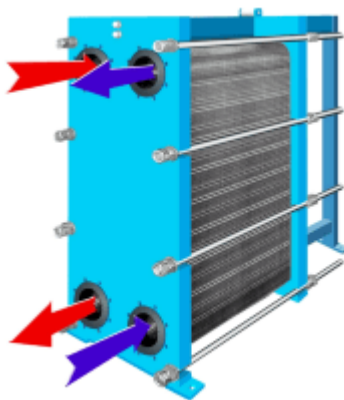


ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ

Кафедра механизации животноводства и переработки  
сельскохозяйственной продукции

## ТЕПЛОТЕХНИКА

задания и методические указания по выполнению  
самостоятельной и контрольной работы



Новосибирск 2021

Кафедра механизации животноводства и переработки  
сельскохозяйственной продукции

УДК 621.1

ББК 31.3

Теплотехника: задания и методические указания по выполнению контрольной работы / Новосиб. гос. аграр. ун-т. Инженер. ин-т; сост. Е.А. Пшенов, А.Г. Христенко – Новосибирск, 2021. – 41 с.

Рецензент: канд. тех. наук, доцент Е.А. Булаев

Задания и методические указания по выполнению контрольной работы предназначены для студентов очной и заочной форм обучения по направлениям подготовки: Агроинженерия; Продукты питания животного происхождения; Технология продукции и организация общественного питания.

Утверждено и рекомендовано к изданию методическим советом Инженерного института (протокол № \_\_ от \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.).

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1.МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОМУ ИЗУЧЕНИЮ ТЕМ И РАЗДЕЛОВ КУРСА.....	5
Цель и задачи курса.....	5
Содержание отдельных разделов с тестами для самостоятельной подготовки.....	7
Техническая термодинамика.....	7
Теория тепломассообмена.....	12
Теплоэнергетические установки и промышленная теплоэнергетика.....	17
2. ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ.....	24
МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТРУБЧАТОГО ТЕПЛОБМЕННИКА .....	24
1. Гидродинамический расчёт.....	25
2. Тепловой расчет аппарата.....	25
3. Конструкторский расчет аппарата.....	28
4. Изоляционный расчёт.....	29
5. Расчёт теплопотерь.....	31
ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЭКЗАМЕНУ.....	32
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	35
Библиографический список .....	40

## Введение

Значительную роль в развитии отраслей промышленности играют инженерные расчеты, способствующие глубокому пониманию изучаемых процессов, представляющие основу проектирования машин и аппаратов. Базовые знания по расчету процессов и аппаратов будущий бакалавр должен получать в вузе.

Важное место в подготовке высококвалифицированных кадров пищевой промышленности занимает дисциплина «Теплотехника». На ее базе заложены основные принципы расчета тепло-массообменных процессов на основе термодинамики и тепломассообмена. Цель дисциплины – формирование представлений, знаний, умений и практических навыков в области рационального получения, преобразования и использования теплоты.

Расчет теплообменного аппарата является комплексной проверкой знаний и навыков полученных в ходе изучения дисциплины. При выполнении данной контрольной работы у студентов формируется творческое осмысление полученных результатов, анализ и оценка происходящего теплового процесса и работоспособность проектируемого аппарата.

Для проведения расчета необходимо предварительно найти по справочникам физико-химические свойства перерабатываемых веществ (плотность вязкость и т. п.), составить материальные и тепловые балансы.

К расчётам следует приступить только после тщательного изучения теоретического материала по разделам дисциплины. В противном случае, расчёты будут носить формальный алгебраический характер без физического, инженерного понимания их сущности. Кроме того, в таком случае неизбежны многочисленные ошибки.

Пособие предназначено для студентов очной и заочной форм обучения направления подготовки Агроинженерия, Продукты питания животного происхождения, Технология продукции и организация общественного питания.

Рекомендуемый список литературы охватывает все разделы программной дисциплины как по процессу теплопередачи, так и по устройству, принципу действия теплообменных аппаратов и проектированию трубчатых и пластинчатых аппаратов.

# 1.МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОМУ ИЗУЧЕНИЮ ТЕМ И РАЗДЕЛОВ КУРСА

## *Цель и задачи курса*

**Цель дисциплины** – формирование представлений, знаний, умений и практических навыков в области рационального получения, преобразования и использования теплоты.

Исходя из цели, в процессе изучения дисциплины решаются следующие **задачи изучения:**

- основных законов преобразования энергии;
- законов термодинамики и тепломассообмена;
- термодинамических процессов и циклов;
- основных способов энергосбережения;

Дисциплина *Теплотехника* в соответствии с требованиями ФГОС ВО направлена на формирование следующих общепрофессиональных (ОПК) компетенций бакалавра: **ОПК-2. ОПК-4.**

### **Общепрофессиональные компетенции (ОПК):**

- способностью к использованию основных законов естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности (ОПК-2);
- способностью решать инженерные задачи с использованием основных законов механики, электротехники, гидравлики, термодинамики и тепломассообмена (ОПК-4);

В результате изучения дисциплины студент **должен:**

#### **знать:**

- основные законы преобразования энергии;
- законы термодинамики и тепломассообмена;
- термодинамические процессы и циклы;
- основные способы энергосбережения;

#### **уметь:**

- решать типовые задачи по теплотехнике;
- проводить термодинамические расчеты рабочих процессов в теплотехнических устройствах, применяемых в отрасли;
- проводить расчеты теплообменных аппаратов;
- применять энергосберегающие технологии.

#### **владеть:**

- методикой определения термодинамических параметров с помощью диаграмм и таблиц;
- методикой расчета теплообменного оборудования;
- способами и методами сбережения тепловой энергии.

Таблица 1 – Связь результатов обучения с приобретаемыми компетенциями

№ п/п	Осваиваемые знания, умения, навыки	Формируемые компетенции (ОПК)
1	<b>Знать:</b>	
1.1	основные законы преобразования энергии;	ОПК-2; ОПК-4;
1.2	законы термодинамики и теплообмена;	ОПК-2; ОПК-4;
1.3	термодинамические процессы и циклы;	ОПК-2; ОПК-4;
1.4	основные способы энергосбережения;	ОПК-2; ОПК-4;
2.	<b>Уметь:</b>	
2.1	решать типовые задачи по теплотехнике;	ОПК-2; ОПК-4;
2.2	проводить термодинамические расчеты рабочих процессов в теплотехнических устройствах, применяемых в отрасли;	ОПК-2; ОПК-4;
2.3	проводить расчеты теплообменных аппаратов;	ОПК-2; ОПК-4;
2.4	применять энергосберегающие технологии.	ОПК-2; ОПК-4;
3	<b>Владеть:</b>	
3.1	методикой определения термодинамических параметров с помощью диаграмм и таблиц;	ОПК-2; ОПК-4;
3.2	методикой расчета теплообменного оборудования;	ОПК-2; ОПК-4;
3.3	способами и методами сбережения тепловой энергии.	ОПК-2; ОПК-4;

## ***Содержание отдельных разделов с тестами для самостоятельной подготовки***

### **ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА**

***Основные понятия и определения термодинамики. Смеси идеальных газов.***

Основные задачи курса. Предмет и метод технической термодинамики. Энергия, виды энергии и ее свойства. Теплота и работа как формы передачи энергии, Рабочее тело, Параметры определяющие состояние рабочего тела. Термодинамическая система. Тепловое состояние. Равновесные и неравновесные состояния. Термодинамический процесс. Уравнение состояния идеальных газов.

Состав смеси в массовых, объемных и молярных долях, соотношение между массовыми и объемными долями. Плотность смеси. Газовая постоянная смеси.

***Теплоемкость. Первый закон термодинамики.***

Массовая, объемная и молярная теплоемкости газа и зависимости между ними. Средняя и истинная теплоемкости газа. Теплоемкость при постоянном объеме и при постоянном давлении. Формулы и таблицы для определения теплоемкости газов. Теплоемкости смеси газов.

Содержание закона и его формулировки. Аналитическое выражение первого закона термодинамики. Принцип эквивалентности теплоты и работы. Внутренняя энергия и ее свойства. Энтальпия газа. Работа газа, ее определение и графическое изображение в координатах  $pV$ .

***Второй закон термодинамики.***

Термодинамическая вероятность, необратимость и статистика. Термодинамическая вероятность и энтропия. Энтропия и теплообмен. Энтропия газов. Содержание второго закона и его формулировки. Аналитическое выражение второго закона. Основное уравнение термодинамики и вычисление энтропии. Диаграммы состояния  $T - s$  и  $h - s$ .

***Исследование термодинамических процессов.***

Изохорный, изобарный, изотермический и адиабатный процессы – частные случаи политропного процесса. Их изображение в координатах  $pV$  и  $Ts$ . Политропный процесс. Уравнение политропы, Определение показателя

политропы. Соотношения параметров. Определение работы, теплоемкости и теплоты во всех процессах.

### ***Круговые процессы.***

Общие сведения, термический КПД и холодильный коэффициент циклов. Цикл Карно. Эксергия. Циклы поршневых компрессоров.

### ***Циклы теплосиловых установок.***

Термодинамическая эффективность циклов теплосиловых установок. Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания. Цикл газотурбинной установки. Циклы паротурбинных установок. Парогазовые циклы

### ***Водяной пар. Влажный воздух.***

Процесс парообразования в  $p$ ,  $T$ ,  $h$  координатах. Параметры и функции состояния жидкости и пара. Диаграммы состояния водяного пара. Термодинамические процессы водяного пара. Термодинамические таблицы водяного пара.

### ***Термодинамика потока газов и паров.***

Уравнение первого закона термодинамики для потока. Истечение газов и паров. Дросселирование.

### ***Вопросы для самостоятельной подготовки***

1. Что такое термодинамическая система, термодинамический процесс?
2. Термические параметры состояния.
3. Уравнения состояния для идеальных газов.
4. Что такое работа, теплота. Понятие о внутренней энергии. Изображение работы и тепла в диаграммах  $P$ - $V$  и  $T$ - $S$ .
5. Математическое выражение первого закона термодинамики для идеальных реальных газов.
6. Теплоемкость. Различные виды теплоемкости и связь между ними.
7. Физическая сущность энтальпии.
8. Зависимость энтропии от основных термодинамических параметров.
9. Исследование изохорного процесса, изобразить в диаграммах  $P$ - $V$  и  $T$ - $S$ .
10. Исследование изобарического процесса, изобразить в диаграммах  $P$ - $V$  и  $T$ - $S$ .
11. Исследование изотермического процесса, изобразить в диаграммах  $P$ - $V$  и  $T$ - $S$ .
12. Исследование адиабатного процесса, изобразить в диаграммах  $P$ - $V$  и  $T$ - $S$ .



13. Исследование политропного процесса, изобразить в диаграммах P-V и T-S.
14. Сущность второго закона термодинамики и основные его формулировки.
15. Цикл Карно, вывод формулы КПД цикла.

***Тесты для самостоятельной подготовки***

**Если условно в объеме, который занимает смесь газов, оставить только один компонент, не изменяя температуры, то давление оставленного компонента будет равно:**

- Абсолютному давлению.
- Парциальному давлению.
- Избыточному давлению

**Величина  $\mu R$  в уравнении состояния идеального газа носит название:**

- Газовой постоянной.
- Универсальной газовой постоянной.
- Постоянной Больцмана.

**Укажите формулу связи теплоемкостей  $c_v$  и  $c_p$  для идеального газа (формулу Майера).**

- $c_p = c_v$ .
- $c_p - c_v = R$ .
- $c_p / c_v = k$ .

**Определить массовую теплоемкость  $c_p$ , если:  $\mu c_p = 32,8$  кДж/(кмоль·К);  $\mu = 27,8$ .**

- 1,18
- 1,26
- 1,46
- 1,09

**При увеличении энтропии ( $S_2 > S_1$ ):**

- Теплота не подводится и не отводится.
- Теплота отводится.
- Теплота подводится.

**Укажите аналитическое выражение второго закона термодинамики.**

- $ds \geq \delta q/T$ .
- $\delta q = du + pdv$ .
- $\delta q = dh - vdp$ .

**Для изотермического процесса:**

- показатель политропы равен 1
- показатель политропы равен 0
- показатель политропы равен  $k$
- показатель политропы равен  $\pm \infty$

**Указать формулу изменения энтропии в изохорном процессе.**

- $c_p \ln(T_2/T_1)$
- $c_v \ln(T_2/T_1)$
- $c_v \ln(T_2/T_1) + R \ln(v_2/v_1)$
- $R \ln(v_2/v_1)$

**Цикл с подводом теплоты при постоянном объеме:**

- реализуется в дизелях
- реализуется в дизелях и бензиновых двигателях
- реализуется только в бензиновых двигателях
- реализуется в бензиновых и газовых двигателях

**К газу в круговом процессе подведено 250 кДж/кг теплоты. Термический КПД равен 0,5. Найти работу, полученную в цикле.**

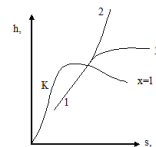
- 125 кДж/кг.
- 500 кДж/кг.
- 250 кДж/кг.

**Пар, вода и лед одновременно находятся в равновесии в \_\_\_\_\_ точке.**

- тройной
- критической
- кюри
- росы

**Процесс 1-3, показанный на h-s диаграмме:**

- Изохорный
- Изобарный
- Изотермический



**Укажите температуру начала выпадения влаги из влажного воздуха.**

- При температуре мокрого термометра.
- При температуре выше температуры точки росы.
- При температуре точки росы.

**Отношение массы водяного пара  $m_w$ , содержащегося во влажном воздухе, к массе сухого воздуха  $m_b$  называется...**

- влажностью

- относительной влажностью
- абсолютной влажностью
- точкой росы

### *Типовые задачи для самостоятельной подготовки*

1. Ртутный вакуумметр, присоединенный к сосуду (см. рис. 2), показывает разрежение  $p = 56$  кПа (420 мм рт. ст.) при температуре ртути в вакуумметре  $t = 20^{\circ}\text{C}$ . Давление атмосферы по ртутному барометру  $B = 102,4$  кПа (768 мм рт. ст.) при температуре ртути  $t = 18^{\circ}\text{C}$ . Определить абсолютное давление в сосуде.
2. Определить абсолютное давление в конденсаторе парвой турбины, если показание присоединенного к нему ртутного вакуумметра равно 94 кПа (705 мм рт. ст.), а показание ртутного барометра, приведенное к  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $B_0 = 99,6$  кПа (747 мм рт. ст.). Температура воздуха в месте установки прибором  $t = 20^{\circ}\text{C}$ .
3. Определить массу кислорода, содержащегося в баллоне емкостью 60 л, если давление кислорода по манометру равно 1,08 МПа, а показание ртутного барометра – 99 325 Па при температуре  $25^{\circ}\text{C}$ .
4. Резервуар объемом  $4 \text{ м}^3$  заполнен углекислым газом. Найти массу и силу тяжести (вес) газа в резервуаре, если избыточное давление газа  $p = 40$  кПа, температура его  $t = 80^{\circ}\text{C}$ , а барометрическое давление воздуха  $B = 102,4$  кПа.
5. Определить среднюю массовую теплоемкость при постоянном объеме для азота в пределах  $200 - 800^{\circ}\text{C}$ , считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.
6. Вычислить значение истинной мольной теплоемкости кислорода при постоянном давлении для температуры  $1000^{\circ}\text{C}$ , считая зависимость теплоемкости от температуры линейной. Найти относительную ошибку по сравнению с табличными данными.
7. Мощность турбогенератора 12 000 кВт, к. п. д. генератора 0,97. Какое количество воздуха нужно пропустить через генератор для его охлаждения, если конечная температура воздуха не должна превышать  $55^{\circ}\text{C}$ ? Температура в машинном отделении равна  $20^{\circ}\text{C}$ ; среднюю теплоемкость воздуха  $c_{pm}$  принять равной  $1,0$  кДж/(кг·К).
8. В котельной электрической станции за 20 ч работы сожжены 62 т каменного угля, имеющего теплоту сгорания  $28\,900$  кДж/кг. Определить среднюю мощность станции, если в электрическую энергию превращено 18% теплоты, полученной при сгорании угля.
9. Какое количество теплоты необходимо затратить, чтобы нагреть  $2 \text{ м}^3$  воздуха при постоянном избыточном давлении  $p = 0,2$  МПа от  $t_1 =$

100° С до  $t_2 = 500^\circ \text{C}$ ? Какую работу при этом совершит воздух? Давление атмосферы принять равным 101 325 Па.

10. Определить количество теплоты, необходимое для нагревания  $2000 \text{ м}^3$  воздуха при постоянном давлении  $p = 0,5 \text{ МПа}$  от  $t_1 = 150^\circ \text{C}$  до  $t_2 = 600^\circ \text{C}$ . Зависимость теплоемкости от температуры считать нелинейной.
11. Найти давление, удельный объем и плотность воды, если она находится в состоянии кипения и температура ее равна  $250^\circ \text{C}$ .
12. Найти диаметр паропровода, по которому протекает пар при давлении  $p = 1,2 \text{ МПа}$  и температуре  $t = 260^\circ \text{C}$ . Расход пара  $350 \text{ кг/ч}$ , скорость пара  $\omega = 50 \text{ м/с}$ .
13. Найти массу, внутреннюю энергию, энтальпию и энтропию  $6 \text{ м}^3$  насыщенного водяного пара при давлении  $p = 1,2 \text{ МПа}$  и сухости пара  $x = 0,9$ .
14. Задано состояние пара:  $p = 2 \text{ МПа}$ ;  $t = 340^\circ \text{C}$ . Определить, пользуясь диаграммой  $is$  значения  $s$ ,  $t_n$  и перегрев пара

## **ТЕОРИЯ ТЕПЛОМАССОБМЕНА**

### ***Основные понятия и определения теплообмена.***

Предмет и задачи теории теплообмена. Значение теплообмена в процессах хранения и переработки продуктов питания. Основные понятия и определения. Виды переноса тепла: теплопроводность. Конвекция и излучение. Сложный теплообмен.

### ***Теплопроводность.***

Температурное поле, Температурный градиент. Закон Фурье. Коэффициент теплопроводности. Дифференциальное уравнение теплопроводности. Теплопроводность плоской и цилиндрической стенок.

### ***Конвективный теплообмен. Теплоотдача при фазовых переходах.***

Закон Ньютона-Рихмана. Коэффициент теплоотдачи. Дифференциальное уравнение конвективного теплообмена. Основы теории подобия. Теплоотдача при свободном и вынужденном движениях жидкости.

### ***Теплопередача.***

Теплопередача через плоскую однослойную и многослойную стенки. Коэффициент теплопередачи и термическое сопротивление теплопередаче. Теплопередача через цилиндрическую однослойную и многослойную стенки. Тепловая изоляция.

### ***Теплообмен излучением***

Основные понятия и определения. Законы излучения реальных тел. Теплообмен между поверхностями тел, угловые коэффициенты. Особенности излучения газов. Коэффициент теплоотдачи излучением.

### ***Основы расчета теплообменных аппаратов***

Назначение, классификация и схемы теплообменных аппаратов. Принцип расчета теплообменных аппаратов. Конструктивный и поверочный тепловые расчеты теплообменных аппаратов. Средний температурный напор. Основы гидродинамического расчета теплообменных аппаратов. Способы интенсификации теплообмена при однофазном течении газов и жидкости, при кипении и конденсации применительно к высокоэффективным теплообменным аппаратам. Современные конструкции трубчатых и пластинчатых теплообменных аппаратов. Методы оценки эффективности интенсификации теплообмена и оптимизация теплообменных аппаратов.

### ***Вопросы для самостоятельной подготовки***

1. Назовите основные виды теплообмена.
2. Уравнение температурного поля, температурный градиент.
3. Дать определение теплопроводности, закон Фурье.
4. Закон Ньютона – Рихмана.
5. Что называется коэффициентом теплопроводности, от каких параметров он зависит.
6. Вывод уравнения теплопроводности однослойной плоской стенки.
7. Вывод уравнения теплопроводности многослойной плоской стенки.
8. Вывод уравнения теплопроводности через однослойную цилиндрическую стенку.
9. Вывод уравнения теплопроводности через многослойную цилиндрическую стенку.
10. Что называется теплопередачей. Вывод уравнения теплопередачи.
11. Определение коэффициента теплопередачи.
12. Вывод уравнения теплопередачи через однослойную плоскую стенку.
13. Вывод уравнения теплопередачи через многослойную плоскую стенку.
14. Вывод уравнения теплопередачи через однослойную цилиндрическую стенку.
15. Вывод уравнения теплопередачи через многослойную цилиндрическую стенку.

### Тесты для самостоятельной подготовки

#### Тепловой поток – это количество теплоты:

- Передаваемое в единицу времени через произвольную поверхность.
- Передаваемое в единицу времени через единичную площадь.
- Проходящее в единицу времени через единичную площадь при градиенте температуры, равном единице.

#### Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·К) характеризует:

- Способность вещества передавать теплоту.
- Интенсивность теплообмена между поверхностью тела и средой.
- Интенсивность собственного излучения тела.

#### В каком случае интенсивность теплоотдачи ниже

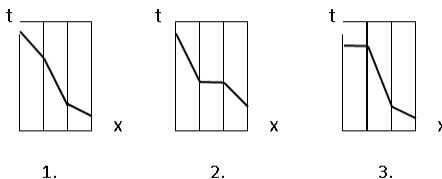
- При кипении.
- В случае вынужденной конвекции.
- В случае свободной конвекции.

#### О режиме течения жидкости судят по значению числа:

- Рейнольдса (Re).
- Нуссельта (Nu).
- Прандтля (Pr).

Какой из температурных графиков соответствует случаю: стальная стенка, с одной стороны покрыта слоем сажи с теплопроводностью 0,09 Вт/(м·К), с другой слоем накипи с теплопроводностью 1,75 Вт/(м·К).

- 1
- 2
- 3



Коэффициент теплопередачи для плоской стенки вычисляется по формуле

$$\alpha = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad \alpha = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\lambda}{\delta} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad \alpha = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} - \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad \alpha = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

С повышением температуры максимум интенсивности излучения:

- Смещается в сторону более длинных волн.
- Смещается в сторону более коротких волн.
- Не изменяется.

**Какое из тел при прочих равных условиях имеет большую интенсивность излучения.**

- Со степенью черноты 0,3.
- Со степенью черноты 0,7.
- Со степенью черноты 0,9.

**Поверхность, необходимая для передачи теплового потока  $Q$  от горячего теплоносителя к холодному, определяется из уравнения...**

- теплопередачи
- теплового баланса
- Фурье
- Ньютона-Рихмана

**Твердая поверхность охлаждается в потоке жидкости. Укажите изменение температуры поверхности при уменьшении коэффициента теплоотдачи.**

- Температура поверхности увеличится.
- Температура поверхности уменьшится.
- Температура поверхности не изменится.

**Регенераторы – это:**

- Теплообменные аппараты, в которых передача теплоты между двумя жидкостями осуществляется через разделяющую стенку.
- Теплообменные аппараты, в которых обмен теплотой осуществляется при смешивании горячей и холодной жидкостей.
- Теплообменные аппараты, в которых одна и та же поверхность нагрева омывается то горячей, то холодной жидкостью.

**Теплообменником называют аппарат, предназначенный:**

- для отвода теплоты от теплоносителей
- для подвода теплоты к теплоносителям
- для сообщения теплоты одному из теплоносителей в результате его отвода от другого теплоносителя
- для сообщения теплоты одному из теплоносителей в результате его сообщения к другому теплоносителю

**С какой стороны плоской поверхности установка ребер позволит в наибольшей степени интенсифицировать теплопередачу.**

- Со стороны большего коэффициента теплоотдачи.
- Со стороны меньшего коэффициента теплоотдачи.
- Не имеет значения, с какой стороны.

### Поглощательная способность равна единице:

- Для абсолютно черных тел.
- Для серых тел.
- Для абсолютно прозрачных тел.

### *Типовые задачи для самостоятельной подготовки*

1. Стенка камеры нагревательной печи состоит из двух слоёв: изоляционного кирпича толщиной  $\delta_1=250$  мм и слоя изоляции из листового асбеста толщиной  $\delta_2=100$  мм. Температура газа в печи  $t_1=1500$  °С, температура воздуха в помещении  $t_в=25$  °С, коэффициент теплоотдачи от газа к внутренней стенке печи  $\alpha_1=120$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) и от наружной стенки к воздуху  $\alpha_2= 40$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Определить теплоту теряемую 1 м<sup>2</sup> через стенку, температуру на наружной поверхности стенки?
2. Стальной трубопровод диаметром 108×5 мм с коэффициентом теплопроводности [ $\lambda_1 = 50,3$  Вт/(м·К)] имеет трехслойную изоляцию. Толщина первого слоя  $\delta_2=25$  мм [ $\lambda_2 =0,038$  Вт/(м·К)], второго -  $\delta_3=35$  мм [ $\lambda_3=0,052$  Вт/(м·К)], третьего -  $\delta_4=4$  мм [ $\lambda_4 = 0,116$  Вт/(м·К)]. Температура на внутренней поверхности трубы  $t_1 = 218$  °С, на наружной поверхности второго слоя изоляции  $t_4 = 76$  °С. Определить неизвестные температуры на поверхностях слоёв.
3. Стенка печи изготовлена из двух слоев кирпича. Внутренний слой – огнеупорный кирпич толщиной – 300 мм. Наружный слой – красный кирпич – толщиной 150 мм. Определить температуру на наружной поверхности стенки и красного кирпича, если на внутренней стороне стенки и кирпича температура – 40 °С. Потери тепла через 1 м<sup>2</sup> площади составляют 0,9 кВт/м<sup>2</sup>.  $\lambda_{огнеупор}= 1,0$  Вт/(м·К),  $\lambda_{красн}= 0,6$  Вт/(м·К).
4. Температура внутренней поверхности стенки – 600 °С, наружной - 80 °С. Толщина стенки – 0,6 м. Удельный тепловой поток, проходящий через стенку, равен 580 Вт/м<sup>2</sup>. Определить коэффициент теплопроводности кирпича.
5. Определить теплопередачу излучением от 1 м<sup>2</sup> поверхности отопительного радиатора в большом помещении. Температура стенок радиатора 90 °С. Температура стен помещения 18 °С. Степень черноты поверхности радиатора  $\varepsilon = 0,9$ .
6. Найти тепловой поток, передаваемый от стенки канала спирального теплообменника к воде, если поверхность стенки 30 м<sup>2</sup>. Температура воды – 40 °С. Температура стенки – 45 °С. Коэффициент теплоотдачи от стенки к воде 6500 Вт/(м<sup>2</sup>·°С).
7. Определить толщину стенки, если температура воздуха внутри помещения – 30 °С; снаружи – (-10 °С). Коэффициент теплопроводности кирпича – 0,7 Вт/(м·°С). Удельный тепловой поток через плоскую стенку – 2000 Вт/м<sup>2</sup>.



8. Определить температуры поверхностей кирпичной стенки. Коэффициенты теплоотдачи от теплового воздуха к стенке –  $8 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ ; от стенки к холодному воздуху  $15 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ .
9. Степень черноты серого тела составляет 0,75. Определить коэффициент излучения серого тела.
10. Определить потери тепла излучением с 1 м паропровода, если наружный диаметр паропровода  $d = 0,3 \text{ м}$ , коэффициент поглощения  $A = 0,9$ , температура стенки  $450^\circ\text{C}$ , температура окружающей среды  $50^\circ\text{C}$ .
11. По трубке с внутренним диаметром  $d = 8 \text{ мм}$  и длиной  $l > d50$  движется вода со скоростью 1,2 м/с. Температура поверхности трубки  $90^\circ\text{C}$ , средняя температура воды в трубке  $30^\circ\text{C}$ . Определить коэффициент теплоотдачи от стенки трубки к воде и среднюю по длине трубки плотность теплового потока.
12. Определить средний коэффициент конвективной теплоотдачи от потока воздуха к стенкам пятирядного пучка труб при поперечном его обтекании, если известны средняя скорость потока в узком сечении  $W = 10,2 \text{ м/с}$ , средняя температура воздуха  $t_{\text{воз}} = 450^\circ\text{C}$  и диаметр трубы  $d = 82 \text{ мм}$ . Характер расположения труб в пучке, шахматный.

## **ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА**

### ***Виды и характеристики топлива***

Состав и основные характеристики твердого топлива. Состав и основные характеристики жидкого топлива. Состав и основные характеристики газообразного топлива. Теплота сгорания топлива. Условное топливо. Приведенные характеристики. Классификация топлив

### ***Основы теории горения и организация сжигания топлив в промышленных условиях. Топочные устройства***

Основы расчета и основные параметры топочных устройств. Особенности сжигания газа. Горелки и топки для газообразного топлива и газообразных отходов производства. Форсунки и топки для жидкого топлива. Особенности сжигания твердых топлив

### ***Паровые и газовые турбины***

Действие рабочего тела на лопатки. Активные турбины. Реактивные турбины. Мощность и КПД турбины. Классификация турбин. Конденсационные устройства паровых турбин. Газотурбинные установки (ГТУ). Турборасширительные машины.

## ***Основы теплоснабжения***

Общие сведения. Теплоснабжение промышленных предприятий. Отопление. Вентиляция. Кондиционирование воздуха.

### ***Вопросы для самостоятельной подготовки***

1. Состав и основные характеристики твердого топлива.
2. Состав и основные характеристики жидкого топлива.
3. Состав и основные характеристики газообразного топлива.
4. Теплота сгорания топлива. Условное топливо. Приведенные характеристики. Классификация топлив.
5. Основы расчета и основные параметры топочных устройств.
6. Особенности сжигания газа. Горелки и топки для газообразного топлива и газообразных отходов производства.
7. Форсунки и топки для жидкого топлива. Особенности сжигания твердых топлив
8. Действие рабочего тела на лопатки. Активные турбины. Реактивные турбины. Мощность и КПД турбины.
9. Классификация турбин. Конденсационные устройства паровых турбин.
10. Газотурбинные установки (ГТУ). Турборасширительные машины.

### ***Тесты для самостоятельной подготовки***

#### **Химический недожог топлива является следствием ...**

- недостатка воздуха в зоне горения или плохого перемешивания воздуха с топливом
- избытка воздуха в зоне горения или хорошего перемешивания воздуха с топливом
- наличия твердых недогоревших частиц топлива
- наличия  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$  в продуктах сгорания

#### **Продукт анаэробной ферментации (сбраживания) органических отходов (навоза, растительных остатков, мусора и т.д.) называется ...**

- биогазом
- генераторным
- коксовым
- доменным

**Дутьевой вентилятор устанавливается с целью ...**

- подачи воздуха в котел
- создания разряжения в топке котла
- создания разряжения в газоходах котла
- создания избыточного давления в циркуляционном контуре котла

**Самотяга дымовой трубы будет тем больше, чем выше \_\_\_\_\_ газов в трубе и ниже температура воздуха.**

- температура
- давление
- теплопроводность
- вязкость

**Дымосос устанавливается с целью ...**

- создания разряжения (избыточного давления) в топке котла
- подачи воздуха в топку котла
- удаления из воды растворенных в ней газов
- создания избыточного давления в циркуляционном контуре котла

**Необходимость очистки дымовых газов от золы связана с ...**

- защитой атмосферы и предотвращением абразивного износа оборудования
- защитой сельскохозяйственных угодий
- защитой поверхности земли
- защитой рек и озер

**Цифрой 1 на схеме вертикально – водотрубного барабанного парового котла с естественной циркуляцией обозначен(-ы) ...**

- экранные трубы
- водяной экономайзер
- пароперегреватель
- барабан

**В топку котла подаются ...**

- энергетическое топливо и окислитель (воздух)
- энергетическое топливо, окислитель (воздух) и питательная вода
- каменный уголь, окислитель (воздух) и питательная вода
- природный газ, окислитель (воздух) и питательная вода

**К вспомогательному оборудованию котельной установки относится ...**

- оборудование для подачи топлива
- котел
- экономайзер котла
- топочная камера котла

### *Примерные тестовые задания*

#### **1. Первый закон термодинамики есть частный случай:**

1. Закона сохранения массы веществ.
2. Закона сохранения и превращения энергии.
3. Закона сохранения количества движения.

#### **2. При увеличении энтропии ( $S_2 > S_1$ ):**

1. Теплота не подводится и не отводится.
2. Теплота отводится.
3. Теплота подводится.

#### **3. Укажите аналитическое выражение второго закона термодинамики.**

1.  $ds \geq \delta q/T$ .
2.  $\delta q = du + pdv$ .
3.  $\delta q = dh - vdp$ .

#### **4. Указать формулы для определения удельной теплоты $q$ и удельной работы $\ell$ для изохорного процесса идеального газа.**

1.  $q = 0$   $\ell = \frac{R}{k-1}(T_1 - T_2)$ .
2.  $q = RT \cdot \ln(p_1/p_2)$   $\ell = q$ .
3.  $q = c_v \cdot (T_2 - T_1)$   $\ell = 0$ .

#### **5. Кипение – это:**

1. Процесс парообразования с поверхности жидкости.
2. Процесс парообразования во всем объеме жидкости.
3. Переход вещества из твердого состояния в газообразное.

#### **6. Как изменится влагосодержание ( $d$ ) влажного воздуха при температуре $60^\circ\text{C}$ и относительной влажности $60\%$ , если его нагреть в калорифере.**

1. Уменьшится.
2. Увеличится.
3. Не изменится.

#### **7. Перенос теплоты при соприкосновении частиц, имеющих различную температуру, называется:**

1. Теплопроводностью.
2. Конвекцией.
3. Излучением.

**8. Укажите формулу для определения коэффициента теплопередачи.**

1.  $\lambda = \frac{|q|}{|gradt|}$ .      2.  $k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$ .      3.  $a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$ .

**9. Укажите размерность числа Нуссельта.**

1. Вт / (м<sup>2</sup> · К).      2. Вт / (м · К).      3. Безразмерное.

**10. Степенью черноты тела ( $\epsilon$ ) называется:**

1. Отношение энергии пропущенной  $E_{\text{проп}}$  к энергии падающей  $E_{\text{пад}}$ .
2. Отношение излучательной способности  $E$  реального тела к излучательной способности  $E_0$  абсолютно черного тела при той же температуре.
3. Отношение отраженной энергии  $E_{\text{отр}}$  к энергии падающей  $E_{\text{пад}}$ .

**11. Определите тепловой поток в калорифере (теплообменном аппарате для нагрева воздуха в системе отопления), если в нем нагревается 0,5 кг/с воздуха от  $t_1 = -10$  °С до  $t_2 = 40$  °С. Теплоемкость воздуха принять равной 1,006 кДж/(кг·К).**

1. 19,76 кВт.      2. 21,83 кВт.      3. 25,15 кВт.

**12. Холодильный коэффициент - это :**

1. Отношение теплоты, отбираемой от холодного источника, к работе цикла.
2. Отношение работы цикла к теплоте, отдаваемой горячему источнику.
3. Отношение теплоты к абсолютной температуре.

**13. Сухой воздух имеет следующий массовый состав: примерно 23,2% O<sub>2</sub> и 76,8% N<sub>2</sub>. Определить газовую постоянную смеси ( $R_{\text{см}}$ ), если  $R_{\text{O}_2} = 260$  Дж/(кг·К)  $R_{\text{N}_2} = 297$  Дж/(кг·К)**

- 1). 286,9 Дж/(кг·К).      2). 557 Дж/(кг·К).  
3). 8314 Дж/(кг·К).

**14. Указать формулу теплоты, подведенной к газу в изохорном процессе.**

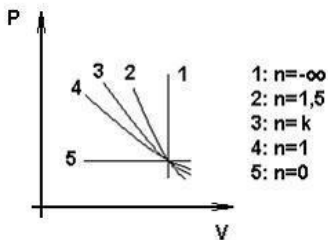
1.  $c_v(T_2 - T_1)$       2.  $c_p(T_2 - T_1)$       3.  $RT \ln(v_2/v_1)$       4.  
 $c_v(T_2 - T_1)(n-k)/(n-1)$

**15. Цикл с подводом теплоты при постоянном объеме:**

- 1) реализуется в дизелях
- 2) реализуется в дизелях и бензиновых двигателях
- 3) реализуется только в бензиновых двигателях
- 4) реализуется в бензиновых и газовых двигателях

16. Процесс 1, показанный на графике, называется ...

1. изохорным
2. политропным
3. изотермическим
4. изобарным

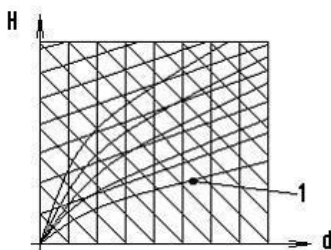


17. Конденсация - это:

1. Переход вещества из жидкого состояния в газообразное.
2. Переход вещества из газообразного состояния в жидкое.
3. Переход вещества из твердого состояния в газообразное.

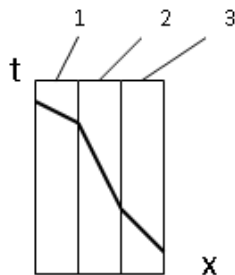
18. Линия 1, показанная на Hd-диаграмме влажного воздуха, соответствует ...

1. относительной влажности
2. изотерме влажного воздуха
3. влагосодержанию
4. изохральной



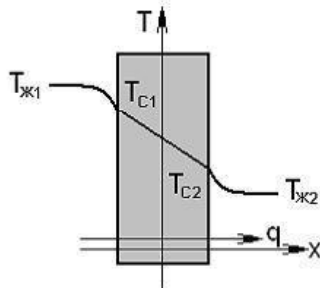
19. Какой слой многослойной стенки имеет наименьший коэффициент теплопроводности.

1. Слой 1.
2. Слой 3.
3. Слой 2.



20. Если  $\alpha_1 \gg \alpha_2$  то коэффициент теплопередачи для плоской стенки, представленной на рисунке, имеет вид ...

$$1. \quad k \approx \frac{1}{\frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad 2. \quad k \approx \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$$



$$3. \quad k \approx \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda}} \quad 4. \quad k \approx \frac{\lambda}{\delta}$$

**21. Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ :**

- 1) рассчитывается из критериального уравнения Рейнольдса
- 2) рассчитывается из критериального уравнения Прандтля
- 3) рассчитывается из критериального уравнения Нуссельта
- 4) рассчитывается из критериального уравнения Грасгофа

**22. В законе Стефана-Больцмана лучеиспускательная способность тела  $E$ :**

- 1) прямо пропорциональна температуре во второй степени
- 2) прямо пропорциональна температуре в четвертой степени
- 3) обратно пропорциональна температуре во второй степени
- 4) прямо пропорциональна температуре в четвертой степени

**23. Рекуперативным называется теплообменник, у которого:**

- 1) происходит передача теплоты от одного теплоносителя к другому
- 2) передача теплоты от одного теплоносителя к другому осуществляется через разделяющую их границу раздела
- 3) передача теплоты от одного теплоносителя к другому осуществляется через разделяющую их твердую стенку
- 4) передача теплоты от одного теплоносителя к другому осуществляется через разделяющую их жидкость

**24. Холодильный коэффициент - это :**

1. Отношение теплоты, отбираемой от холодного источника, к работе цикла.
2. Отношение работы цикла к теплоте, отдаваемой горячему источнику.
3. Отношение теплоты к абсолютной температуре.

**25. Основным горючим элементом жидкого топлива является ...**

1. углерод
2. кислород
3. водород
4. сера

**26. Среди всех потерь для котла потери теплоты с уходящими газами являются ...**

1. наибольшими
2. наименьшими
3. равными нулю
4. пренебрежимо малыми

## 2. ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Задача. Спроектировать трубчатый теплообменник непрерывного действия. Исходные данные по вариантам взять из таблицы 1.

Таблица 1. Исходные данные для расчета трубчатого теплообменника

Последняя цифра шифра	Тип среды	Производительность, $G$ (т/ч)	Внутренний диаметр трубки, $d$ (мм)	Толщина стенки трубки, $\delta$ (мм)	Длина трубки, $l$ (м)	Предварительное число ходов, $z_n$	Предпоследняя цифра шифра	Начальная температура среды, $t_1$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Конечная температура среды, $t_2$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Давление греющего пара, $p_n$ (МПа)
<b>0</b>	вода	10	32	2,8	2	2	<b>0</b>	14	90	0,202
<b>1</b>	молоко	8	25	2,8	0,8	4	<b>1</b>	8	85	0,145
<b>2</b>	сливки	4	20	2,35	1	4	<b>2</b>	9	80	0,126
<b>3</b>	вода	9	40	3	1,2	2	<b>3</b>	15	80	0,275
<b>6</b>	молоко	7	25	2,8	2	4	<b>4</b>	4	87	0,146
<b>5</b>	сливки	5	20	2,5	0,8	6	<b>5</b>	8	78	0,128
<b>6</b>	вода	15	32	2,8	1,8	4	<b>6</b>	14	84	0,237
<b>7</b>	молоко	11	20	2,35	1,6	4	<b>7</b>	8	83	0,146
<b>8</b>	вода	12	25	2,8	2	2	<b>8</b>	12	75	0,172
<b>9</b>	молоко	8	32	2,8	1,4	6	<b>9</b>	6	82	0,144

### МЕТОДИКА РАСЧЁТА ТРУБЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

Таблица 2. Исходные данные для расчёта

Показатель	Единица измерения	Условное обозначение	Значение
Массовая производительность	т/ч	$G$	
Температуры среды			
начальная	$^{\circ}\text{C}$	$t_1$	
конечная	$^{\circ}\text{C}$	$t_2$	
Давление греющего пара	МПа	$p_n$	
Внутренний диаметр трубок	мм	$d$	
Длина трубок одного хода	м	$l$	
Предварительное число ходов	шт.	$z_n$	
Вид нагреваемого продукта			
Материал теплоизоляции			



*Примечание: Материал теплоизоляции выбрать из таблицы 4 приложения в ходе расчета согласно рекомендациям.*

### **1. Гидродинамический расчёт**

Целью расчёта является определение режима движения и числа трубок в одном ходу теплообменника.

1.1. Определяем режим движения жидкости в нагревательных трубках при выбранной оптимальной технологической скорости из диапазона (0,6...1 м/с).

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (1.1)$$

где  $v$  – средняя скорость движения продукта, м/с;

$d$  – внутренний диаметр нагревательных трубок, м;

$\nu$  – коэффициент кинематический вязкости среды при средней температуре, м<sup>2</sup>/с.

$$t_{cp} = 0,5 (t_1 + t_2) \quad (1.2)$$

В таблице физических свойств продукта (см. Приложение) при  $t_{cp}$  методом интерполяции определяем значение  $\nu$ .

Объёмный расход продукта, м<sup>3</sup>/с:

$$V_c = \frac{G \cdot 1000}{3600 \cdot \rho}, \quad (1.3)$$

где  $\rho$  – плотность продукта при средней температуре, кг/м<sup>3</sup>.

Значение  $\rho$  определяем интерполяцией по табличным данным в интервале температур.

1.2. Рассчитываем число трубок в одном ходу теплообменника ( $n_x$ ) из уравнения постоянства расхода:

$$V_c = v \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} n_x. \quad (1.4)$$

откуда определяем искомую величину

$$n_x = \frac{4 \cdot V_c}{\pi \cdot d^2 \cdot v}. \quad (1.5)$$

### **2. Тепловой расчёт**

Целью расчёта является определение тепловых нагрузок в теплообменнике, расхода греющего пара и площади поверхности теплопередачи.

2.1. Необходимый расход тепла ( $Q$ , Вт) определяем по уравнению тепловой нагрузки:

$$Q = G \cdot c \cdot (t_2 - t_1) \quad (2.1)$$

где  $G$  – массовая производительность, кг/с;

$c$  – средняя удельная теплоёмкость продукта при  $t_{cp}$ , Дж/кг·К.

2.2. С другой стороны, эта же тепловая нагрузка, определяемая по основному уравнению теплопередачи, будет передана греющим паром продукту через боковые поверхности всех трубок

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta t_{cp} \quad (2.2)$$

где  $K$  – коэффициент теплопередачи, Вт/м<sup>2</sup>·К;

$F$  – площадь поверхности теплопередачи, м<sup>2</sup>;

$\Delta t_{cp}$  – средняя логарифмическая разность температур, °С.

2.3. Определяем среднюю логарифмическую разность температур  $\Delta t_{cp}$ .

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\bar{o}} - \Delta t_{\bar{m}}}{2,3 \cdot \lg \frac{\Delta t_{\bar{o}}}{\Delta t_{\bar{m}}}}, \quad (2.3)$$

где  $\Delta t_{\bar{o}}$  – большая разность температур пара и продукта,

$\Delta t_{\bar{m}}$  – меньшая разность температур пара и продукта.

$$\Delta t_{\bar{o}} = t_n - t_1; \quad \Delta t_{\bar{m}} = t_n - t_2 \quad (2.4)$$

$t_n$  – температура греющего пара, которую определяем по таблице свойств водяного насыщенного пара по величине заданного давления.

2.4. Коэффициент теплопередачи  $K$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (2.5)$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи от пара к стенке, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\delta_{cm}$  – толщина стенки трубки, м;

$\lambda_{cm}$  – коэффициент теплопроводности стенки, ( $\lambda_{cm} = 16 \dots 18$ ), Вт/(м·К);

$\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности стенки к жидкому продукту, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

2.5 Определяем температуру конденсата:

$$t_k = \frac{t_n + t_{cm}}{2}, \quad (2.6)$$

где  $t_{cm}$  – средняя температура стенки, °С.

$$t_{cm} = 0,5 \cdot (t_n + t_{cp}) \quad (2.7)$$

2.6. Рассчитываем  $\alpha_1$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$\alpha_1 = 0,728 \cdot \varepsilon^4 \sqrt{\frac{\lambda_k^3 \cdot \rho_k^2 \cdot g \cdot r \cdot 1000}{\mu_k \cdot (t_n - t_{cm}) \cdot d_{нар}}}, \quad (2.8)$$

где  $\lambda_k$  – теплопроводность конденсата, Вт/(м·К);

$\rho_k$  – плотность конденсата, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu_k$  – динамическая вязкость конденсата, Па·с;

$r$  – теплота парообразования, кДж/кг;

$d_{нар}$  – наружный диаметр трубки, м.

$$d_{нар} = d + 2 \cdot \delta_{cm}, \quad (2.9)$$

$\varepsilon$  – поправочный коэффициент:

$$\varepsilon = 8 \sqrt{\left( \frac{\lambda_{\kappa t_{cm}}}{\lambda_{\kappa}} \right)^3 \cdot \frac{\mu_{\kappa}}{\mu_{\kappa t_{cm}}}},$$

здесь  $\lambda_{\kappa t_{cm}}$  – теплопроводность конденсата, при температуре стенки, Вт/(м·К);

$\mu_{\kappa t_{cm}}$  – динамическая вязкость конденсата, при температуре стенки, Па·с;

2.6. Рассчитываем  $a_2$  из критериального уравнения Нуссельта:

- для ламинарного движения жидкости ( $Re < 2300$ ):

$$Nu = 0,15 \cdot Re^{0,33} \cdot Pr^{0,43} \cdot Gr^{0,1} \cdot \left( \frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25} \quad (2.10)$$

- для турбулентного движения жидкости ( $Re > 2300$ ):

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left( \frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25} \quad (2.11)$$

где  $Pr$  – критерий Прандтля в потоке жидкого продукта;

$Pr_{cm}$  – критерий Прандтля в пристеночном слое, который характеризуется более высокой температурой.

$$Pr = \frac{c \cdot \mu}{\lambda}, \quad (2.12)$$

здесь  $c$ ,  $\mu$ ,  $\lambda$ . определяем по таблицам физических свойств среды в приложении.

Аналогично определяем  $c_{cm}$ ,  $\mu_{cm}$ ,  $\lambda_{cm}$ .

$Gr$  – критерий Грасгофа.

$$Gr = \frac{g \cdot d^3}{\nu^2} \cdot \Delta t \cdot \beta, \quad (2.13)$$

здесь  $\Delta t$  – разность температур стенки и продукта:  $\Delta t = t_{cm} - t_{cp}$ ;

$\beta$  – коэффициент температурного расширения среды, 1/К.

$$\beta = \frac{1}{T}. \quad (2.14)$$

здесь  $T = 0,5(T_{cm} + T_{cp})$  – определяющая температура, К;

Зная величину  $Nu$ , определяем  $a_2$

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d}, \quad (2.15)$$

2.7. Рассчитываем площадь теплопередачи  $F$  из основного уравнения теплопередачи:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{cp}}, \quad (2.16)$$

2.8. Фактическая площадь теплопередачи с учётом коэффициента использования поверхности нагрева  $\varphi = 0,8$  составит:

$$F_{\varphi} = \frac{F}{\varphi}. \quad (2.17)$$

2.9. Определяем массовый расход греющего пара  $G_n$

$$G_n = \frac{Q}{i' - i''}, \quad (2.18)$$

где  $i'$  – энтальпия греющего пара, Дж/кг;

$i''$  – энтальпия конденсата, Дж/кг.

2.10. Удельный расход греющего пара  $d_n$

$$d_n = G_n / G \quad (2.19)$$

### 3. Конструкторский расчёт

Цель расчёта - определение точного общего числа нагревательных трубок и габаритных размеров теплообменника.

3.1. Определяем фактическое число ходов  $z_\phi$ :

$$z_\phi = \frac{F_\phi}{\pi \cdot d_n \cdot 2 \cdot l \cdot n_x}. \quad (3.1)$$

3.2. Общее предварительное число трубок  $n_0$ :

$$n_0 = n_x \cdot z_\phi \quad (3.2)$$

Нагревательные трубки в аппарате располагают по сторонам правильных вписанных шестиугольников.

3.3. Число вписанных правильных шестиугольников, по сторонам которых располагают нагревательные трубки ( $a$ ) определяем решением квадратного уравнения вида:

$$n_0 = 3a^2 + 3a + 1 \rightarrow 3a^2 + 3a + (1 - n_0) = 0 \quad (3.3)$$

3.4. В приложении находим ближайшее стандартное ( $n_{oc}$ ) общее число трубок при  $a = n_{oc}$ .

3.5. Количество трубок, попавших под перегородки при диагональном размещении последних  $n_{nep} = a$ .

3.6. Фактическое общее количество трубок ( $n_{оф}$ ):

$$n_{оф} = n_{oc} - n_{nep} \quad (3.4)$$

3.7. Рассчитываем внутренний диаметр корпуса теплообменника

$$D = 1,15 \cdot \varphi_1 \cdot d_n \cdot n_{оф}^{0,5} \quad (3.5)$$

где  $\varphi_1 = 1,40 \dots 1,65$  - коэффициент, учитывающий шаг размещения трубок.

3.8. Определяем толщину стенки корпуса  $\delta_k$ :

$$\delta_k = \frac{3 \cdot p_n \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_2}, \quad (3.6)$$

где  $[\sigma] = 80$  МПа – среднее допустимое напряжение при деформации растяжения стенок корпуса.

$\varphi_2 = 0,75$  – коэффициент ослабления корпуса за счёт сварного шва.

3.9. Наружный диаметр  $D_n$  корпуса аппарата, который включает в себя два барабана:

$$D_n = D + 2\delta_k \quad (3.7)$$

3.10. Общая длина каждого барабана пастеризатора с учётом длин торцовых крышек ( $L$ ):

$$L=l+2\cdot 0,15\cdot l \quad (3.8)$$

3.11. Проверяем конструктивное соотношение по устойчивости для корпуса (барабана).

$$L/D_H \leq 10 \quad (3.9)$$

3.12. Рассчитываем диаметры патрубков в теплообменнике по формулам из уравнения расхода:

- для подачи и отвода продукта

$$d_1 = d_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot V_c}{\pi \cdot v}} \quad (3.10)$$

- для подачи греющего пара

$$d_n = \sqrt{\frac{4 \cdot G_n}{\pi \cdot \rho_n \cdot v_n}} \quad (3.11)$$

где  $v_n$  – скорость движения пара, принимается 30 м/с;

-для отвода конденсата

$$d_k = \sqrt{\frac{4 \cdot G_n}{\pi \cdot \rho_k \cdot v_k}} \quad (3.12)$$

где  $v_k$  – скорость движения конденсата (принимается равной от 1...2 м/с).

#### **4. Изоляционный расчёт**

Цель расчёта - определение оптимальной толщины слоя изоляционного материала. По Правилам противопожарной безопасности температура наружной поверхности корпуса не должна превышать значения  $t_2 = 40^\circ\text{C}$ . По нормам БЖД температура воздуха в цехе в среднем должна составлять  $t_6 = 22^\circ\text{C}$ .

Толщина слоя тепловой изоляции должна быть такой, чтобы потери тепла, происходящие в результате конвекции и лучеиспускания, были минимальными и не превышали 5% от тепла, поступающего с греющим паром, что соответствует технико-экономическим требованиям, предъявляемым к тепловому оборудованию. Расчёты показывают, что в большинстве случаев теплотери существенно менее 5% процентов от поступившего тепла.

В качестве изоляционного материала выбираем либо совелит, либо асбозурит или другие материалы, имеющие относительно низкие значения коэффициентов теплопроводности  $\lambda_2$ . Наружная поверхность изоляции будет покрашена масляной краской светлых тонов слоем толщиной  $\delta_3 = 1$  мм с  $\lambda_3 = 0,233$  Вт/(м·К).

4.1. Рассчитываем коэффициент теплоотдачи ( $a_k$ ) конвекцией при свободном движении газов (воздуха) от наружной поверхности изоляции к воздуху в цехе. С этой целью решаем критериальное уравнение Нуссельта (в первом приближении - для турбулентного режима).

$$Nu = 0,15 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,333} \quad (4.1)$$

где  $Nu$  - критерий Нуссельта, характеризующий интенсивность теплоотдачи конвекцией.

$Gr$  – критерий Грасгофа, характеризующий подъемную силу при конвекции воздушных потоков.

$Pr$  – критерий Прандтля, характеризующий физические свойства воздуха.

$$Gr = \frac{g \cdot d^3}{\nu^2} \cdot \Delta t \cdot \beta, \quad (4.2)$$

где  $l$  – определяющий линейный размер для потока воздуха. Для горизонтального двухбарабанного пастеризатора (теплообменника)

$$l = 2 \cdot D_n \quad (4.3)$$

$\beta$  – коэффициент температурного расширения воздуха,  $1/^\circ\text{C}$ :

$$\beta = \frac{1}{273 + t_g}, \quad (4.4)$$

$\Delta t$  – средний температурный напор между поверхностью и воздухом.

$$\Delta t = t_2 - t_g \quad (4.5)$$

$\nu$  – кинематический коэффициент вязкости воздуха при  $t_g$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

По таблице физических свойств воздуха в Приложении при  $t_g$  находим значение  $Pr$ . Вычисляем произведение  $(Gr \cdot Pr)$ . Если  $(Gr \cdot Pr) > 1 \cdot 10^9$ , то имеет место турбулентный режим движения воздуха. Если  $(Gr \cdot Pr) < 1 \cdot 10^9$ , то имеет место ламинарный режим движения воздуха. В этом случае используют критериальное уравнение Нуссельта вида:

$$Nu = 0,54 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25} \quad (4.6)$$

при этом зная величину  $Nu$  определяем  $\alpha_k$

$$Nu = \frac{\alpha_k \cdot l}{\lambda}, \quad (4.7)$$

откуда коэффициент теплоотдачи конвекцией ( $\alpha_k$ ):

$$\alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda}{l}, \quad (4.8)$$

4.3. Рассчитываем коэффициент теплоотдачи лучеиспускание ( $\alpha_l$ ) от наружной поверхности пастеризатора.

Действительная константа лучеиспускания ( $C$ ) при  $\varepsilon = 0,86$ :

$$C = 4,96 \cdot \varepsilon \quad (4.9)$$

Температурный коэффициент ( $\beta$ ):

$$\beta = \frac{\left(\frac{273 + t_2}{100}\right)^4 - \left(\frac{273 + t_{cm}}{100}\right)^4}{t_2 - t_{cm}}, \quad (4.10)$$

Коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием  $\alpha_l$

$$\alpha_l = c \cdot \beta \quad (4.11)$$

4.4. Определяем суммарный коэффициент теплоотдачи ( $\alpha$ ,  $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{K}$ )

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_l \quad (4.12)$$

4.5. Средняя разность температур греющего пара и воздуха в цехе.

$$t_{cp} = t_n - t_e \quad (4.13)$$

4.6. Удельные потери теплоты в окружающую среду ( $q$ ), Вт/м<sup>2</sup>:

$$q = \alpha \cdot (t_2 - t_e) \quad (4.14)$$

4.7. Коэффициент теплоотдачи от пара к воздуху (K)

$$K = q/t_{cp} \quad (4.15)$$

4.8. Рассчитываем толщину слоя изоляции ( $\delta_2$ )

$$\delta_2 = \lambda_2 \cdot \left( \frac{1}{K} - \frac{1}{\alpha} - \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right). \quad (4.16)$$

### 5. Расчёт теплопотерь

5.1. Определяем изолированную суммарную боковую поверхность двухбарабанного пастеризатора ( $F_{бок}$ ).

$$F_{бок} = \pi \cdot (D_n + 2 \cdot \delta_{из}) \cdot L \quad (5.1)$$

5.2. Определяем изолированную суммарную торцевую поверхность двухбарабанного пастеризатора ( $F_{тор}$ ).

$$F_{тор} = 2 \cdot \pi \cdot (D_n^2 / 4) \quad (5.2)$$

5.3. Определяем потери теплоты с изолированной поверхности пастеризатора ( $Q_{ном}^{из}$ ).

$$Q_{ном}^{из} = q \cdot (F_{бок} + F_{тор}) \quad (5.3)$$

5.4. Коэффициент теплоотдачи от неизолированной поверхности

$$\alpha_n = 9,74 + 0,07 \cdot \Delta t \quad (5.4)$$

5.5. Определяем потери теплоты с неизолированной поверхности пастеризатора ( $Q_{ном}^н$ ).

$$Q_{ном}^н = \alpha_n \cdot F_{тор} \cdot (t_2 - t_e) \quad (5.5)$$

5.6. Суммарные потери теплоты со всей поверхности теплообменника

$$Q_{ном} = Q_{ном}^{из} + Q_{ном}^н \quad (5.6)$$

5.7. Относительные потери теплоты составляют ( $Q_{отн}$ )

$$Q_{отн} = Q_{ном} / Q \quad (5.7)$$

Должно выполняться соотношение  $Q_{отн} < 5\%$ . В противном случае выполняют перерасчёт толщины изоляционного слоя и затем перерасчёт теплопотерь.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЭКЗАМЕНУ

1. Что такое термодинамическая система, термодинамический процесс?
2. Термические параметры состояния.
3. Уравнения состояния для идеальных газов.
4. Что такое работа, теплота. Понятие о внутренней энергии. Изображение работы и тепла в диаграммах P-V и T-S.
5. Математическое выражение первого закона термодинамики для идеальных реальных газов.
6. Теплоемкость. Различные виды теплоемкости и связь между ними.
7. Физическая сущность энтальпии.
8. Зависимость энтропии от основных термодинамических параметров.
9. Исследование изохорного процесса, изобразить в диаграммах P-V и T-S.
10. Исследование изобарического процесса, изобразить в диаграммах P-V и T-S.
11. Исследование изотермического процесса, изобразить в диаграммах P-V и T-S.
12. Исследование адиабатного процесса, изобразить в диаграммах P-V и T-S.
13. Исследование политропного процесса, изобразить в диаграммах P-V и T-S.
14. Сущность второго закона термодинамики и основные его формулировки.
15. Цикл Карно, вывод формулы КПД цикла.
16. Изменение энтропии в необратимых процессах, физический смысл энтропии.
17. Дать определения: влажный, насыщенный, сухой насыщенный и перегретый пар.
18. Математическое выражения первого закона для потока.
19. Теоретическая индикаторная диаграмма одноступенчатого компрессора. Понятие о вредном пространстве.
20. Индикаторная диаграмма многоступенчатого компрессора.
21. Определение термической работы для одноступенчатого и многоступенчатого компрессора.
22. Вывод формулы КПД цикла при  $V=\text{const}$ . Изобразить цикл в P-V и T-S - диаграммах.
23. Вывод формулы КПД цикла при  $P=\text{const}$ . Изобразить цикл в P-V и T-S - диаграммах.



24. Вывод формулы КПД цикла при  $V=\text{const}$  и  $P=\text{const}$  (со смешанным подводом теплоты). Изобразить цикл в  $P$ - $V$  и  $T$ - $S$  - диаграммах.
25. Назовите основные виды теплообмена.
26. Уравнение температурного поля, температурный градиент.
27. Дать определение теплопроводности, закон Фурье.
28. Закон Ньютона – Рихмана.
29. Что называется коэффициентом теплопроводности, от каких параметров он зависит.
30. Вывод уравнения теплопроводности однослойной плоской стенки.
31. Вывод уравнения теплопроводности многослойной плоской стенки.
32. Вывод уравнения теплопроводности через однослойную цилиндрическую стенку.
33. Вывод уравнения теплопроводности через многослойную цилиндрическую стенку.
34. Что называется теплопередачей. Вывод уравнения теплопередачи.
35. Определение коэффициента теплопередачи.
36. Вывод уравнения теплопередачи через однослойную плоскую стенку.
37. Вывод уравнения теплопередачи через многослойную плоскую стенку.
38. Вывод уравнения теплопередачи через однослойную цилиндрическую стенку.
39. Вывод уравнения теплопередачи через многослойную цилиндрическую стенку.
40. Определение коэффициента теплоотдачи при помощи критериального уровня. Определение критериального уровня. Виды общего критериального уровня.
41. Что называется коэффициентом поглощения, отражения и проницаемости.
42. Закон Стефана – Больцмана.
43. Типы теплообменных аппаратов.
44. Порядок расчета теплообменного аппарата.
45. Определение среднего температурного напора.
46. Определение необходимой поверхности нагревательных приборов.
47. Теплоснабжение предприятий. Определение расхода теплоты на технологические нужды.
48. Расчет расхода теплоты при теплоснабжении предприятий на отопление, вентиляцию, кондиционирование воздуха и горячее водоснабжение.

49. Состав и основные характеристики твердого топлива.
50. Состав и основные характеристики жидкого топлива.
51. Состав и основные характеристики газообразного топлива.
52. Теплота сгорания топлива. Условное топливо. Приведенные характеристики. Классификация топлив.
53. Основы расчета и основные параметры топочных устройств.
54. Особенности сжигания газа. Горелки и топки для газообразного топлива и газообразных отходов производства.
55. Форсунки и топки для жидкого топлива. Особенности сжигания твердых топлив
56. Действие рабочего тела на лопатки. Активные турбины. Реактивные турбины. Мощность и КПД турбины.
57. Классификация турбин. Конденсационные устройства паровых турбин.
58. Газотурбинные установки (ГТУ). Турборасширительные машины.
59. Общие сведения. Теплоснабжение промышленных предприятий. Отопление. Вентиляция. Кондиционирование воздуха.

## Приложения

**Таблица 1. Свойства насыщенного водяного пара в зависимости от давления**

Давление $p_n$ , МПа	Давление $p_n$ , атм	Температура, $t_n$ , °C	Плотность $\rho_n$ , кг/м <sup>3</sup>	Энтальпия жидкости $i''$ , кДж/кг	Энтальпия пара $i'$ , кДж/кг	Теплота парообразо- вания $r$ , кДж/кг
0,00981	0,01	6,6	0,00760	27,7	2506	2478
0,00147	0,015	12,7	0,01116	53,2	2518	2465
0,00196	0,02	17,1	0,01465	71,6	2526	2455
0,00245	0,025	20,7	0,01809	86,7	2533	2447
0,00294	0,03	23,7	0,02149	99,3	2539	2440
0,00392	0,04	28,6	0,02820	119,8	2548	2429
0,0490	0,05	32,5	0,03481	136,2	2556	2420
0,00589	0,06	35,8	0,04133	150,0	2562	2413
0,00785	0,08	41,1	0,05420	172,2	2573	2400
0,00981	0,10	45,4	0,06686	190,2	2581	2390
0,01177	0,12	49,0	0,07937	205,3	2588	2382
0,01471	0,15	53,6	0,09789	224,6	2596	2372
0,01962	0,20	59,7	0,1283	250,1	2607	2358
0,02943	0,30	68,7	0,1876	287,9	2620	2336
0,03924	0,40	75,4	0,2456	315,9	2632	2320
0,04905	0,50	80,9	0,3027	339,0	2642	2307
0,05886	0,60	85,5	0,3590	358,2	2650	2296
0,06867	0,70	89,3	0,4147	375,0	2657	2286
0,07848	0,80	93,0	0,4699	389,7	2663	2278
0,08829	0,90	96,2	0,5246	403,1	2668	2270
0,09810	1,0	99,1	0,5790	415,2	2677	2264
0,11772	1,2	104,2	0,6865	437,0	2686	2249
0,13734	1,4	108,7	0,7931	456,3	2693	2237
0,15696	1,6	112,7	0,898	473,1	2703	2227
0,17658	1,8	116,3	1,003	483,6	2709	2217
0,1962	2,0	119,6	1,107	502,4	2710	2208
0,2943	3,0	132,9	1,618	558,9	2730	2171
0,3924	4,0	142,9	2,120	601,1	2744	2141
0,4905	5,0	151,1	2,614	637,7	2754	2117
0,5886	6,0	158,1	3,104	667,9	2768	2095
0,6867	7,0	164,2	3,591	694,3	2769	2075
0,7848	8,0	169,6	4,075	718,4	2776	2057
0,8829	9,0	174,5	4,556	740,0	2780	2040
0,981	10	179,0	5,037	759,6	2784	2024
1,0791	11	183,2	5,516	778,1	2787	2009
1,1772	12	187,1	5,996	795,1	2790	1995
1,2753	13	190,7	6,474	811,2	2793	1984
1,3734	14	194,1	6,952	826,7	2795	1968

продолжение таблицы 1.

Давление $p_n$ , МПа	Давление $p_n$ , атм	Температура, $t_n$ , °С	Плотность $\rho_n$ , кг/м <sup>3</sup>	Энтальпия жидкости $i''$ , кДж/кг	Энтальпия пара $i'$ , кДж/кг	Теплота парообразова- ние $r$ , кДж/кг
1,4715	15	197,4	7,431	840,9	2796	1956
1,5696	16	200,4	7,909	854,8	2798	1943
1,6677	17	203,4	8,389	867,7	2799	1931
1,7658	18	206,2	8,868	880,3	2800	1920
1,8639	19	208,8	9,349	892,5	2801	1909
1,962	20	211,4	9,83	904,2	2802	1898
2,943	30	232,8	14,7	1002	2801	1800
3,924	40	249,2	19,73	1079	2793	1715
4,905	50	262,7	24,96	1143	2780	1637
5,886	60	274,3	30,41	1199	2763	1565
6,867	70	284,5	36,12	1249	2746	1497
7,848	80	293,6	42,13	1294	2726	1432
8,829	90	301,9	48,45	1337	2705	1369
9,81	100	309,5	55,11	1377	2684	1306

Таблица 2. Основные размеры (мм) стальных водогазопроводных труб (ГОСТ 3262-75)

Условный проход dy	Наружный диаметр d	Толщина стенки труб		
		легких	обыкновенных	усиленных
6	10,2	1,8	2	2,5
8	13,5	2	2,2	2,8
10	17	2	2,2	2,8
15	21,3	2,35	-	-
15	21,3	2,5	2,8	3,2
20	26,8	2,35	-	-
20	26,8	2,5	2,8	3,2
25	33,5	2,8	3,2	4
32	42,3	2,8	3,2	4
40	48	3	3,5	4
50	60	3	3,5	4,5
65	75,5	3,2	4	4,5
80	88,5	3,5	4	4,5
90	101,3	3,5	4	4,5
100	114	4	4,5	5
125	140	4	4,5	5,5
150	165	4	4,5	5,5

**Таблица 3. Физические свойства теплоизоляционных материалов**

Наименование материала	Плотность, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность, $\lambda$ , Вт/м·К	Предельная температура применения, °С
Асбозурит Д	650	0,186	900
Асбозурит ДИ	450	0,093	600
Асбозурит Т	850	0,23	900
Вата стеклянная	130	0,0505	450
Войлок утеплённый	90	0,052	90
Минеральная вата	200	0,058	600
Новоасбозурит- 600	600	0,145	600
Полихлорвинил	100	0,058	70
Пеностекло	300	0,082	300
Совелит	500	0,1	450
Шлак котельный	850	0,24	50

**Таблица 4. Число труб при разбивке по шестиугольникам для трубчатых теплообменников**

Число шестиугольников ( <i>a</i> )	Число труб		
	По диагонали	Общее без учёта сегментов	Общее в аппарате <i>n<sub>ос</sub></i>
1	3	7	7
2	5	19	19
3	7	37	37
4	9	61	61
5	11	91	91
6	13	127	127
7	15	169	187
8	17	217	241
9	19	271	301
10	21	331	367
11	23	397	439
12	25	469	517
13	27	547	613
14	29	631	721
15	31	721	823
16	33	817	931
17	35	919	1045
18	37	1027	1165
19	39	1141	1303
20	41	1261	1459

**Таблица 5. Основные физические свойства воды**

<b>t,</b> <b>°C</b>	<b><math>\rho</math>,</b> <b>кг/м<sup>3</sup></b>	<b>c,</b> <b>кДж/(кг·К)</b>	<b><math>\lambda</math>,</b> <b>Вт/(м·К)</b>	<b><math>\mu \cdot 10^{-6}</math>,</b> <b>Па·с</b>	<b><math>\nu \cdot 10^{-6}</math>,</b> <b>м<sup>2</sup>/с</b>	<b>Pr</b>
0	999,8	4,24	0,551	1788,5	1,79	13,7
5	999,7	4,228	0,563	1528,8	1,540	11,3
10	998,9	4,211	0,586	1127	1,100	8,15
15	998,55	4,209	0,5925	1063,3	1,05	7,605
20	998,2	4,207	0,599	999,6	1,000	7,06
25	996,9	4,207	0,608	896,7	0,910	6,2
30	995,6	4,203	0,618	800,7	0,805	5,5
35	993,9	4,203	0,626	715,4	0,72	4,85
40	992,2	4,203	0,634	652,7	0,659	4,3
45	990,1	4,203	0,641	602,7	0,615	3,9
50	988	4,203	0,648	548,8	0,556	3,56
55	985,6	4,203	0,654	504,7	0,515	3,25
60	983,2	4,207	0,659	470,4	0,479	3
65	980,5	4,211	0,664	436,1	0,445	2,75
70	977,7	4,215	0,668	405,7	0,413	2,56
75	974,8	4,215	0,671	377,3	0,385	2,35
80	971,8	4,219	0,675	355,7	0,366	2,23
85	968,5	4,224	0,678	347,9	0,347	2,1
90	965,3	4,228	0,68	314,6	0,326	1,95
95	961,8	4,23	0,6815	298,4	0,3105	1,85
100	958,3	4,232	0,683	282,2	0,295	1,75

**Таблица 6. Основные физические свойства молока**

<b>t,</b> <b>°C</b>	<b><math>\rho</math>,</b> <b>кг/м<sup>3</sup></b>	<b>c,</b> <b>кДж/(кг·К)</b>	<b><math>\lambda</math>,</b> <b>Вт/(м·К)</b>	<b><math>\mu \cdot 10^{-6}</math>,</b> <b>Па·с</b>	<b><math>\nu \cdot 10^{-6}</math>,</b> <b>м<sup>2</sup>/с</b>	<b>Pr</b>
5	1032,6	3,868	0,486	2965,6	2,87	30,20
10	1031,7	3,870	0,489	2469,6	2,39	20,00
15	1030,7	3,880	0,492	2097,2	2,04	17,00
20	1028,7	3,890	0,495	1784,0	1,74	14,30
25	1027,3	3,895	0,499	1529,0	1,50	11,80
30	1024,8	3,900	0,500	1323,0	1,30	10,60
35	1023,2	3,906	0,501	1196,0	1,16	9,05
40	1020,9	3,910	0,506	1078,0	1,02	7,50
45	1018,8	3,918	0,510	940,8	0,92	7,00
50	1015,9	3,870	0,516	852,6	0,84	6,50
55	1014,0	3,867	0,517	764,4	0,76	6,00
60	1011,1	3,850	0,518	705,6	0,70	5,35
65	1008,7	3,850	0,520	646,8	0,65	5,00
70	1005,2	3,850	0,524	617,4	0,62	4,65
75	1003,0	3,850	0,528	588,0	0,58	4,40
80	1000,3	3,850	0,530	568,4	0,56	4,20
85	996,0	3,850	0,530	558,6	0,54	4,12
90	999,0	3,850	0,531	548,8	0,52	4,07
95	990,0	3,850	0,538	539,0	0,49	4,00
100	887,0	3,850	0,542	529,2	0,48	3,84

**Таблица 7. Основные физические свойства сливок**

<b>t, °C</b>	<b><math>\rho</math>, кг/м<sup>3</sup></b>	<b>c, кДж/(кг·K)</b>	<b><math>\lambda</math>, Вт/(м·K)</b>	<b><math>\mu \cdot 10^{-3}</math>, Па·с</b>	<b><math>\nu \cdot 10^{-3}</math>, м<sup>2</sup>/с</b>	<b>Pr</b>
5	1002,2	3,268	0,286	78,4	0,07848	895
10	1002,2	3,687	0,295	39,2	0,03924	490
15	996,9	4,119	0,306	17,2	0,01717	319
20	993,9	4,022	0,317	11,8	0,01177	148
25	991,5	4,106	0,321	8,9	0,00883	114,75
30	988	3,855	0,324	7,0	0,00687	81,50
35	985	3,687	0,329	5,5	0,00540	64,35
40	983	3,570	0,334	4,5	0,0044	47,20
45	932	3,612	0,340	4,2	0,00392	36,00
50	980	3,599	0,345	2,6	0,00255	26,00
55	980	3,599	0,351	2,57	0,00252	25,55
60	974	3,603	0,358	2,57	0,00250	25,10
65	971	3,603	0,367	2,54	0,00247	23,10
70	965	3,603	0,381	2,54	0,00245	23,10
75	964	3,603	0,390	2,54	0,00245	23,00
80	962	3,603	0,398	2,55	0,00245	23,00
85	960	3,603	0,395	2,54	0,00244	22,50
90	960	3,603	0,395	2,53	0,00243	22,00
95	960	3,603	0,395	2,52	0,00242	21,75
100	960	3,603	0,395	2,50	0,00240	21,63

**Таблица 8. Физические свойства сухого воздуха при атмосферном давлении**

<b>t, °C</b>	<b><math>\rho</math> кг/м<sup>3</sup></b>	<b>c, кДж/кг·K</b>	<b><math>\lambda \cdot 10^{-2}</math>, Вт/м·K</b>	<b><math>\mu \cdot 10^{-6}</math>, Па·с</b>	<b><math>\nu \cdot 10^{-6}</math>, м<sup>2</sup>/с</b>	<b>Pr</b>
0	1,293	1,005	2,44	17,17	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	17,66	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	18,15	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	18,64	16	0,701
40	1,128	1,005	2,76	19,13	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	19,62	17,95	0,698
60	1,06	1,005	2,89	20,11	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	21,09	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	21,48	22,1	0,69

## Библиографический список

1. Алексеев Г.Н. Общая теплотехника. – М.: Высш. шк., 1980
2. Круглов Г. А. Теплотехника: Учебное пособие. 2-е изд., стер./ Г. А.Круглов, Р. И. Булгакова, Е. С. Круглова — СПб.: Издательство «Лань», 2012.— 208с: ил.— (Учебники для вузов. Специальная литература) [ЭБС Лань].
3. Круглов, Г.А.Теплотехника : учеб. пособие для студ. вузов по напр. "Агроинженерия". - СПб. : Лань, 2010. - 208 с. [ЭБС Лань].
4. Кудинов В.А. Теплотехника: Учебное пособие / В.А. Кудинов, Э.М. Карташов, Е.В. Стефанюк. - М.: КУРС: НИЦ ИНФРА-М, 2015. - 424 с. [ЭБС ИНФРА-М].
5. Ларионов Н.Н. Теплотехника: учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1985.– 432с.
6. Петухов, Н.А. Краткий курс теплотехники / Новосиб. гос. аграр. ун-т; Инж.ин-т. - Новосибирск, 2007. - 231 с.
7. Тепломассообмен: Учебное пособие / А.А. Кудинов. - М.: ИНФРА-М, 2012. - 375 с. [ЭБС ИНФРА-М].
8. Теплотехника: Учеб. для вузов / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт и др.; Под ред. А.П. Баскакова. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1991 . – 224 с.
9. Теплотехника: учеб. для вузов / под ред. В.И. Крутова. – М.: Машиностроение, 1986. – 419 с.



Составитель: Пшенов Евгений Александрович  
Христенко Александр Геннадьевич

## ТЕПЛОТЕХНИКА

задания и методические указания по выполнению  
самостоятельной и контрольной работы

Предназначены для студентов очной и заочной форм обучения по направлениям подготовки: Агроинженерия; Продукты питания животного происхождения; Технология продукции и организация общественного питания.

Печатается в авторской редакции

Компьютерная вёрстка Е.А. Пшенов

Формат 84×108/32. Объем 1,25 уч.-изд. Л  
Новосибирский ГАУ 2021