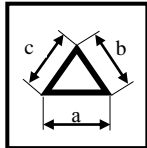
$$\varphi_{ik} F_i = \varphi_{ki} F_k; \quad (6)$$

в) свойство невогнутости (для плоских и выпуклых поверхностей)

$$\varphi_{ii} = 0. \quad (7)$$

Обратите внимание, что в задаче 2-3 невогнутым телом является заготовка (тело 1), а излучающим телом — внутренняя поверхность печи (тело 2).

Таблица 2.4. Варианты к задаче 2-3

Наименование условия	Вариант									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Температура стенок печи, °С	700	730	750	770	800	820	850	900	950	1000
Температура заготовки, °С	20	100	200	30	50	100	200	400	20	200
Степень черноты поверхности печи	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9
Степень черноты поверхности заготовки	0,85	0,8	0,75	0,7	—	0,8	0,75	0,7	0,85	—
Размер печи: — высота H, м; — ширина B, м; — длина L, м	0,6 0,5 0,8	0,6 0,6 0,8	0,6 0,8 1,0	0,7 0,8 1,0	Размер заготовки намного меньше размера печи чи ($F_{\text{заг}} \ll F_{\text{печи}}$): $F_{\text{заг}} = 0,4 \text{ м}^2$	0,5 0,6 0,7	0,6 0,6 0,8	0,6 0,6 0,6	0,6 0,5 0,8	Размер заготовки намного меньше размера печи чи ($F_{\text{заг}} \ll F_{\text{печи}}$): $F_{\text{заг}} = 0,3 \text{ м}^2$
Форма заготовки	квадратное сечение (a×b)	квадратное сечение (a×b)	квадратное сечение (a×b)	круглое сечение (d)		круглое сечение (d)	треугольное сечение (a×b×c)	треугольное сечение (a×b×c)	треугольное сечение (a×b×c)	
Размер заготовки и ее расположение в печи	 a = 0,2 м b = 0,2 м l = 0,4 м	 a = 0,2 м b = 0,2 м l = 0,4 м	 a = 0,2 м b = 0,2 м l = 0,4 м	 d = 0,3 м l = 0,7 м	 d = 0,4 м l = 0,6 м	 a = 0,2 м b = 0,2 м c = 0,2 м l = 0,6 м	 a = 0,4 м b = 0,4 м c = 0,4 м l = 0,5 м	 a = 0,4 м b = 0,4 м c = 0,4 м l = 0,7 м		

ЗАДАЧА № 2-4

Через газоход проходят продукты сгорания, содержащие водяной пар и двуокись углерода. Общее давление смеси 0,1 МПа. Определить плотность результирующего теплового потока от продуктов сгорания к стенкам газохода.

Исходные данные принять по табл. 2.5 в соответствии с вариантом Вашего задания (см. табл. В.1, раздел "Общие методические указания").

Таблица 2.5. **Варианты к задаче 2-4**

Наименование условия	Вариант				
	31	32	33	34	35
Температура продуктов сгорания, °С	500	600	700	800	900
Температура стенок газохода, °С	100	150	200	250	300
Степень черноты стенок газохода	0,75	0,8	0,85	0,9	0,75
Объемное содержание водяного пара, %	4	4	5	5	7
Объемное содержание двуокиси углерода, %	10	15	10	12	10
Размеры газохода	 $a = 0,3 \text{ м}$ $b = 0,4 \text{ м}$	 $d = 0,4 \text{ м}$	 $a = 0,4 \text{ м}$ $b = 0,5 \text{ м}$	 $d = 0,5 \text{ м}$	 $a = 0,5 \text{ м}$ $b = 0,6 \text{ м}$

Продолжение табл. 2.5

Наименование условия	Вариант				
	36	37	38	39	40
Температура продуктов сгорания, °С	1000	1100	1200	1300	1400
Температура стенок газохода, °С	350	400	100	200	300
Степень черноты стенок газохода	0,8	0,85	0,9	0,75	0,8
Объемное содержание водяного пара, %	7	7,5	7,5	10	10
Объемное содержание двуокиси углерода, %	12	12	15	15	15
Размеры газохода	 $d = 0,6 \text{ м}$	 $a = 0,6 \text{ м}$ $b = 0,8 \text{ м}$	 $d = 0,8 \text{ м}$	 $a = 0,8 \text{ м}$ $b = 1,0 \text{ м}$	 $d = 1,0 \text{ м}$

Методические указания к задаче № 2-4

Теория расчета радиационного теплообмена в излучающих и поглощающих средах, к которым можно отнести продукты сгорания органических топлив, подробно изложены в восемнадцатой главе учебника [1].

Результирующий поток излучением на поверхности оболочки (температура T_c , степень черноты ϵ_c), ограничивающей газообразную среду с температурой T_Γ рассчитывается по формуле:

а) формула Нусельта (при допущении $\epsilon_\Gamma = A_\Gamma$)

$$Q_c = \epsilon_{\text{пр}} \sigma_0 (T_\Gamma^4 - T_c^4) F_c, \quad (1)$$

в которой приведенная степень черноты равна

$$\epsilon_{\text{пр}} = \left[\frac{1}{\epsilon_\Gamma} + \frac{1}{\epsilon_c} - 1 \right]^{-1}, \quad (2)$$

б) формула Поляка (с учетом, что в действительности $\epsilon_\Gamma \neq A_\Gamma$)

$$Q_c = \epsilon_{\text{пр}} \sigma_0 \left(\frac{\epsilon_\Gamma}{A_\Gamma} T_\Gamma^4 - T_c^4 \right) F_c, \quad (3)$$

в которой приведенная степень черноты равна

$$\epsilon_{\text{пр}} = \left[\frac{1}{A_\Gamma} + \frac{1}{\epsilon_c} - 1 \right]^{-1}. \quad (4)$$

В формулах (1) ÷ (4): T – абсолютная температура, К; F – площадь поверхности теплообмена; σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана; ϵ_Γ и A_Γ – степень черноты и поглощательная способность газа, которые зависят от состава газа, его температуры и геометрии системы теплообмена:

$$\epsilon_\Gamma = \epsilon_{\text{CO}_2} + \beta \epsilon_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (5)$$

$$A_\Gamma = A_{\text{CO}_2} + \beta A_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (6)$$

где ϵ_{CO_2} , $\epsilon_{\text{H}_2\text{O}}$ – степени черноты углекислого газа и водяного пара находят по номограммам, приведенным на с. 211–212 задачника [2] по температуре газа T_Γ ; A_{CO_2} и $A_{\text{H}_2\text{O}}$ – поглощательные способности углекислого газа и водяного пара находят по номограммам [2] на с. 211–212 по температуре стенки T_c ; β – поправочный коэффициент также находят по номограммам, приведенным в задачнике [2] на с. 213.

Для расчетов по вышеуказанным номограммам предварительно необходимо найти эффективная длина пути луча по формуле

$$l_{\text{эф}} = 3,6 \frac{V_\Gamma}{F_\Gamma}, \quad (7)$$

где V_Γ – объем, занимаемый газовой средой; F_Γ – площадь ограничивающей газ поверхности.

ЗАДАЧА № 2-5

Определить площадь поверхности нагрева рекуперативного теплообменника, среднюю разность температур теплоносителей, расходы и расходные теплотемкости обоих теплоносителей согласно условий, заданных в табл. 2.6 и табл. 2.7. Изобразить схематично график изменения температур теплоносителей вдоль поверхности нагрева теплообменника. Для перекрестного или сложного движения теплоносителей график изображается как для противотока. На схеме укажите значения температур теплоносителей на входе и выходе из теплообменника.

Исходные данные принять по табл. 2.6, 2.7 в соответствии с вариантом Вашего задания (см. табл. В.1, раздел "Общие методические указания").

Таблица 2.6. **Варианты к задаче 2-5**

Вариант	Движение теплоносителей	Теплоносители	Коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² ·К)
41	Смешанный ток	Вода – воздух	50
42	Перекрестный ток	Дымовые газы – воздух	40
43	Прямоток	Масло трансформаторное – вода	120
44	Противоток	Дымовые газы – вода	80
45	—	Насыщенный водяной пар – вода	2000
46	Смешанный ток	Масло МК – воздух	70
47	Противоток	Масло МК – вода	150
48	Перекрестный ток	Воздух – вода	30
49	—	Насыщенный водяной пар – масло МК	120
50	—	Насыщенный водяной пар – вода	200

Таблица 2.7. **Варианты к задаче 2-5**

Вариант	Q, МВт	G ₁ , кг/с	G ₂ , кг/с	t ₁ ' , °С	t ₁ " , °С	t ₂ ' , °С	t ₂ " , °С	p _н , бар
41		0,2	0,5	110		20	70	
42		15		380	155	25	140	
43			0,2	100	40	15	35	
44	5,5	20	10	450		50		
45		6				30	160	10
46	0,2			90	40	25	80	
47		2	1,2	100	50	20		

Вариант	Q, МВт	G ₁ , кг/с	G ₂ , кг/с	t ₁ ' , °С	t ₁ " , °С	t ₂ ' , °С	t ₂ " , °С	p _н , бар
48	0,55	5		200		40	85	
49			3			20	95	2
50	0,3		7			30		5

Методические указания к задаче № 2-5

В табл. 2.6 и табл. 2.7 указаны:

— способ движения теплоносителей; виды теплоносителей, первый из которых является греющим, а второй — нагреваемым;

— коэффициент теплопередачи от одного теплоносителя к другому через разделяющую поверхность теплообменника k ;

— температуры теплоносителей: греющего на входе t_1' и на выходе t_1'' , нагреваемого на входе t_2' и на выходе t_2'' ;

— количество передаваемой теплоты от одного теплоносителя к другому Q . Если теплоносителем является насыщенный водяной пар, то по заданному давлению насыщения p_n определяют температуру насыщения t_n , при которой пар конденсируется до полного превращения в жидкость от $x = 1$ до $x = 0$, где x – степень сухости пара и передача теплоты определяется теплотой парообразования g .

Для теплового расчета рекуперативного теплообменника используют следующие основные уравнения:

а) уравнение теплового баланса

$$Q_1 = Q_2 + Q_{\text{пот}}, \quad (1)$$

или в развернутом виде для однофазных теплоносителей

$$G_1 c_{p1} (t_1' - t_1'') = G_2 c_{p2} (t_2'' - t_2') + Q_{\text{пот}}; \quad (2)$$

если греющим теплоносителем является сухой насыщенный водяной пар,

$$G_1 r = G_2 c_{p2} (t_2'' - t_2') + Q_{\text{пот}}, \quad (3)$$

б) уравнение теплопередачи

$$Q = k \Delta t F. \quad (4)$$

В формулах (1) ÷ (4): Q_1 – тепловой поток, отдаваемый горячим теплоносителем в единицу времени, Вт; Q_2 – тепловой поток, получаемое холодным теплоносителем в единицу времени, Вт; $Q_{\text{пот}}$ – тепловой поток потерь в окружающую среду – в данной задаче принимаются равными нулю, Вт; G_1 и G_2 – массовые расходы горячего и холодного теплоносителей, кг/с; c_{p1} и c_{p2} – удельные массовые изобарные теплоемкости горячего и холодного теплоносителей, Дж/(кг·К); t_1' и t_1'' – температура горячего теплоносителя на входе и выходе из теплообменника, °С; t_2' и t_2'' – температура холодного теплоносителя на входе и выходе

из теплообменника, °С ; k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); $\bar{\Delta t}$ – средняя разность температур между горячим и холодным теплоносителями (средний температурный напор), °С; F – площадь поверхности теплообмена, м²; r – скрытая теплота парообразования, Дж/кг.

Без учета тепловых потерь ($Q_{\text{пот}} = 0$) уравнение теплового баланса (2) примет вид

$$C_1 \cdot \delta t_1 = C_2 \cdot \delta t_2 \text{ или } \delta t_2 / \delta t_1 = C_1 / C_2, \quad (5)$$

где $C_1 = G_1 c_{p1}$ и $C_2 = G_2 c_{p2}$ – расходные теплоемкости (водяные эквиваленты) горячего и холодного теплоносителей; $\delta t_1 = (t_1' - t_1'')$ и $\delta t_2 = (t_2'' - t_2')$ – изменение температуры горячего и холодного теплоносителей вдоль поверхности теплообмена.

Температура теплоносителей вдоль поверхности теплообмена изменяется по экспоненциальному закону. При этом из соотношений (5) следует обратная пропорциональная зависимость между водяными эквивалентами и изменениями температуры вдоль поверхности теплообмена (см. рис. 2.1 и 2.2):

если $C_1 > C_2$, то $\delta t_1 < \delta t_2$;

если $C_1 < C_2$, то $\delta t_1 > \delta t_2$.

При противоточной схеме движения теплоносителей (рис. 2.2) выпуклость кривых изменения температуры теплоносителей направлена в сторону большого водяного эквивалента, т.е. в сторону теплоносителя с меньшим изменением температуры.

Если греющим теплоносителем является насыщенный водяной пар, то в процессе теплопередачи его температура не изменяется и равна температуре насыщения при данном давлении

$$t_1' = t_1'' = t_H$$

Среднюю разность температур рассчитывают по формулам

$$\bar{\Delta t}_a = \frac{\Delta t_{\max} + \Delta t_{\min}}{2}, \text{ если } \Delta t_{\max} / \Delta t_{\min} \leq 2 \quad (6)$$

или

$$\bar{\Delta t}_l = \frac{\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}}{\ln \frac{\Delta t_{\max}}{\Delta t_{\min}}}, \text{ если } \Delta t_{\max} / \Delta t_{\min} > 2, \quad (7)$$

где Δt_{\max} и Δt_{\min} – максимальная и минимальная разность температур теплоносителей; Δt_a – среднеарифметическая разность температур; Δt_l – среднелогарифмическая разность температур.

При расчете средней разности температур теплоносителей при перекрестном или смешанном токе движения теплоносителей студент самостоятельно принимает одну из схем перекрестного или сложного движения теплоносителей, приведенных в приложении [1, 2] и по рисунку определите $\varepsilon_{\Delta t} = f(P, R)$.

Среднюю изобарную массовую теплоемкость теплоносителей c_p , кДж/(кг·К) выбирают из таблиц приложения [1, 2].

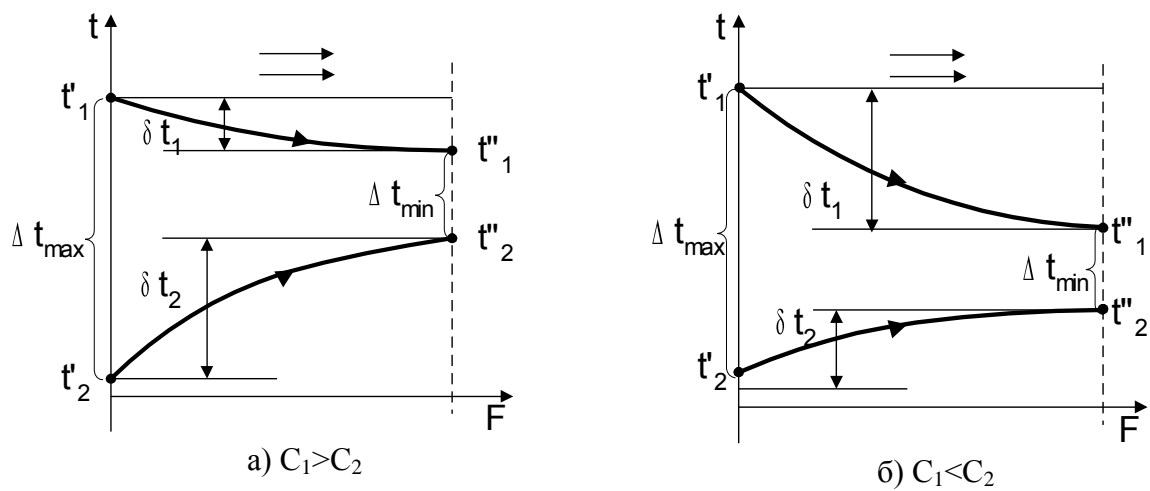


Рис. 2.1. Изменение температуры горячего и холодного теплоносителей вдоль поверхности теплообмена при прямоточной схеме движения теплоносителей в зависимости от соотношения их водяных эквивалентов

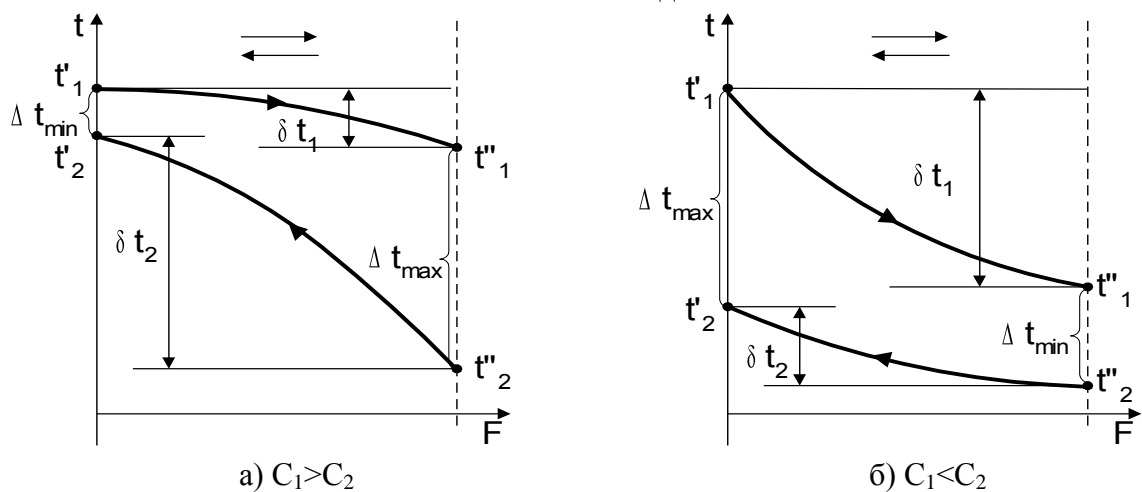


Рис. 2.2. Изменение температуры горячего и холодного теплоносителей вдоль поверхности теплообмена при противоточной схеме движения теплоносителей в зависимости от соотношения их водяных эквивалентов

СОДЕРЖАНИЕ

	стр
Рабочая программа дисциплины "Теоретические основы тепло-техники" раздела "Тепломассообмен"	3
Список рекомендуемой литературы	5
Контрольные задания	6
Общие методические указания	6
Контрольная работа № 1	8
Вопросы	8
Задача № 1-1	10
Задача № 1-2	11
Методические указания к решению задач № 1-1 и № 1-2	13
Задача № 1-3	15
Методические указания к решению задачи № 1-3	16
Задача № 1-4	18
Задача № 1-5	18
Методические указания к решению задач № 1-4 и № 1-5	19
Контрольная работа № 2	24
Вопросы	24
Задача № 2-1	26
Методические указания к решению задачи № 2-1	26
Задача № 2-2	28
Методические указания к решению задачи № 2-2	28
Задача № 2-3	29
Методические указания к решению задачи № 2-3	30
Задача № 2-4	32
Методические указания к решению задачи № 2-4	33
Задача № 2-5	34
Методические указания к решению задачи № 2-5	35

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ

ТЕПЛОМАСООБМЕН

Часть I

Программа дисциплины, методические указания и задания
для выполнения контрольной работы
для студентов заочного факультета специальностей 100500 и 100700

Составители: БУХМИРОВ Вячеслав Викторович
СОЗИНОВА Татьяна Евгеньевна
ЧАСТУХИНА Маргарита Ивановна

Редактор Т.В. Соловьева

Лицензия ЛР № 020264 от 15.12.96 г.

Подписано в печать Формат 60×84¹/₁₆.

Печать плоская. Усл.печ.л. 2,5. Тираж 200 экз. . Заказ .

Ивановский государственный энергетический университет

153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34

Типография ИЭК Минтопэнерго РФ

153025 Иваново, ул. Ермака, 41