

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

ИНСТИТУТ ХОЛОДА И БИОТЕХНОЛОГИЙ



О.Б. Цветков, Ю.А. Лаптев, Ю.Н. Ширяев

**ТЕРМОДИНАМИКА. ТЕПЛОМАССОБМЕН
ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА
ПРИКЛАДНОЙ ТЕПЛОМАССОБМЕН**

Учебно-методическое пособие



Санкт-Петербург

2014

УДК 536

Цветков О.Б., Лаптев Ю.А. Ширяев Ю.Н. Термодинамика. Теплообмен. Термодинамика и теплопередача. Прикладной теплообмен: Учеб.-метод. пособие. – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2014. – 66 с.

Приведены рабочая программа и контрольные работы по термодинамике и теплопередаче, список рекомендуемой учебной литературы. В приложении даны таблицы свойств холодильных агентов, необходимые для выполнения контрольных и курсовых работ.

Предназначено для бакалавров по направлениям 16.03.03; 14.03.01; 23.03.03 факультета заочного обучения.

Рецензент: кандидат техн. наук, проф. А.А. Малышев

**Рекомендовано к печати редакционно-издательским советом
Института холода и биотехнологий**



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики».

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2014

© Цветков О.Б., Лаптев Ю.А., Ширяев Ю.Н., 2014

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Данное учебно-методическое пособие включает в себя рабочую программу и контрольные работы для бакалавров, обучающихся по холодильным направлениям: 16.03.03 (дисциплина «Термодинамика и теплопередача», 14.03.01 (дисциплины «Термодинамика» и «Тепломассообмен»), 23.03.03 (дисциплина «Прикладной тепломассообмен»), в том числе по сокращенной форме обучения.

Эти дисциплины изучаются студентами заочной формы обучения самостоятельно по рекомендованным в списке учебной литературы учебникам, учебным пособиям и методическим указаниям [1–10], после чего выполняются контрольные и курсовые работы. В период лабораторно-экзаменационной сессии на кафедре читаются обзорные лекции по основным вопросам указанных дисциплин, студенты выполняют лабораторные работы. В процессе освоения дисциплин для студентов проводятся консультации.

Изучение курсов рекомендуется вести в следующем порядке: внимательно ознакомиться с содержанием соответствующего раздела рабочей программы и методическими указаниями, прочитать по учебнику материал, рекомендуемый в программе для изучения данной темы. Изучение курсов полезно начинать с уяснения принципиальных положений, затем переходить к разбору его конкретных особенностей. Усвоив смысл изучаемого раздела и разобравшись в ходе математических выкладок, важно самостоятельно повторить вывод той или иной зависимости. Такой метод способствует лучшему усвоению идей и методов, положенных в основу математических выводов. При изучении материала полезно составлять конспекты по каждой теме изучаемых курсов.

Для закрепления пройденного материала студент в процессе изучения дисциплин выполняет контрольные и курсовые работы, а во время сессии – лабораторные работы.

Для положительной аттестации по дисциплине от студента требуется знание теоретических положений дисциплин, понимание физической сущности изучаемых явлений и процессов, умение применять теоретические положения к решению практических задач и выполнению лабораторных работ.

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И ИНДЕКСЫ

- a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;
 b – ширина, м ;
 c_v – удельная массовая изохорная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;
 c_p – удельная массовая теплоемкость при постоянном давлении, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;
 d – диаметр, м ;
 d – влагосодержание, $\text{кг}/\text{кг}$ сухого воздуха;
 h – энтальпия, $\text{кДж}/\text{кг}$;
 h – высота, м ;
 k – показатель адиабаты;
 l – длина, характеристический размер, м ;
 M – масса, кг ;
 n – показатель политропы;
 p – давление, Па , бар ;
 q – плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$;
 Q – тепловой поток, Вт ;
 Q_τ – количество теплоты, Дж ;
 r – удельная теплота парообразования, $\text{кДж}/\text{кг}$;
 s – удельная энтропия, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;
 S – шаг пучка труб;
 t – температура, $^\circ\text{C}$;
 T – температура, К , $T = t + 273,15$;
 v – удельный объем, $\text{м}^3/\text{кг}$;
 W, w – скорость, $\text{м}/\text{с}$;
 x – степень сухости;
 α – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$;
 k – коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$;
 β – коэффициент объемного расширения $1/\text{К}$;
 Δt – разность (перепад) температур, $^\circ\text{C}$;
 ε – холодильный коэффициент;
 ε – степень черноты;
 λ – теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$;
 μ – коэффициент динамической вязкости, $\text{Па}\cdot\text{с}$;
 ν – коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$;
 ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 φ – относительная влажность, %;

ψ – степень насыщения;
 ξ – массовая концентрация раствора, кг/кг, %;
 $Re = wl/\nu$ – критерий Рейнольдса;
 $Pr = \nu/a$ – критерий Прандтля;
 $Gr = g\beta l^3 \Delta t / \nu^2$ – критерий Грасгофа;
 $Nu = \alpha l / \lambda$ – критерий Нуссельта;
R – обозначение хладагента по ИСО.

ИНДЕКСЫ

б – бетон;
в – воздух
вв – влажный воздух;
ж – жидкость;
н – состояние насыщения;
нач – начальная;
п – пар;
р – точка росы;
ст – стенка;
з – замерзание;
г – газообразное состояние;
m – средний;
' – насыщенная жидкость;
" – сухой насыщенный пар.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

Техническая термодинамика

Содержание программы

Введение

Предмет термодинамики, ее основные задачи. Значение тепловых процессов в холодильной технике и теплоэнергетике. Роль русских и советских ученых в развитии термодинамики. Фундаментальное значение термодинамики в развитии теплоэнергетики и холодильной техники.

Тема 1. Идеальные газы и их смеси.

Термическое уравнение состояния идеального газа. Универсальная и удельная газовые постоянные. Единицы измерения параметров состояния. МТШ–90. Расчет неизвестных параметров по уравнению состояния для чистого идеального газа и смесей.

Тема 2. Первый закон термодинамики.

Классификация термодинамических систем. Работа и теплота, как формы энергетического обмена. Формулировка и аналитическое выражение первого закона термодинамики. Формулы для расчета теплоты и работы. Функции состояния и функции процесса. Применение рабочей диаграммы.

Молекулярно-кинетическая теория теплоемкости газов. Энтальпия. Энтропия. Характеристические функции. Классификация теплоемкостей. Связь теплоемкостей с атомностью газа. Функции состояния – энтальпия и энтропия. Термодинамические диаграммы: $\ln p-h$ и $T-s$. Основные дифференциальные уравнения термодинамики.

Тема 3. Термодинамические процессы идеальных газов.

Классификация термодинамических процессов. Квазистатические или равновесные процессы. Причины и условия необратимости процессов. Изохорный, изобарный, изотермический и адиабатный процессы. Определение параметров рабочего тела в начальной и конечной точках процесса. Расчет характеристик процесса. Изображение на диаграммах.

Политропный процесс. Процессы в газовых компрессорах. Общий анализ процессов на основе сравнения показателей политропы. Изображение в диаграммах. Процессы газового компрессора.

Тема 4. Реальные газы. Пары.

Фазовая диаграмма $p-T$. Диаграмма $p-T$ для идеального и реального газа. Правило фаз Гиббса. Тройная и критические точки. Нормальная температура кипения. Обозначение хладагентов. Измерение зависимости между температурой насыщения и давлением. Аппроксимация опытных данных. Диаграмма p,v для пара. Изотермическое сжатие реального газа. Процесс парообразования при постоянном давлении. Параметры влажного пара. Широкодиапазонная диаграмма $p-v$. Уравнение состояния реального газа. Термодинамические таблицы и диаграммы. Паровые процессы

Уравнение состояния Ван-дер-Ваальса. Метастабильные состояния. Уравнение состояния Боголюбова–Майера. Структура таб-

лиц термодинамических свойств. Термодинамические диаграммы. Процессы реального газа. Изучение формы представления данных в различных термодинамических таблицах и диаграммах.

Тема 5. Второй закон термодинамики.

Сущность и формулировки второго закона термодинамики. Условия получения работы в тепловом двигателе и переноса теплоты от горячего источника к холодному. Прямые и обратные циклы. Цикл Карно. Теорема Карно. Основные положения второго закона термодинамики. Общие свойства обратимых и необратимых циклов. Интеграл Клаузиуса. Потеря работоспособности системы из-за необратимости протекающих в ней процессов.

Тема 6. Процессы истечения и дросселирования газов и паров.

Первый закон термодинамики для потока. Процессы истечения. Процессы течения газов и паров. Уравнение энергии или первого закона термодинамики для потока. Сопла и диффузоры. Скорость и расход газа при истечении. Условие перехода к сверхзвуковым скоростям. Расчет скорости и расхода газа при истечении с помощью термодинамических диаграмм и таблиц. Исследование адиабатного процесса истечения воздуха через суживающееся сопло. Построение графика зависимости расхода от отношения давлений.

Процесс дросселирования. Эффект Джоуля–Томсона. Закономерности процесса адиабатного дросселирования газов и паров. Дифференциальный и интегральный эффект Джоуля–Томсона. Кривая инверсии. Определение энтальпии водяного пара при помощи адиабатического дросселирования.

Тема 7. Циклы паросиловых установок.

Циклы Карно и Ренкина. Схемы установок реализации циклов Карно и Ренкина. Изображение циклов в диаграммах. Расчет работы, подведенной и отведенной теплоты, термический КПД. Расчет цикла Ренкина для перегретого пара. Методы повышения эффективности паросиловых установок. Теплофикация. Влияние параметров пара на термический КПД. Способы его повышения. Теплофикация.

Тема 8. Циклы паровых холодильных машин и тепловых насосов.

Обратный цикл Карно. Цикл холодильной машины с дроссельным вентилем. Схема холодильной машины, реализующей цикл Карно в области влажного пара. Недостатки машины. Холодильная машина с дроссельным вентилем. Схема машины. Изображение цик-

ла в диаграммах. Анализ циклов паровой холодильной машины. Цикл теплового насоса. Термический анализ замены расширительного цилиндра дроссельным вентилем. Цикл теплового насоса. Схема установки.

Тема 9. Циклы газовых машин.

Прямые газовые циклы. Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания. Циклы газотурбинных установок и реактивных двигателей. Термический КПД. Цикл воздушной холодильной машины. Схема машины. Расчет характеристик цикла. Достоинства и недостатки воздушной холодильной машины.

Тема 10. Основы термодинамики влажного воздуха.

Параметры влажного воздуха. Применение воздуха в технологических процессах. Состав атмосферы. Параметры влажного воздуха. Таблицы свойств влажного воздуха. Диаграмма $h-d$. Процессы влажного воздуха. Процессы охлаждения и нагревания влажного воздуха. Процессы смешения двух потоков влажного воздуха. Подмешивание к воздуху воды и водяного пара.

Теплопередача. Теплообмен

Содержание программы

Введение.

Развитие техники искусственного холода. Задачи дисциплины. Русская школа теплофизиков. Основные способы переноса теплоты и массы.

Тема 1. Теплопроводность и теплопередача.

Теория теплопроводности. Стационарный тепловой поток в неподвижной среде. Дифференциальное уравнение теплопроводности. Коэффициент теплопроводности. Теплопроводность и теплопередача при стационарном режиме. Передача теплоты через плоскую и цилиндрическую стенки. Закон Ньютона–Рихмана. Граничные условия. Критический диаметр изоляции.

Расчет передачи теплоты через плоскую и цилиндрическую стенки при граничных условиях первого и третьего рода. Определение коэффициента теплопроводности методом шара. Определение коэффициента теплопроводности жидкости методом коаксиальных цилиндров.

Тема 2. Конвективный теплообмен.

Основные понятия и определения. Математическое описание и методы решения задач конвективного теплообмена в однофазной среде. Дифференциальные уравнения энергии, движения, сплошности. Подобие и моделирование процессов конвективного теплообмена. Подобие физических процессов. Анализ размерностей. Теоремы подобия. Фундаментальные критерии подобия. Моделирование. Уравнения подобия. Обобщение экспериментальных данных методом подобия.

Теплоотдача при продольном обтекании плоской поверхности вынужденным потоком несжимаемой жидкости. Гидродинамика течения. Ламинарный и турбулентный пограничный слой. Аналитическое описание теплоотдачи.

Теплоотдача при вынужденном движении среды в трубах и каналах. Стабилизированное ламинарное и турбулентное течение. Аналогия Рейнольдса. Теплоотдача в каналах некруглого сечения и в изогнутых каналах.

Теплоотдача при внешнем обтекании вынужденным потоком одиночных цилиндров и трубных пучков. Поперечное обтекание одиночной трубы и пучков труб. Расчет теплообмена при вынужденном движении среды.

Теплообмен при естественной конвекции. Естественная конвекция вдоль вертикальной пластины и горизонтальных труб. Ламинарный и турбулентный пограничные слои. Конвекция в замкнутых объемах. Определение коэффициента теплоотдачи при естественном движении воздуха. Определение коэффициента теплоотдачи при вынужденном движении.

Теплообмен при фазовых превращениях. Кипение. Режимы кипения в большом объеме. Кризисы кипения. Конденсация. Решение Нуссельта. Факторы, не учитываемые теорией Нуссельта. Конденсация внутри труб. Капельная конденсация. Теплообмен при кипении и конденсации. Определение коэффициента теплоотдачи при кипении жидкости. Определение коэффициента теплоотдачи при конденсации.

Тема 3. Теплообмен излучением.

Законы излучения. Излучение серых тел. Излучение газов. Расчет теплообмена между плоскопараллельными серыми поверхностями. Диффузное излучение. Экраны. Сложный теплообмен.

Тема 4. Передача теплоты через оребренные поверхности.

Интенсификация теплопередачи. Прямое ребро постоянного сечения. Эффективность оребрения. Приведенные коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи. Передача теплоты через оребренные поверхности. Лучистый и сложный теплообмен.

Тема 5. Основы расчета теплообменных аппаратов.

Классификация аппаратов. Назначение теплообменников. Виды теплового расчета. Схемы движения сред в аппарате. Исследование теплообменного аппарата. Расчет теплопередачи в аппаратах рекуперативного типа энергетических установок. Тепловой баланс. Средняя разность температур. Итеративный метод расчета. Интенсификация теплопередачи. Расчет теплообменного аппарата.

Тема 6. Нестационарные задачи теплопроводности.

Аналитическое описание. Фундаментальные критерии подобия. Графики для расчета. Температурное поле тел в процессе их охлаждения (нагрева). Регулярный тепловой режим. Метод конечных разностей. Определение коэффициента теплопроводности изоляционных материалов.

Тема 7. Совместные процессы тепло- и массообмена.

Молекулярная и конвективная диффузия. Массоотдача. Массоперенос. Законы Фика. Дифференциальные уравнения. Критерии подобия. Тройная аналогия. Тепло- и массоперенос между водой и влажным воздухом. Закон Льюиса. Коэффициент влаговываждения. Тепло- и массообмен между водой и влажным воздухом.

Требования к выполнению контрольной работы

При выполнении контрольной работы необходимо придерживаться следующих правил:

- номер варианта (от 0 до 9) выбирать по последней цифре зачетной книжки;
- условия задач переписывать полностью;
- в процессе решения сначала приводить формулы, затем подставлять в них соответствующие численные значения, размерность приводить только для результата вычисления;
- вычисления проводить **только** в международной системе СИ;

– решения иллюстрировать схемами и графиками (если требуется по условию);

– в тексте работы приводить ссылки на использованную литературу, а в конце контрольной работы – список использованной литературы.

Таблицы и диаграммы свойств рабочих веществ, указанных в задачах, приведены в [7–10].

Контрольная работа подписывается студентом. Прием контрольных работ на рецензию прекращается за 10 дней до начала лабораторно-экзаменационной сессии.

- Для бакалавров 2-го курса направления 16.03.03 по дисциплине «Термодинамика и теплообмен»

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА ПО ТЕРМОДИНАМИКЕ

Задача 1. Газ сжимается в компрессоре по политропе с показателем n . В начальном состоянии давление газа p_1 и температура t_1 , в конечном состоянии давление p_2 . Масса газа $M = 10$ кг.

Определить параметры газа в начальном и конечном состояниях, работу и теплоту процесса, изменение внутренней энергии и энтропии. Найти работу компрессора в адиабатном, политропном и изотермическом процессах.

Принять показатель адиабаты $k = 1,4$; среднюю массовую изохорную теплоемкость $C_v = 0,723$ кДж/(кг·К). Для определения удельной газовой постоянной использовать уравнение Майера.

Изобразить политропный процесс в $p-v$ и $T-s$ -координатах (без масштаба). На этих же рисунках показать также изобарный, изотермический, адиабатный и изохорный процессы, имеющие начальное состояние в точке 1.

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра:

| Параметры | № варианта | | | | | | | | | |
|-------------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| n | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,1 |
| p_1 , бар | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1,7 |
| t_1 , °С | 50 | 40 | 30 | 20 | 10 | 0 | -10 | -20 | -30 | -40 |
| p_2 , бар | 1,5 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,4 | 2,8 | 2,9 | 3,1 | 3,2 |

Задача 2. Паросиловая установка (ПСУ) работает по циклу Ренкина. В турбину поступает водяной пар с температурой t_1 и давлением p_1 . На выходе из турбины давление p_2 , расход пара $M = 10$ кг/с.

Определить параметры (p, t, v, h, s, x) узловых точек цикла, подведенную и отведенную теплоту, работу цикла, термический коэффициент полезного действия и мощность установки.

Изобразить схему установки и цикл в диаграммах $p-v$, $T-s$ и $h-s$; показать графически теплоту и работу цикла. Параметры узловых точек определить двумя способами: 1) с помощью диаграммы; 2) по таблицам термодинамических свойств холодильного агента (или путем расчета, когда это необходимо).

Параметры точек цикла свести в таблицу.

| № точки | $t, ^\circ\text{C}$ | $p, \text{МПа}$ | $v, \text{м}^3/\text{кг}$ | $h, \text{кДж/кг}$ | $s, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ | x |
|--------------|---------------------|-----------------|---------------------------|--------------------|--|-----|
| 1 | * | * | * | * | * | * |
| | ** | ** | ** | ** | ** | ** |
| 2 и т. д. | * | * | * | * | * | * |
| | ** | ** | ** | ** | ** | ** |

*Параметры, определенные по диаграмме.

**Параметры, определенные по таблицам или полученные расчетом.

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра:

| Параметры | № варианта | | | | | | | | | |
|-----------------------|------------|-----|------|-----|------|------|------|------|------|------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| $p_1, \text{МПа}$ | 2,0 | 2,0 | 3,0 | 5,0 | 5,0 | 5,0 | 4,0 | 3,5 | 3,0 | 2,5 |
| $t_1, ^\circ\text{C}$ | 400 | 450 | 400 | 400 | 500 | 550 | 500 | 450 | 400 | 400 |
| $p_2, \text{МПа}$ | 0,1 | 0,1 | 0,05 | 0,1 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,01 |

Задача 3. Паровая компрессионная холодильная машина работает по циклу с дросселированием, перегревом перед компрессором и переохлаждением после конденсатора. Температура кипения хладагента в испарителе - t_0 . В компрессор поступает холодильный агент в состоянии перегретого пара с температурой t_1 . Температура конденсации хладагента в конденсаторе t_k . Хладагент перед дросселированием (регулирующим вентилем) охлаждается до температуры t_5 .

Определить параметры: давление, температуру, удельный объем, удельную энтальпию, удельную энтропию, степень сухости (p, t, v, h, s, x) узловых точек цикла, подведенную и отведенную теплоту, работу, теоретическую мощность привода компрессора, полную холодопроизводительность и холодильный коэффициент, если массовый расход циркулирующего хладагента $M = 0,2$ кг/с.

Изобразить схему установки, представить цикл в координатах $p-v, T-s$ и $\ln p-h$. Параметры узловых точек определить двумя способами: 1) с помощью диаграммы; 2) по таблицам термодинамических свойств холодильного агента (или путем расчета, когда это необходимо). Параметры ненасыщенной переохлажденной жидкости после конденсатора (кроме давления) определить условно по таблицам для насыщенной жидкости по температуре переохлаждения t_5 .

Параметры точек цикла свести в таблицу:

| № точки | $t, ^\circ\text{C}$ | $p, \text{МПа}$ | $v, \text{м}^3/\text{кг}$ | $h, \text{кДж/кг}$ | $s, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ | x |
|--------------|---------------------|-----------------|---------------------------|--------------------|--|-----|
| 1 | * | * | * | * | * | * |
| | ** | ** | ** | ** | ** | ** |
| 2 и т. д. | * | * | * | * | * | * |
| | ** | ** | ** | ** | ** | ** |

* Параметры, определенные по диаграмме.

**Параметры, определенные по таблицам или полученные расчетом.

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра:

| № варианта | Хладагент | Температура, $^\circ\text{C}$ | | | |
|------------|-----------|-------------------------------|-------|-------|-------|
| | | t_0 | t_k | t_1 | t_5 |
| 0 | Аммиак | -30 | 10 | -20 | 5 |
| 1 | Аммиак | -20 | 20 | -10 | 15 |
| 2 | Аммиак | -10 | 30 | 0 | 25 |
| 3 | Аммиак | 0 | 40 | 10 | 35 |
| 4 | Аммиак | -10 | 20 | -5 | 15 |
| 5 | R22 | -40 | 10 | -30 | 5 |
| 6 | R22 | -30 | 20 | -20 | 15 |
| 7 | R22 | -20 | 30 | -10 | 25 |
| 8 | R22 | -10 | 40 | 0 | 35 |
| 9 | R22 | 0 | 50 | 10 | 45 |

Задача 4. Влажный воздух состояния 1 и массой сухого воздуха M охлаждается сначала до температуры точки росы (состояние 2), затем до температуры t_3 (состояние 3). Далее (после отвода конденсата) насыщенный влажный воздух состояния 3 нагревается до первоначальной температуры t_1 (состояние 4).

Определить параметры влажного воздуха: парциальное давление водяного пара, давление насыщения при заданной температуре, относительную влажность, влагосодержание, удельную энтальпию, степень насыщения ($p_n, p_n, \phi, d, h, \psi$) всех названных состояний, а также теплоту, подведенную к воздуху при нагревании и отведенную при охлаждении.

Параметры воздуха определить двумя способами: 1) с помощью диаграммы $h-d$; 2) расчетом по формулам для влажного воздуха с использованием таблиц термодинамических свойств водяного пара и насыщенного влажного воздуха. Решение сопроводить пояснениями. Процессы нагревания и охлаждения изобразить в диаграмме $h-d$ (без масштаба). Давление атмосферного воздуха принять равным давлению, для которого построена диаграмма $h-d$.

Параметры влажного воздуха свести в таблицу:

| № точки | $t, ^\circ\text{C}$ | $p_n, \text{Па}$ | $p_n, \text{Па}$ | $\phi, \%$ | $d, \text{кг/кг с.в.}$ | $h, \text{кДж/кг}$ | ψ |
|--------------|---------------------|------------------|------------------|------------|------------------------|--------------------|--------|
| 1 | | * | | | * | * | |
| | | ** | ** | | ** | ** | |
| 2 и т. д. | | * | * | * | * | * | |
| | | ** | ** | ** | ** | ** | |

*Параметры, определенные по диаграмме.

**Параметры, определенные расчетом.

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра:

| Параметры | № варианта | | | | | | | | | |
|-----------------------|------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| $t_1, ^\circ\text{C}$ | 35 | 30 | 30 | 25 | 25 | 20 | 20 | 18 | 18 | 35 |
| $\phi_1, \%$ | 70 | 50 | 70 | 55 | 75 | 70 | 85 | 60 | 85 | 60 |
| $t_3, ^\circ\text{C}$ | 18 | 14 | 20 | 10 | 18 | 10 | 12 | 10 | 12 | 22 |
| $M, \text{кг}$ | 50 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 |

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА ПО ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ

Задача 1. Стена камеры холодильника, выполненная из слоя кирпича толщиной δ_2 и слоя изоляции толщиной δ_3 , с двух сторон покрыта слоем штукатурки толщиной $\delta_1 = \delta_4 = 20$ мм.

Температура наружного воздуха $t_{в1}$, в камере $t_{в2}$. Коэффициент теплоотдачи от наружного воздуха к поверхности стены α_1 , от внутренней поверхности стены к воздуху в камере α_2 .

Определить общее и частные термические сопротивления, коэффициент теплопередачи, плотность теплового потока и количество теплоты, проходящее через стенку высотой 4 м и длиной 8 м в течение суток. Определить также температуры поверхностей всех слоев и построить график распределения температур по толщине стенки (без масштаба).

Коэффициенты теплопроводности материалов стенки приведены в таблице:

| Коэффициент теплопроводности материалов λ , Вт/(м·К) | | | | | | |
|--|------------|-----------------|---------------|----------------------|------------------|---------------|
| Кирпич | Штукатурка | Пробковая плита | Стекло-войлок | Минераловатная плита | Войлок шерстяной | Шлаковая вата |
| 0,640 | 0,750 | 0,050 | 0,040 | 0,093 | 0,058 | 0,047 |

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра:

| Параметры | № варианта | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|-----------------|-----|---------------|-----|----------------------|-----|------------------|-----|---------------|-----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| δ_2 , мм | 500 | 380 | 250 | 500 | 380 | 250 | 500 | 380 | 250 | 500 |
| δ_3 , мм | 150 | 200 | 250 | 300 | 150 | 200 | 250 | 150 | 200 | 250 |
| α_1 , Вт/(м ² ·К) | 20 | 18 | 15 | 12 | 20 | 18 | 15 | 12 | 20 | 18 |
| α_2 , Вт/(м ² ·К) | 7 | 9 | 10 | 7 | 9 | 10 | 7 | 9 | 10 | 7 |
| Тип изоляции | Пробковая плита | | Стекло-войлок | | Минераловатная плита | | Войлок шерстяной | | Шлаковая вата | |
| $t_{в1}$, °С | 5 | 7 | 10 | 12 | 15 | 17 | 20 | 22 | 25 | 30 |
| $t_{в2}$, °С | -10 | -12 | -14 | -16 | -18 | -20 | -10 | -12 | -14 | -16 |

Задача 2. Внутри стального трубопровода, наружный диаметр которого $d_{\text{нар}}$, а толщина стенки $\delta_{\text{ст}}$, движется жидкость (хладоноситель) с температурой $t_{\text{ж1}}$. Трубопровод покрыт изоляцией толщиной $\delta_{\text{из}}$. Снаружи находится воздух, температура которого $t_{\text{ж2}}$. Коэффициенты теплоотдачи: от воздуха к поверхности изоляции α_2 , от внутренней поверхности трубопровода к хладоносителю α_1 .

Определить: линейный коэффициент теплопередачи; плотность теплового потока от воздуха к хладоносителю, отнесенную к 1 м длины трубопровода и к 1 м² наружной поверхности изоляции; температуры на наружной и внутренней поверхностях изоляции. Вычислить теплоприток от воздуха к хладоносителю за время τ , если длина трубопровода L .

Коэффициенты теплопроводности стали $\lambda_{\text{ст}} = 45$ Вт/(м·К), изоляции $\lambda_{\text{из}}$. Изобразить распределение температур в трубопроводе (без масштаба).

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра:

| № варианта | $d_{\text{нар}}$, мм | $\delta_{\text{ст}}$, мм | $t_{\text{ж1}}$, °С | $\delta_{\text{из}}$, мм | α_1 , Вт/(м ² ·К) | α_2 , Вт/(м ² ·К) | $t_{\text{ж2}}$, °С | $\lambda_{\text{из}}$, Вт/(м·К) | L , м | τ , ч |
|------------|-----------------------|---------------------------|----------------------|---------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|----------------------------------|---------|------------|
| 0 | 30 | 1,5 | -5 | 10 | 1000 | 5 | 5 | 0,035 | 4 | 2 |
| 1 | 36 | 1,5 | -10 | 15 | 1500 | 8 | 10 | 0,029 | 5 | 3 |
| 2 | 42 | 2,0 | -15 | 20 | 2000 | 10 | 15 | 0,047 | 6 | 4 |
| 3 | 52 | 2,0 | -20 | 25 | 1500 | 10 | 20 | 0,064 | 7 | 5 |
| 4 | 56 | 2,5 | -25 | 30 | 1000 | 8 | 25 | 0,076 | 8 | 2 |
| 5 | 30 | 1,5 | -5 | 10 | 800 | 6 | 20 | 0,035 | 7 | 3 |
| 6 | 36 | 1,5 | -10 | 15 | 1000 | 5 | 15 | 0,029 | 6 | 2 |
| 7 | 42 | 2,0 | -15 | 20 | 1500 | 10 | 10 | 0,047 | 5 | 3 |
| 8 | 52 | 2,0 | -20 | 25 | 2000 | 8 | 5 | 0,064 | 4 | 2 |
| 9 | 56 | 2,5 | -25 | 30 | 1000 | 10 | 25 | 0,076 | 3 | 1 |

Задача 3. Для увеличения теплового потока от воздуха к движущемуся внутри труб хладоносителю воздухоохладитель скомпонован из оребренных горизонтальных труб, наружный диаметр которых $d_{\text{нар}} = 20$ мм, толщина стенки $\delta_{\text{ст}} = 1,5$ мм.

Ребра прямые круглые высотой $h_{\text{р}}$, толщиной $\delta_{\text{р}}$, шаг ребер $S_{\text{р}}$. Коэффициент теплопроводности материала труб и ребер $\lambda_{\text{ст}}$. Коэф-

коэффициент теплоотдачи от воздуха к поверхности ребер и межреберных участков α_p , от внутренней поверхности трубы к хладагенту α_1 .

Определить коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи, приведенные к полной (оребреной) поверхности. Найти, во сколько раз увеличится тепловой поток через оребренную трубу по сравнению с неоребреной. При определении коэффициента эффективности ребра по формуле $E = th(mh'_p)/(mh'_p)$ условную (приведенную) высоту ребра рассчитать по формуле $h'_p = h_p[1+0,35 \ln (D/d_o)]$, где D – диаметр ребра.

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра:

| № варианта | h_p , мм | δ_p , мм | S_p , мм | $\lambda_{ст}$, Вт/(м·К) | α_p , Вт/(м ² ·К) | α_1 , Вт/(м ² ·К) |
|------------|------------|-----------------|------------|---------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 0 | 10 | 0,5 | 4 | 40 | 6 | 500 |
| 1 | 12 | 0,6 | 5 | 45 | 7 | 600 |
| 2 | 14 | 0,7 | 6 | 108 | 8 | 700 |
| 3 | 16 | 0,8 | 7 | 200 | 9 | 800 |
| 4 | 18 | 1,0 | 8 | 390 | 10 | 900 |
| 5 | 10 | 1,0 | 4 | 390 | 30 | 900 |
| 6 | 12 | 0,8 | 5 | 200 | 40 | 500 |
| 7 | 14 | 0,7 | 6 | 108 | 50 | 600 |
| 8 | 16 | 0,6 | 7 | 45 | 60 | 700 |
| 9 | 18 | 0,5 | 8 | 40 | 70 | 600 |

Задача 4. Для обогрева воздуха в помещении используется настенный нагреватель высотой h и длиной l . Температура воздуха в помещении $t_{ж}$, температура наружной поверхности нагревателя $t_{ст}$. Нагреватель изготовлен из чугуна, степень черноты поверхности нагревателя $\varepsilon = 0,64$. Определить конвективный Q_k , лучистый Q_l , а также полный Q тепловые потоки от поверхности нагревателя к воздуху.

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра:

| Параметры | № варианта | | | | | | | | | |
|---------------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| h , м | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2,0 |
| l , м | 1,2 | 1,0 | 0,8 | 1,2 | 1,0 | 0,8 | 1,2 | 1,0 | 0,8 | 1,2 |
| $t_{ж}$, °С | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 |
| $t_{ст}$, °С | 70 | 65 | 60 | 55 | 50 | 70 | 65 | 60 | 55 | 50 |

КУРСОВАЯ РАБОТА

Холодильный агент кипит (конденсируется) при температуре насыщения t_n на трубах теплообменных аппаратов. Внутри трубы испарителя (конденсатора) движется хладоноситель – водный раствор NaCl или CaCl₂ (вода) со скоростью W . Температура хладоносителя (воды) на входе в аппарат t_1 , на выходе t_2 . Тепловая нагрузка аппарата $Q = 0,3$ МВт.

Определить средний логарифмический температурный напор, коэффициенты теплоотдачи со стороны холодильного агента и хладоносителя (воды в конденсаторе), плотность теплового потока, коэффициент теплопередачи и площадь теплопередающей поверхности испарителя (конденсатора).

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра.

| Параметры | № варианта | | | | | | | | | |
|------------------------|-------------|-----|------|-----|-------|--------------|--------|---------------------------|-----|-----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Тип аппарата | Конденсатор | | | | | Испаритель | | | | |
| Хладоноситель | Вода | | | | | Раствор NaCl | | Раствор CaCl ₂ | | |
| W , м/с | 2,2 | 1,7 | 1,4 | 1,5 | 1,3 | 2,2 | 1,6 | 2,2 | 2,5 | 3,2 |
| t_1 , °С | 22 | 32 | 12 | 22 | 30 | -12 | -2 | -23 | -13 | -3 |
| t_2 , °С | 24 | 34 | 14 | 24 | 34 | -15 | -5 | -25 | -15 | -5 |
| Холодильный агент | Аммиак | | R22 | | | | Аммиак | | | |
| t_n , °С | 30 | 40 | 20 | 30 | 40 | -20 | -10 | -30 | -20 | -10 |
| Материал труб | Сталь | | Медь | | Сталь | Медь | | Сталь | | |
| $d \times \delta$, мм | 20×2 | | 16×1 | | 22×2 | 15×1,5 | | 30×2,5 | | |

- Для студентов 2-го курса направления 14.03.01 по дисциплине «Термодинамика»

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА ПО ТЕРМОДИНАМИКЕ № 1

Задача 1. Газ сжимается в компрессоре по политропе с показателем n . В начальном состоянии давление газа p_1 и температура t_1 , в конечном состоянии давление p_2 . Масса газа $M = 10$ кг.

Определить параметры газа в начальном и конечном состояниях, работу и теплоту процесса, изменение внутренней энергии и энтропии. Найти работу компрессора в адиабатном, политропном и изотермическом процессах.

Принять показатель адиабаты $k = 1,4$; среднюю массовую изохорную теплоемкость $C_v = 0,723$ кДж/(кг·К). Для определения удельной газовой постоянной использовать уравнение Майера.

Изобразить политропный процесс в $p-v$ и $T-s$ -координатах (без масштаба). На этих же рисунках показать также изобарный, изотермический, адиабатный и изохорный процессы, имеющие начальное состояние в точке 1.

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра:

| Параметры | № варианта | | | | | | | | | |
|-------------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| n | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,1 |
| p_1 , бар | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1,7 |
| t_1 , °С | 50 | 40 | 30 | 20 | 10 | 0 | -10 | -20 | -30 | -40 |
| p_2 , бар | 1,5 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,4 | 2,8 | 2,9 | 3,1 | 3,2 |

Задача 2. Температура воздуха, поступающего в компрессор воздушной холодильной машины (ВХМ), t_1 ; давление p_1 . Давление воздуха, поступающего в детандер, p_2 ; температура t_3 . Массовый расход воздуха $M = 0,1$ кг/с.

Определить параметры узловых точек цикла, теплоту и работу каждого процесса, а также цикла в целом, холодильный коэффициент и холодопроизводительность ВХМ. Сравнить цикл ВХМ с обратным обратимым циклом Карно, осуществляемым в том же интервале температур источников t_1 и t_3 , определив его холодильный коэффициент.

Изобразить схему установки и цикл ВХМ в диаграммах $p-v$, $T-s$. Совместно с циклом ВХМ изобразить цикл Карно.

Для расчета показателя адиабаты k использовать уравнение Майера. Средняя массовая изохорная теплоемкость воздуха $C_v = 0,723$ кДж/(кг·К), удельная газовая постоянная $R = 287$ Дж/(кг·К).

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра:

| Параметры | № варианта | | | | | | | | | |
|-----------------------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| $t_1, ^\circ\text{C}$ | -40 | -35 | -30 | -25 | -20 | -15 | -10 | 0 | -5 | -10 |
| $p_1, \text{бар}$ | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,3 | 1,2 | 1,1 |
| $p_2, \text{бар}$ | 2,5 | 2,6 | 2,8 | 3,0 | 3,2 | 3,4 | 3,6 | 3,4 | 3,2 | 3,0 |
| $t_3, ^\circ\text{C}$ | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 14 | 12 | 10 | 8 |

Задача 3. Рабочее вещество – реальный газ. В начальном состоянии заданы параметры: давление p_1 и удельный объем v_1 . В результате термодинамического процесса давление в конечном состоянии стало p_2 .

Определить термодинамическое состояние рабочего вещества в начале и конце процесса, а также его параметры: 1) с помощью таблиц (или расчетом); 2) независимо – с помощью диаграмм для данного вещества.

Изобразить процесс в диаграммах $p-v$, $T-s$, $\ln p-h$. Рассчитать и показать, где возможно, на диаграммах удельную теплоту, работу и изменение внутренней энергии в процессе.

Данные о параметрах свести в таблицу:

| № точки | $t, ^\circ\text{C}$ | $p, \text{МПа}$ | $v, \text{м}^3/\text{кг}$ | $h, \text{кДж/кг}$ | $s, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ | x |
|---------|---------------------|-----------------|---------------------------|--------------------|--|-----|
| 1 | * | p_1 | v_1 | * | * | * |
| | ** | | | ** | ** | ** |
| 2 | * | p_2 | * | * | * | * |
| | ** | | ** | ** | ** | ** |

*Параметры, определенные по диаграмме.

**Параметры, определенные по таблицам или полученные расчетом.

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра:

| № варианта | Рабочее вещество | p_1 , МПа | v_1 , м ³ /кг | Процесс | p_2 , МПа |
|------------|------------------|-------------|----------------------------|----------------|-------------|
| 0 | Вода | 0,20 | 0,15 | Изотермический | 0,05 |
| 1 | Вода | 0,25 | 0,14 | Изотермический | 0,10 |
| 2 | Вода | 0,30 | 0,12 | Изохорный | 2,00 |
| 3 | Аммиак | 0,05 | 0,20 | Изотермический | 0,02 |
| 4 | Аммиак | 0,08 | 0,15 | Адиабатный | 0,04 |
| 5 | Аммиак | 0,12 | 0,12 | Изохорный | 1,20 |
| 6 | R22 | 0,10 | 0,03 | Изотермический | 0,04 |
| 7 | R22 | 0,12 | 0,12 | Адиабатный | 0,80 |
| 8 | R22 | 0,15 | 0,05 | Изохорный | 0,60 |
| 9 | R22 | 0,06 | 0,30 | Адиабатный | 2,00 |

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА ПО ТЕРМОДИНАМИКЕ № 2

Задача 1. Паросиловая установка (ПСУ) работает по циклу Ренкина. В турбину поступает водяной пар с температурой t_1 и давлением p_1 . На выходе из турбины давление p_2 , расход пара $M = 10$ кг/с.

Определить параметры (p, t, v, h, s, x) узловых точек цикла, подведенную и отведенную теплоту, работу цикла, термический коэффициент полезного действия и мощность установки.

Изобразить схему установки и цикл в диаграммах $p-v$, $T-s$ и $h-s$; показать графически теплоту и работу цикла. Параметры узловых точек определить двумя способами: 1) с помощью диаграммы; 2) по таблицам термодинамических свойств холодильного агента (или путем расчета, когда это необходимо).

Параметры точек цикла свести в таблицу.

| № точки | t , °С | p , МПа | v , м ³ /кг | h , кДж/кг | s , кДж/(кг·К) | x |
|--------------|----------|-----------|--------------------------|--------------|------------------|-----|
| 1 | * | * | * | * | * | * |
| | ** | ** | ** | ** | ** | ** |
| 2 и т. д. | * | * | * | * | * | * |
| | ** | ** | ** | ** | ** | ** |

*Параметры, определенные по диаграмме.

**Параметры, определенные по таблицам или полученные расчетом.

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра:

| Параметры | № варианта | | | | | | | | | |
|-------------|------------|-----|------|-----|------|------|------|------|------|------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| p_1 , МПа | 2,0 | 2,0 | 3,0 | 5,0 | 5,0 | 5,0 | 4,0 | 3,5 | 3,0 | 2,5 |
| t_1 , °С | 400 | 450 | 400 | 400 | 500 | 550 | 500 | 450 | 400 | 400 |
| p_2 , МПа | 0,1 | 0,1 | 0,05 | 0,1 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,01 |

Задача 2. Паровая компрессионная холодильная машина работает по циклу с дросселированием, перегревом перед компрессором и переохлаждением после конденсатора. Температура кипения хладагента в испарителе - t_0 . В компрессор поступает холодильный агент в состоянии перегретого пара с температурой t_1 . Температура конденсации хладагента в конденсаторе t_k . Хладагент перед дросселированием (регулирующим вентилем) охлаждается до температуры t_5 .

Определить параметры: давление, температуру, удельный объем, удельную энтальпию, удельную энтропию, степень сухости (p , t , v , h , s , x) узловых точек цикла, подведенную и отведенную теплоту, работу, теоретическую мощность привода компрессора, полную холодопроизводительность и холодильный коэффициент, если массовый расход циркулирующего хладагента $M = 0,2$ кг/с.

Изобразить схему установки, представить цикл в координатах $p-v$, $T-s$ и $\ln p-h$. Параметры узловых точек определить двумя способами: 1) с помощью диаграммы; 2) по таблицам термодинамических свойств холодильного агента (или путем расчета, когда это необходимо). Параметры ненасыщенной переохлажденной жидкости после конденсатора (кроме давления) определить условно по таблицам для насыщенной жидкости по температуре переохлаждения t_5 .

Параметры точек цикла свести в таблицу:

| № точки | t , °С | p , МПа | v , м ³ /кг | h , кДж/кг | s , кДж/(кг·К) | x |
|--------------|----------|-----------|--------------------------|--------------|------------------|-----|
| 1 | * | * | * | * | * | * |
| | ** | ** | ** | ** | ** | ** |
| 2 и т. д. | * | * | * | * | * | * |
| | ** | ** | ** | ** | ** | ** |

*Параметры, определенные по диаграмме.

**Параметры, определенные по таблицам или полученные расчетом.

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра:

| № варианта | Хладагент | Температура, °С | | | |
|------------|-----------|-----------------|-------|-------|-------|
| | | t_0 | t_k | t_1 | t_5 |
| 0 | Аммиак | -30 | 10 | -20 | 5 |
| 1 | Аммиак | -20 | 20 | -10 | 15 |
| 2 | Аммиак | -10 | 30 | 0 | 25 |
| 3 | Аммиак | 0 | 40 | 10 | 35 |
| 4 | Аммиак | -10 | 20 | -5 | 15 |
| 5 | R22 | -40 | 10 | -30 | 5 |
| 6 | R22 | -30 | 20 | -20 | 15 |
| 7 | R22 | -20 | 30 | -10 | 25 |
| 8 | R22 | -10 | 40 | 0 | 35 |
| 9 | R22 | 0 | 50 | 10 | 45 |

Задача 3. Влажный воздух состояния 1 и массой сухого воздуха M охлаждается сначала до температуры точки росы (состояние 2), затем до температуры t_3 (состояние 3). Далее (после отвода конденсата) насыщенный влажный воздух состояния 3 нагревается до первоначальной температуры t_1 (состояние 4).

Определить параметры влажного воздуха: парциальное давление водяного пара, давление насыщения при заданной температуре, относительную влажность, влагосодержание, удельную энтальпию, степень насыщения ($p_p, p_n, \phi, d, h, \psi$) всех названных состояний, а также теплоту, подведенную к воздуху при нагревании и отведенную при охлаждении.

Параметры воздуха определить двумя способами: 1) с помощью диаграммы $h-d$; 2) расчетом по формулам для влажного воздуха с использованием таблиц термодинамических свойств водяного пара и насыщенного влажного воздуха. Решение сопроводить пояснениями. Процессы нагревания и охлаждения изобразить в диаграмме $h-d$ (без масштаба). Давление атмосферного воздуха принять равным давлению, для которого построена диаграмма $h-d$.

Параметры влажного воздуха свести в таблицу:

| № точки | t , °С | p_n , Па | $p_{n'}$, Па | φ , % | d , кг/кг с.в. | h , кДж/кг | ψ |
|--------------|----------|------------|---------------|---------------|------------------|--------------|--------|
| 1 | | * | | | * | * | |
| | | ** | ** | | ** | ** | |
| 2 и т. д. | | * | * | * | * | * | |
| | | ** | ** | ** | ** | ** | |

*Параметры, определенные по диаграмме.

**Параметры, определенные расчетом.

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра:

| Параметры | № варианта | | | | | | | | | |
|-----------------|------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| t_1 , °С | 35 | 30 | 30 | 25 | 25 | 20 | 20 | 18 | 18 | 35 |
| φ_1 , % | 70 | 50 | 70 | 55 | 75 | 70 | 85 | 60 | 85 | 60 |
| t_3 , °С | 18 | 14 | 20 | 10 | 18 | 10 | 12 | 10 | 12 | 22 |
| M , кг | 50 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 |

- Для бакалавров 3-го курса направления 14.03.01 по дисциплине «Тепломассообмен»

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА ПО ТЕПЛОМАССОБМЕНУ № 1

Задача 1. Стена камеры холодильника, выполненная из слоя кирпича толщиной δ_2 и слоя изоляции толщиной δ_3 , с двух сторон покрыта слоем штукатурки толщиной $\delta_1 = \delta_4 = 20$ мм.

Температура наружного воздуха $t_{в1}$, в камере $t_{в2}$. Коэффициент теплоотдачи от наружного воздуха к поверхности стены α_1 , от внутренней поверхности стены к воздуху в камере α_2 .

Определить общее и частные термические сопротивления, коэффициент теплопередачи, плотность теплового потока и количество теплоты, проходящее через стенку высотой 4 м и длиной 8 м в течение суток. Определить также температуры поверхностей всех слоев и построить график распределения температур по толщине стенки (без масштаба).

Коэффициенты теплопроводности материалов стенки приведены в таблице:

| Коэффициент теплопроводности материалов λ , Вт/(м·К) | | | | | | |
|--|------------|-----------------|--------------|----------------------|------------------|---------------|
| Кирпич | Штукатурка | Пробковая плита | Стекловойлок | Минераловатная плита | Войлок шерстяной | Шлаковая вата |
| 0,640 | 0,750 | 0,050 | 0,040 | 0,093 | 0,058 | 0,047 |

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра:

| Параметры | № варианта | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|-----------------|-----|--------------|-----|----------------------|-----|------------------|-----|---------------|-----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| δ_2 , мм | 500 | 380 | 250 | 500 | 380 | 250 | 500 | 380 | 250 | 500 |
| δ_3 , мм | 150 | 200 | 250 | 300 | 150 | 200 | 250 | 150 | 200 | 250 |
| α_1 , Вт/(м ² ·К) | 20 | 18 | 15 | 12 | 20 | 18 | 15 | 12 | 20 | 18 |
| α_2 , Вт/(м ² ·К) | 7 | 9 | 10 | 7 | 9 | 10 | 7 | 9 | 10 | 7 |
| Тип изоляции | Пробковая плита | | Стекловойлок | | Минераловатная плита | | Войлок шерстяной | | Шлаковая вата | |
| $t_{в1}$, °С | 5 | 7 | 10 | 12 | 15 | 17 | 20 | 22 | 25 | 30 |
| $t_{в2}$, °С | -10 | -12 | -14 | -16 | -18 | -20 | -10 | -12 | -14 | -16 |

Задача 2. Внутри стального трубопровода, наружный диаметр которого $d_{нар}$, а толщина стенки $\delta_{ст}$, движется жидкость (хладоноситель) с температурой $t_{ж1}$. Трубопровод покрыт изоляцией толщиной $\delta_{из}$. Снаружи находится воздух, температура которого $t_{ж2}$. Коэффициенты теплоотдачи: от воздуха к поверхности изоляции α_2 , от внутренней поверхности трубопровода к хладоносителю α_1 .

Определить: линейный коэффициент теплопередачи; плотность теплового потока от воздуха к хладоносителю, отнесенную к 1 м длины трубопровода и к 1 м² наружной поверхности изоляции; температуры на наружной и внутренней поверхностях изоляции. Вы-

числить теплоприток от воздуха к хладоносителю за время τ , если длина трубопровода L .

Коэффициенты теплопроводности стали $\lambda_{ст} = 45$ Вт/(м·К), изоляции $\lambda_{из}$. Изобразить распределение температур в трубопроводе (без масштаба).

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра:

| № варианта | $d_{нар}$, мм | $\delta_{ст}$, мм | $t_{ж1}$, °С | $\delta_{из}$, мм | α_1 , Вт/(м ² ·К) | α_2 , Вт/(м ² ·К) | $t_{ж2}$, °С | $\lambda_{из}$, Вт/(м·К) | L , м | τ , ч |
|------------|----------------|--------------------|---------------|--------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------|---------------------------|---------|------------|
| 0 | 30 | 1,5 | -5 | 10 | 1000 | 5 | 5 | 0,035 | 4 | 2 |
| 1 | 36 | 1,5 | -10 | 15 | 1500 | 8 | 10 | 0,029 | 5 | 3 |
| 2 | 42 | 2,0 | -15 | 20 | 2000 | 10 | 15 | 0,047 | 6 | 4 |
| 3 | 52 | 2,0 | -20 | 25 | 1500 | 10 | 20 | 0,064 | 7 | 5 |
| 4 | 56 | 2,5 | -25 | 30 | 1000 | 8 | 25 | 0,076 | 8 | 2 |
| 5 | 30 | 1,5 | -5 | 10 | 800 | 6 | 20 | 0,035 | 7 | 3 |
| 6 | 36 | 1,5 | -10 | 15 | 1000 | 5 | 15 | 0,029 | 6 | 2 |
| 7 | 42 | 2,0 | -15 | 20 | 1500 | 10 | 10 | 0,047 | 5 | 3 |
| 8 | 52 | 2,0 | -20 | 25 | 2000 | 8 | 5 | 0,064 | 4 | 2 |
| 9 | 56 | 2,5 | -25 | 30 | 1000 | 10 | 25 | 0,076 | 3 | 1 |

Задача 3. Внутри стальной трубы, наружный диаметр которой $d_{нар}$ и толщина стенки $\delta_{ст}$, движется трансформаторное масло с температурой $t_{ж1}$. Труба расположена в помещении с температурой $t_{ж2}$. Коэффициент теплоотдачи от масла к внутренней поверхности трубы α_1 , от поверхности трубы к воздуху α_2 . Для снижения тепловых потерь трубу покрывают слоем бетона $\delta_б$.

Определить линейную плотность теплового потока через трубу без бетона и при его наличии. Найти максимальное значение коэффициента теплопроводности такой изоляции, накладываемой на трубу, чтобы при любой ее толщине теплотери были меньше, чем для неизолированной трубы.

Коэффициенты теплопроводности: стали $\lambda_{ст} = 45$ Вт/(м·К), бетона $\lambda_б = 1,3$ Вт/(м·К). Значение коэффициента теплоотдачи α_2 считать постоянным.

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра:

| № варианта | $d_{\text{нар}},$ мм | $\delta_{\text{ст}},$ мм | $\delta_{\text{б}},$ мм | $t_{\text{ж1}},$ °С | $t_{\text{ж2}},$ °С | $\alpha_1,$ Вт/(м ² ·К) | $\alpha_2,$ Вт/(м ² ·К) |
|------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 0 | 30 | 1,5 | 30 | 60 | 10 | 500 | 5 |
| 1 | 36 | 1,5 | 40 | 80 | 15 | 600 | 6 |
| 2 | 42 | 2,0 | 50 | 100 | 20 | 700 | 7 |
| 3 | 52 | 2,0 | 60 | 120 | 25 | 800 | 8 |
| 4 | 56 | 2,5 | 40 | 100 | 10 | 900 | 10 |
| 5 | 30 | 1,5 | 50 | 60 | 10 | 1000 | 5 |
| 6 | 36 | 1,5 | 60 | 80 | 15 | 1100 | 6 |
| 7 | 42 | 2,0 | 60 | 100 | 20 | 1200 | 7 |
| 8 | 52 | 2,0 | 80 | 120 | 25 | 1300 | 8 |
| 9 | 56 | 2,5 | 80 | 100 | 10 | 1400 | 10 |

Задача 4. Стальную пластину ($\lambda_{\text{ст}}=12$ Вт/(м·К), $a_{\text{ст}}=3 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\rho=7850$ кг/м³) толщиной δ с начальной температурой $t_{\text{нач}}$ опускают в ванну с жидким азотом, имеющим постоянную температуру $t_{\text{ж}} = -196$ °С. Коэффициент теплоотдачи от пластины к азоту $\alpha = 200$ Вт/(м²·К).

Считая, что температура пластины изменяется только по толщине, определить температуры поверхности пластины $t_{\text{пов}}$ и ее центральной плоскости $t_{\text{ц}}$ через время τ после начала охлаждения. Найти количество теплоты, которая передаст пластина азоту за это время при массе пластины 1000 кг.

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра.

| Параметры | № варианта | | | | | | | | | |
|----------------------|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| $t_{\text{нач}},$ °С | 20 | 50 | 70 | 100 | 150 | 200 | 20 | 50 | 100 | 150 |
| $\delta,$ мм | 80 | 90 | 100 | 120 | 150 | 200 | 80 | 100 | 150 | 200 |
| $\tau,$ с | 1000 | 1200 | 1500 | 1300 | 1500 | 1700 | 1200 | 1500 | 1800 | 2000 |

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА ПО ТЕПЛОМАСООБМЕНУ № 2

Задача 1. Для увеличения теплового потока от воздуха к движущемуся внутри труб хладоносителю воздухоохладитель скомпонован из оребренных горизонтальных труб, наружный диаметр которых $d_{\text{нар}} = 20$ мм, толщина стенки $\delta_{\text{ст}} = 1,5$ мм.

Ребра прямые круглые высотой h_p , толщиной δ_p , шаг ребер S_p . Коэффициент теплопроводности материала труб и ребер $\lambda_{ст}$. Коэффициент теплоотдачи от воздуха к поверхности ребер и межреберных участков α_p , от внутренней поверхности трубы к хладоносителю α_1 .

Определить коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи, приведенные к полной (оребреной) поверхности. Найти, во сколько раз увеличится тепловой поток через оребреной трубу по сравнению с неоребреной.

При определении коэффициента эффективности ребра по формуле $E = th(mh'_p)/(mh'_p)$ условную (приведенную) высоту ребра считать по формуле $h'_p = h_p[1+0,35 \ln(D/d_0)]$, где D – диаметр ребра.

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра:

| № варианта | h_p , мм | δ_p , мм | S_p , мм | $\lambda_{ст}$, Вт/(м·К) | α_p , Вт/(м ² ·К) | α_1 , Вт/(м ² ·К) |
|------------|------------|-----------------|------------|---------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 0 | 10 | 0,5 | 4 | 40 | 6 | 500 |
| 1 | 12 | 0,6 | 5 | 45 | 7 | 600 |
| 2 | 14 | 0,7 | 6 | 108 | 8 | 700 |
| 3 | 16 | 0,8 | 7 | 200 | 9 | 800 |
| 4 | 18 | 1,0 | 8 | 390 | 10 | 900 |
| 5 | 10 | 1,0 | 4 | 390 | 30 | 900 |
| 6 | 12 | 0,8 | 5 | 200 | 40 | 500 |
| 7 | 14 | 0,7 | 6 | 108 | 50 | 600 |
| 8 | 16 | 0,6 | 7 | 45 | 60 | 700 |
| 9 | 18 | 0,5 | 8 | 40 | 70 | 600 |

Задача 2. Для обогрева воздуха в помещении используется настенный нагреватель высотой h и длиной l . Температура воздуха в помещении $t_{ж}$, температура наружной поверхности нагревателя $t_{ст}$. Нагреватель изготовлен из чугуна, степень черноты поверхности нагревателя $\epsilon = 0,64$.

Определить конвективный Q_k , лучистый Q_l , а также полный Q тепловые потоки от поверхности нагревателя к воздуху.

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра.

| Параметры | № варианта | | | | | | | | | |
|---------------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| h , м | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2,0 |
| l , м | 1,2 | 1,0 | 0,8 | 1,2 | 1,0 | 0,8 | 1,2 | 1,0 | 0,8 | 1,2 |
| $t_{ж}$, °C | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 |
| $t_{ст}$, °C | 70 | 65 | 60 | 55 | 50 | 70 | 65 | 60 | 55 | 50 |

Задача 3. Теплообменник, предназначенный для охлаждения жидкого холодильного агента после конденсации, выполнен в виде двухтрубного аппарата (труба в трубе). Размеры внутренней трубы $d \times \delta$, наружной $d_n \times \delta_n$. По внутренней трубе со скоростью W_B движется охлаждающая вода, в межтрубном кольцевом пространстве со скоростью W_a – холодильный агент. Средняя температура воды t_B , хладагента t_a .

Определить коэффициент теплопередачи от хладагента к воде, применив формулу для плоской стенки.

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра.

| № варианта | Хлад-агент | $d_n \times \delta_n$, мм | $d \times \delta$, мм | W_a , м/с | t_a , °C | t_B , °C | W_B , м/с |
|------------|-----------------|----------------------------|------------------------|-------------|------------|------------|-------------|
| 0 | NH ₃ | 50×2,5 | 30×2,5 | 0,5 | 10 | 5 | 1,0 |
| 1 | R22 | 36×2,0 | 20×2,0 | 0,6 | 15 | 7 | 1,1 |
| 2 | R134a | 36×2,0 | 16×2,0 | 0,7 | 30 | 20 | 1,2 |
| 3 | NH ₃ | 26×1,5 | 14×1,5 | 0,8 | 25 | 15 | 1,3 |
| 4 | R22 | 20×1,5 | 11×1,0 | 0,5 | 30 | 15 | 1,4 |
| 5 | R134a | 50×2,5 | 30×2,5 | 0,6 | 40 | 20 | 1,0 |
| 6 | NH ₃ | 36×2,0 | 20×2,0 | 0,7 | 40 | 25 | 1,1 |
| 7 | R22 | 32×2,0 | 16×2,0 | 0,7 | 45 | 25 | 1,2 |
| 8 | R134a | 14×1,5 | 14×1,5 | 0,5 | 50 | 30 | 1,3 |
| 9 | NH ₃ | 20×1,5 | 11×1,0 | 0,4 | 30 | 15 | 1,4 |

- Для бакалавров 3-го курса и для бакалавров 2-го курса сокращенной формы обучения направления 23.03.03 по дисциплине «Прикладной теплообмен»

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

Задача 1. Газ сжимается в компрессоре по политропе с показателем n . В начальном состоянии давление газа p_1 и температура t_1 , в конечном состоянии давление p_2 . Масса газа $M = 10$ кг.

Определить параметры газа в начальном и конечном состояниях, работу и теплоту процесса, изменение внутренней энергии и энтропии. Найти работу компрессора в адиабатном, политропном и изотермическом процессах.

Принять показатель адиабаты $k = 1,4$; среднюю массовую изохорную теплоемкость $C_v = 0,723$ кДж/(кг·К). Для определения удельной газовой постоянной использовать уравнение Майера.

Изобразить политропный процесс в $p-v$ и $T-s$ -координатах (без масштаба). На этих же рисунках показать также изобарный, изотермический, адиабатный и изохорный процессы, имеющие начальное состояние в точке 1.

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра:

| Параметры | № варианта | | | | | | | | | |
|-------------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| n | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,1 |
| p_1 , бар | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1,7 |
| t_1 , °С | 50 | 40 | 30 | 20 | 10 | 0 | -10 | -20 | -30 | -40 |
| p_2 , бар | 1,5 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,4 | 2,8 | 2,9 | 3,1 | 3,2 |

Задача 2. Паровая компрессионная холодильная машина работает по циклу с дросселированием, перегревом перед компрессором и переохлаждением после конденсатора. Температура кипения хладагента в испарителе - t_0 . В компрессор поступает холодильный агент в состоянии перегретого пара с температурой t_1 . Температура конденсации хладагента в конденсаторе t_k . Хладагент перед дросселированием (регулирующим вентилем) охлаждается до температуры t_5 .

Определить параметры: давление, температуру, удельный объем, удельную энтальпию, удельную энтропию, степень сухости ($p, t,$

v, h, s, x) узловых точек цикла, подведенную и отведенную теплоту, работу, теоретическую мощность привода компрессора, полную холодопроизводительность и холодильный коэффициент, если массовый расход циркулирующего хладагента $M = 0,2$ кг/с.

Изобразить схему установки, представить цикл в координатах $p-v, T-s$ и $\ln p-h$. Параметры узловых точек определить двумя способами: 1) с помощью диаграммы; 2) по таблицам термодинамических свойств холодильного агента (или путем расчета, когда это необходимо). Параметры ненасыщенной переохлажденной жидкости после конденсатора (кроме давления) определить условно по таблицам для насыщенной жидкости по температуре переохлаждения t_5 .

Параметры точек цикла свести в таблицу:

| № точки | $t, ^\circ\text{C}$ | $p, \text{МПа}$ | $v, \text{м}^3/\text{кг}$ | $h, \text{кДж/кг}$ | $s, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ | x |
|--------------|---------------------|-----------------|---------------------------|--------------------|--|-----|
| 1 | * | * | * | * | * | * |
| | ** | ** | ** | ** | ** | ** |
| 2 и т. д. | * | * | * | * | * | * |
| | ** | ** | ** | ** | ** | ** |

*Параметры, определенные по диаграмме.

**Параметры, определенные по таблицам или полученные расчетом.

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра:

| № варианта | Хладагент | Температура, $^\circ\text{C}$ | | | |
|------------|-----------|-------------------------------|-------|-------|-------|
| | | t_0 | t_k | t_1 | t_5 |
| 0 | Аммиак | -30 | 10 | -20 | 5 |
| 1 | Аммиак | -20 | 20 | -10 | 15 |
| 2 | Аммиак | -10 | 30 | 0 | 25 |
| 3 | Аммиак | 0 | 40 | 10 | 35 |
| 4 | Аммиак | -10 | 20 | -5 | 15 |
| 5 | R22 | -40 | 10 | -30 | 5 |
| 6 | R22 | -30 | 20 | -20 | 15 |
| 7 | R22 | -20 | 30 | -10 | 25 |
| 8 | R22 | -10 | 40 | 0 | 35 |
| 9 | R22 | 0 | 50 | 10 | 45 |

Задача 3. Стена камеры холодильника, выполненная из слоя кирпича толщиной δ_2 и слоя изоляции толщиной δ_3 , с двух сторон покрыта слоем штукатурки толщиной $\delta_1 = \delta_4 = 20$ мм. Температура наружного воздуха $t_{в1}$, в камере $t_{в2}$. Коэффициент теплоотдачи от наружного воздуха к поверхности стены α_1 , от внутренней поверхности стены к воздуху в камере α_2 .

Определить общее и частные термические сопротивления, коэффициент теплопередачи, плотность теплового потока и количество теплоты, проходящее через стенку высотой 4 м и длиной 8 м в течение суток. Определить также температуры поверхностей всех слоев и построить график распределения температур по толщине стенки (без масштаба).

Коэффициенты теплопроводности материалов стенки приведены в таблице:

| Коэффициент теплопроводности материалов λ , Вт/(м·К) | | | | | | |
|--|------------|-----------------|---------------|----------------------|------------------|---------------|
| Кирпич | Штукатурка | Пробковая плита | Стекло-войлок | Минераловатная плита | Войлок шерстяной | Шлаковая вата |
| 0,640 | 0,750 | 0,050 | 0,040 | 0,093 | 0,058 | 0,047 |

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра:

| Параметры | № варианта | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|-----------------|-----|---------------|-----|----------------------|-----|------------------|-----|---------------|-----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| δ_2 , мм | 500 | 380 | 250 | 500 | 380 | 250 | 500 | 380 | 250 | 500 |
| δ_3 , мм | 150 | 200 | 250 | 300 | 150 | 200 | 250 | 150 | 200 | 250 |
| α_1 , Вт/(м ² ·К) | 20 | 18 | 15 | 12 | 20 | 18 | 15 | 12 | 20 | 18 |
| α_2 , Вт/(м ² ·К) | 7 | 9 | 10 | 7 | 9 | 10 | 7 | 9 | 10 | 7 |
| Тип изоляции | Пробковая плита | | Стекло-войлок | | Минераловатная плита | | Войлок шерстяной | | Шлаковая вата | |
| $t_{в1}$, °С | 5 | 7 | 10 | 12 | 15 | 17 | 20 | 22 | 25 | 30 |
| $t_{в2}$, °С | -10 | -12 | -14 | -16 | -18 | -20 | -10 | -12 | -14 | -16 |

Задача 4. Внутри стальной трубы, наружный диаметр которой $d_{\text{нар}}$ и толщина стенки $\delta_{\text{ст}}$, движется трансформаторное масло с температурой $t_{\text{ж1}}$. Труба расположена в помещении с температурой $t_{\text{ж2}}$. Коэффициент теплоотдачи от масла к внутренней поверхности трубы α_1 , от поверхности трубы к воздуху α_2 . Для снижения тепловых потерь трубу покрывают слоем бетона $\delta_{\text{б}}$.

Определить линейную плотность теплового потока через трубу без бетона и при его наличии. Найти максимальное значение коэффициента теплопроводности такой изоляции, накладываемой на трубу, чтобы при любой ее толщине теплотери были меньше, чем для неизолированной трубы.

Коэффициенты теплопроводности: стали $\lambda_{\text{ст}} = 45$ Вт/(м·К), бетона $\lambda_{\text{б}} = 1,3$ Вт/(м·К). Значение коэффициента теплоотдачи α_2 считать постоянным.

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра:

| № варианта | $d_{\text{нар}}$, мм | $\delta_{\text{ст}}$, мм | $\delta_{\text{б}}$, мм | $t_{\text{ж1}}$, °С | $t_{\text{ж2}}$, °С | α_1 , Вт/(м ² ·К) | α_2 , Вт/(м ² ·К) |
|------------|-----------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 0 | 30 | 1,5 | 30 | 60 | 10 | 500 | 5 |
| 1 | 36 | 1,5 | 40 | 80 | 15 | 600 | 6 |
| 2 | 42 | 2,0 | 50 | 100 | 20 | 700 | 7 |
| 3 | 52 | 2,0 | 60 | 120 | 25 | 800 | 8 |
| 4 | 56 | 2,5 | 40 | 100 | 10 | 900 | 10 |
| 5 | 30 | 1,5 | 50 | 60 | 10 | 1000 | 5 |
| 6 | 36 | 1,5 | 60 | 80 | 15 | 1100 | 6 |
| 7 | 42 | 2,0 | 60 | 100 | 20 | 1200 | 7 |
| 8 | 52 | 2,0 | 80 | 120 | 25 | 1300 | 8 |
| 9 | 56 | 2,5 | 80 | 100 | 10 | 1400 | 10 |

- Для бакалавров 2-го курса направления 16.03.03 сокращенной формы обучения по дисциплине «Термодинамика и теплопередача»

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

Задача 1. Газ сжимается в компрессоре по политропе с показателем n . В начальном состоянии давление газа p_1 и температура t_1 , в конечном состоянии давление p_2 . Масса газа $M = 10$ кг.

Определить параметры газа в начальном и конечном состояниях, работу и теплоту процесса, изменение внутренней энергии и энтропии. Найти работу компрессора в адиабатном, политропном и изотермическом процессах.

Принять показатель адиабаты $k = 1,4$; среднюю массовую изохорную теплоемкость $C_v = 0,723$ кДж/(кг·К). Для определения удельной газовой постоянной использовать уравнение Майера.

Изобразить политропный процесс в $p-v$ и $T-s$ -координатах (без масштаба). На этих же рисунках показать также изобарный, изотермический, адиабатный и изохорный процессы, имеющие начальное состояние в точке 1.

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра:

| Параметры | № варианта | | | | | | | | | |
|-------------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| n | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,1 |
| p_1 , бар | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1,7 |
| t_1 , °С | 50 | 40 | 30 | 20 | 10 | 0 | -10 | -20 | -30 | -40 |
| p_2 , бар | 1,5 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,4 | 2,8 | 2,9 | 3,1 | 3,2 |

Задача 2. Паровая компрессионная холодильная машина работает по циклу с дросселированием, перегревом перед компрессором и переохлаждением после конденсатора. Температура кипения хладагента в испарителе - t_0 . В компрессор поступает холодильный агент в состоянии перегретого пара с температурой t_1 . Температура конденсации хладагента в конденсаторе t_k . Хладагент перед дросселированием (регулирующим вентилем) охлаждается до температуры t_5 .

Определить параметры: давление, температуру, удельный объем, удельную энтальпию, удельную энтропию, степень сухости ($p, t,$

v, h, s, x) узловых точек цикла, подведенную и отведенную теплоту, работу, теоретическую мощность привода компрессора, полную холодопроизводительность и холодильный коэффициент, если массовый расход циркулирующего хладагента $M = 0,2$ кг/с.

Изобразить схему установки, представить цикл в координатах $p-v, T-s$ и $\ln p-h$. Параметры узловых точек определить двумя способами: 1) с помощью диаграммы; 2) по таблицам термодинамических свойств холодильного агента (или путем расчета, когда это необходимо). Параметры ненасыщенной переохлажденной жидкости после конденсатора (кроме давления) определить условно по таблицам для насыщенной жидкости по температуре переохлаждения t_5 .

Параметры точек цикла свести в таблицу:

| № точки | $t, ^\circ\text{C}$ | $p, \text{МПа}$ | $v, \text{м}^3/\text{кг}$ | $h, \text{кДж/кг}$ | $s, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ | x |
|--------------|---------------------|-----------------|---------------------------|--------------------|--|-----|
| 1 | * | * | * | * | * | * |
| | ** | ** | ** | ** | ** | ** |
| 2 и т. д. | * | * | * | * | * | * |
| | ** | ** | ** | ** | ** | ** |

* Параметры, определенные по диаграмме.

**Параметры, определенные по таблицам или полученные расчетом.

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра:

| № варианта | Хладагент | Температура, $^\circ\text{C}$ | | | |
|------------|-----------|-------------------------------|-------|-------|-------|
| | | t_0 | t_k | t_1 | t_5 |
| 0 | Аммиак | -30 | 10 | -20 | 5 |
| 1 | Аммиак | -20 | 20 | -10 | 15 |
| 2 | Аммиак | -10 | 30 | 0 | 25 |
| 3 | Аммиак | 0 | 40 | 10 | 35 |
| 4 | Аммиак | -10 | 20 | -5 | 15 |
| 5 | R22 | -40 | 10 | -30 | 5 |
| 6 | R22 | -30 | 20 | -20 | 15 |
| 7 | R22 | -20 | 30 | -10 | 25 |
| 8 | R22 | -10 | 40 | 0 | 35 |
| 9 | R22 | 0 | 50 | 10 | 45 |

Задача 3. Стена камеры холодильника, выполненная из слоя кирпича толщиной δ_2 и слоя изоляции толщиной δ_3 , с двух сторон покрыта слоем штукатурки толщиной $\delta_1 = \delta_4 = 20$ мм.

Температура наружного воздуха $t_{в1}$, в камере $t_{в2}$. Коэффициент теплоотдачи от наружного воздуха к поверхности стены α_1 , от внутренней поверхности стены к воздуху в камере α_2 .

Определить общее и частные термические сопротивления, коэффициент теплопередачи, плотность теплового потока и количество теплоты, проходящее через стенку высотой 4 м и длиной 8 м в течение суток. Определить также температуры поверхностей всех слоев и построить график распределения температур по толщине стенки (без масштаба).

Коэффициенты теплопроводности материалов стенки приведены в таблице:

| Коэффициент теплопроводности материалов λ , Вт/(м·К) | | | | | | |
|--|------------|-----------------|--------------|----------------------|------------------|---------------|
| Кирпич | Штукатурка | Пробковая плита | Стекловойлок | Минераловатная плита | Войлок шерстяной | Шлаковая вата |
| 0,640 | 0,750 | 0,050 | 0,040 | 0,093 | 0,058 | 0,047 |

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра:

| Параметры | № варианта | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|-----------------|-----|--------------|-----|----------------------|-----|------------------|-----|---------------|-----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| δ_2 , мм | 500 | 380 | 250 | 500 | 380 | 250 | 500 | 380 | 250 | 500 |
| δ_3 , мм | 150 | 200 | 250 | 300 | 150 | 200 | 250 | 150 | 200 | 250 |
| α_1 , Вт/(м ² ·К) | 20 | 18 | 15 | 12 | 20 | 18 | 15 | 12 | 20 | 18 |
| α_2 , Вт/(м ² ·К) | 7 | 9 | 10 | 7 | 9 | 10 | 7 | 9 | 10 | 7 |
| Тип изоляции | Пробковая плита | | Стекловойлок | | Минераловатная плита | | Войлок шерстяной | | Шлаковая вата | |
| $t_{в1}$, °С | 5 | 7 | 10 | 12 | 15 | 17 | 20 | 22 | 25 | 30 |
| $t_{в2}$, °С | -10 | -12 | -14 | -16 | -18 | -20 | -10 | -12 | -14 | -16 |

Задача 4. Внутри стальной трубы, наружный диаметр которой $d_{\text{нар}}$ и толщина стенки $\delta_{\text{ст}}$, движется трансформаторное масло с температурой $t_{\text{ж1}}$. Труба расположена в помещении с температурой $t_{\text{ж2}}$. Коэффициент теплоотдачи от масла к внутренней поверхности трубы α_1 , от поверхности трубы к воздуху α_2 . Для снижения тепловых потерь трубу покрывают слоем бетона $\delta_{\text{б}}$.

Определить линейную плотность теплового потока через трубу без бетона и при его наличии. Найти максимальное значение коэффициента теплопроводности такой изоляции, накладываемой на трубу, чтобы при любой ее толщине теплотери были меньше, чем для неизолированной трубы.

Коэффициенты теплопроводности: стали $\lambda_{\text{ст}} = 45$ Вт/(м·К), бетона $\lambda_{\text{б}} = 1,3$ Вт/(м·К). Значение коэффициента теплоотдачи α_2 считать постоянным.

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра:

| № варианта | $d_{\text{нар}}$, мм | $\delta_{\text{ст}}$, мм | $\delta_{\text{б}}$, мм | $t_{\text{ж1}}$, °С | $t_{\text{ж2}}$, °С | α_1 , Вт/(м ² ·К) | α_2 , Вт/(м ² ·К) |
|------------|-----------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 0 | 30 | 1,5 | 30 | 60 | 10 | 500 | 5 |
| 1 | 36 | 1,5 | 40 | 80 | 15 | 600 | 6 |
| 2 | 42 | 2,0 | 50 | 100 | 20 | 700 | 7 |
| 3 | 52 | 2,0 | 60 | 120 | 25 | 800 | 8 |
| 4 | 56 | 2,5 | 40 | 100 | 10 | 900 | 10 |
| 5 | 30 | 1,5 | 50 | 60 | 10 | 1000 | 5 |
| 6 | 36 | 1,5 | 60 | 80 | 15 | 1100 | 6 |
| 7 | 42 | 2,0 | 60 | 100 | 20 | 1200 | 7 |
| 8 | 52 | 2,0 | 80 | 120 | 25 | 1300 | 8 |
| 9 | 56 | 2,5 | 80 | 100 | 10 | 1400 | 10 |

КУРСОВАЯ РАБОТА

Холодильный агент кипит (конденсируется) при температуре насыщения t_n на трубах теплообменных аппаратов. Внутри трубы испарителя (конденсатора) движется хладоноситель – водный раствор NaCl или CaCl₂ (вода) со скоростью W . Температура хладоносителя (воды) на входе в аппарат t_1 , на выходе t_2 . Тепловая нагрузка аппарата $Q = 0,3$ МВт.

Определить средний логарифмический температурный напор, коэффициенты теплоотдачи со стороны холодильного агента и хладоносителя (воды в конденсаторе), плотность теплового потока, коэффициент теплопередачи и площадь теплопередающей поверхности испарителя (конденсатора).

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра.

| Параметры | № варианта | | | | | | | | | |
|------------------------|-------------|-----|------|-----|-------|--------------|-----|---------------------------|-----|-----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Тип аппарата | Конденсатор | | | | | Испаритель | | | | |
| Хладоноситель | Вода | | | | | Раствор NaCl | | Раствор CaCl ₂ | | |
| W , м/с | 2,2 | 1,7 | 1,4 | 1,5 | 1,3 | 2,2 | 1,6 | 2,2 | 2,5 | 3,2 |
| t_1 , °С | 22 | 32 | 12 | 22 | 30 | -12 | -2 | -23 | -13 | -3 |
| t_2 , °С | 24 | 34 | 14 | 24 | 34 | -15 | -5 | -25 | -15 | -5 |
| Холодильный агент | Аммиак | | R22 | | | | | Аммиак | | |
| t_n , °С | 30 | 40 | 20 | 30 | 40 | -20 | -10 | -30 | -20 | -10 |
| Материал труб | Сталь | | Медь | | Сталь | Медь | | Сталь | | |
| $d \times \delta$, мм | 20×2 | | 16×1 | | 22×2 | 15×1,5 | | 30×2,5 | | |

П Р И Л О Ж Е Н И Я

П р и л о ж е н и е 1

Термодинамические свойства хладагента R22 на линиях кипения и конденсации

| t_n , °C | p_n , МПа | ρ' , м ³ /кг | ρ'' , м ³ /кг | h' , кДж/кг | h'' , кДж/кг | r , кДж/кг | s' , кДж/(кг·К) | s'' , кДж/(кг·К) |
|---------------|----------------|---------------------------------|----------------------------------|------------------|-------------------|-----------------|----------------------|-----------------------|
| -110 | 0,000729 | 1595 | 0,04655 | 379,0 | 654,0 | 275,0 | 0,4366 | 2,1226 |
| -100 | 0,001990 | 1569 | 0,1198 | 389,7 | 658,8 | 269,1 | 0,5003 | 2,0547 |
| -90 | 0,004779 | 1543 | 0,2726 | 400,4 | 663,7 | 263,3 | 0,5604 | 1,9979 |
| -80 | 0,01033 | 1517 | 0,5603 | 411,1 | 668,5 | 257,4 | 0,6173 | 1,9501 |
| -70 | 0,02042 | 1490 | 1,058 | 421,9 | 673,4 | 251,5 | 0,6716 | 1,9098 |
| -60 | 0,03747 | 1463 | 1,863 | 432,7 | 678,7 | 245,5 | 0,7236 | 1,8755 |
| -50 | 0,06453 | 1435 | 3,092 | 443,6 | 683,0 | 239,4 | 0,7735 | 1,8463 |
| -40 | 0,1053 | 1406 | 4,884 | 454,6 | 687,6 | 233,0 | 0,8216 | 1,8211 |
| -30 | 0,1640 | 1377 | 7,398 | 465,7 | 692,2 | 226,5 | 0,8681 | 1,7994 |
| -20 | 0,2455 | 1347 | 10,82 | 477,0 | 696,5 | 219,5 | 0,9132 | 1,7803 |
| -10 | 0,3550 | 1318 | 14,85 | 488,4 | 700,6 | 212,2 | 0,9571 | 1,7635 |
| 0 | 0,4981 | 1282 | 21,28 | 500,0 | 704,4 | 204,4 | 1,0000 | 1,7484 |
| 10 | 0,6809 | 1248 | 28,87 | 511,8 | 707,9 | 196,1 | 1,0420 | 1,7346 |
| 20 | 0,9097 | 1211 | 38,53 | 523,9 | 711,0 | 187,1 | 1,0834 | 1,7216 |
| 30 | 1,1913 | 1172 | 50,76 | 536,4 | 713,7 | 177,3 | 1,1244 | 1,7091 |
| 40 | 1,5327 | 1130 | 66,25 | 549,3 | 715,7 | 166,4 | 1,1653 | 1,6966 |
| 50 | 1,9418 | 1083 | 86,02 | 562,8 | 716,9 | 154,1 | 1,2067 | 1,6835 |
| 60 | 2,4267 | 1031 | 111,7 | 577,2 | 717,1 | 139,9 | 1,2492 | 1,6690 |

Окончание прил. 1

| $t_H,$ °C | $p_H,$ МПа | $\rho',$ м ³ /кг | $\rho'',$ м ³ /кг | $h',$ кДж/кг | $h'',$ кДж/кг | $r,$ кДж/кг | $s',$ кДж/(кг·К) | $s'',$ кДж/(кг·К) |
|--------------|---------------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------|------------------|----------------|---------------------|----------------------|
| 70 | 2,9970 | 970,2 | 146,3 | 592,85 | 715,68 | 122,83 | 1,2936 | 1,6516 |
| 80 | 3,6640 | 894,1 | 196,2 | 610,46 | 711,55 | 101,09 | 1,3422 | 1,6284 |
| 90 | 4,4424 | 780,3 | 283,1 | 632,44 | 701,17 | 68,73 | 1,4009 | 1,5902 |

Приложение 2

Теплофизические свойства хладагента R22 на линиях кипения и конденсации

| $t,$ °C | $\eta' \cdot 10^6,$ Па·с | $\eta'' \cdot 10^6,$ Па·с | $\nu' \cdot 10^6,$ м ² /с | $\nu'' \cdot 10^6,$ м ² /с | $\lambda' \cdot 10^3,$ Вт/(м·К) | $\lambda'' \cdot 10^3,$ Вт/(м·К) | $a' \cdot 10^6,$ м ² /с | $a'' \cdot 10^6,$ м ² /с | Pr' | Pr'' |
|------------|-----------------------------|------------------------------|---|--|------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|--|-------|-------|
| -40 | 338,7 | 10,19 | 0,2392 | 2,0839 | 115,0 | 6,66 | 0,0722 | 2,3481 | 3,311 | 0,887 |
| -35 | 314,2 | 10,42 | 0,2244 | 1,7251 | 112,6 | 7,01 | 0,0706 | 1,9538 | 3,178 | 0,884 |
| -30 | 294,5 | 10,66 | 0,2127 | 1,4406 | 110,2 | 7,37 | 0,0694 | 1,6380 | 3,061 | 0,879 |
| -25 | 276,8 | 10,90 | 0,2023 | 1,2138 | 107,9 | 7,47 | 0,0684 | 1,3791 | 2,955 | 0,879 |
| -20 | 260,4 | 11,15 | 0,1927 | 1,0305 | 105,5 | 8,12 | 0,0676 | 1,1689 | 2,849 | 0,881 |
| -15 | 245,3 | 11,39 | 0,1838 | 0,8809 | 103,1 | 8,51 | 0,0669 | 0,9958 | 2,746 | 0,884 |
| -10 | 231,4 | 11,66 | 0,1755 | 0,7591 | 100,8 | 8,91 | 0,0662 | 0,8518 | 2,649 | 0,891 |
| -5 | 218,9 | 11,93 | 0,1683 | 0,6580 | 98,4 | 9,32 | 0,0651 | 0,7322 | 2,577 | 0,898 |
| 0 | 208,0 | 12,21 | 0,1621 | 0,5738 | 95,7 | 9,75 | 0,0641 | 0,6320 | 2,528 | 0,907 |
| 5 | 198,2 | 12,48 | 0,1566 | 0,5024 | 93,4 | 10,19 | 0,0630 | 0,5476 | 2,485 | 0,917 |
| 10 | 188,4 | 12,74 | 0,1510 | 0,4420 | 91,2 | 10,65 | 0,0618 | 0,4762 | 2,442 | 0,928 |
| 15 | 179,0 | 13,06 | 0,1456 | 0,3910 | 89,1 | 11,12 | 0,0605 | 0,4151 | 2,405 | 0,942 |

Окончание прил. 2

| $t, \text{ }^\circ\text{C}$ | $\eta' \cdot 10^6, \text{ Па}\cdot\text{с}$ | $\eta'' \cdot 10^6, \text{ Па}\cdot\text{с}$ | $\nu' \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$ | $\nu'' \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$ | $\lambda' \cdot 10^3, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ | $\lambda'' \cdot 10^3, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ | $a' \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$ | $a'' \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$ | Pr' | Pr'' |
|-----------------------------|---|--|---|--|---|--|---------------------------------------|--|--------------|---------------|
| 20 | 170,0 | 13,37 | 0,1404 | 0,3473 | 86,6 | 11,61 | 0,0589 | 0,3628 | 2,380 | 0,957 |
| 25 | 161,0 | 13,69 | 0,1352 | 0,3095 | 84,5 | 12,12 | 0,0574 | 0,3177 | 2,355 | 0,974 |
| 30 | 152,0 | 14,04 | 0,1298 | 0,2771 | 82,4 | 12,66 | 0,0558 | 0,2787 | 2,326 | 0,994 |
| 35 | 143,1 | 14,42 | 0,1244 | 0,2491 | 80,4 | 13,22 | 0,0541 | 0,2442 | 2,294 | 1,019 |
| 40 | 134,2 | 14,83 | 0,1189 | 0,2280 | 78,4 | 13,82 | 0,0524 | 0,2176 | 2,271 | 1,048 |
| 45 | 125,8 | 15,28 | 0,1137 | 0,2030 | 76,1 | 14,45 | 0,0504 | 0,1876 | 2,253 | 1,084 |
| 50 | 118,4 | 15,78 | 0,1094 | 0,1841 | 74,2 | 15,13 | 0,0487 | 0,1632 | 2,247 | 1,128 |
| 55 | 112,4 | 16,34 | 0,1063 | 0,1674 | 72,3 | 15,86 | 0,0468 | 0,1412 | 2,271 | 1,186 |
| 60 | 107,2 | 16,99 | 0,1041 | 0,1526 | 70,3 | 16,66 | 0,0447 | 0,1210 | 2,324 | 1,262 |
| 65 | 101,4 | 17,74 | 0,1013 | 0,1394 | 68,0 | 17,53 | 0,0423 | 0,1021 | 2,393 | 1,366 |
| 70 | 94,7 | 18,63 | 0,0976 | 0,1276 | 65,8 | 18,52 | 0,0396 | 0,0832 | 2,464 | 1,514 |
| 75 | 88,0 | 19,71 | 0,0941 | 0,1169 | 93,4 | 19,65 | 0,0363 | 0,0673 | 2,590 | 1,739 |
| 80 | 83,9 | 21,10 | 0,0903 | 0,1074 | 60,9 | 21,0 | 0,0321 | 0,0508 | 2,812 | 2,116 |
| 85 | 73,1 | 22,80 | 0,0862 | 0,0980 | 57,6 | 22,7 | 0,0261 | 0,0347 | 3,302 | 2,827 |
| 90 | 63,6 | 24,40 | 0,0811 | 0,0892 | 53,3 | 25,0 | 0,0171 | 0,0188 | 4,476 | 4,737 |

Приложение 3

Термодинамические свойства перегретых паров хладагента R22

| t , °C | v , м ³ /кг | h , кДж/кг | s , кДж/(кг·К) | v , м ³ /кг | h , кДж/кг | S , кДж/(кг·К) |
|-------------|-------------------------------------|-----------------|---------------------|-------------------------------------|-----------------|---------------------|
| | $t_H = -80$ °C ($p = 0,0103$ МПа) | | | $t_H = -70$ °C ($p = 0,0204$ МПа) | | |
| -70 | 1,880 | 637,90 | 1,9773 | – | – | – |
| -60 | 1,975 | 679,37 | 2,0035 | 0,994 | 978,95 | 1,9365 |
| -50 | 2,069 | 684,94 | 2,0291 | 1,042 | 684,59 | 1,9624 |
| -40 | 2,164 | 690,63 | 2,0540 | 1,090 | 690,33 | 1,9875 |
| -30 | 2,257 | 696,44 | 2,0784 | 1,138 | 696,17 | 2,021 |
| -20 | 2,351 | 702,36 | 2,1023 | 1,186 | 702,13 | 2,0361 |
| | $t_H = -60$ °C ($p = 0,03747$ МПа) | | | $t_H = -50$ °C ($p = 0,06453$ МПа) | | |
| -55 | 0,5504 | 681,10 | 1,8889 | – | – | – |
| -50 | 0,5637 | 683,98 | 0,9020 | – | – | – |
| -45 | 0,5770 | 686,88 | 1,9140 | 0,3314 | 685,97 | 1,8596 |
| -40 | 0,5903 | 689,81 | 1,9275 | 0,3394 | 688,96 | 1,8725 |
| -35 | 0,6039 | 692,75 | 1,9400 | 0,3473 | 691,97 | 1,8883 |
| -30 | 0,6161 | 695,72 | 1,9523 | 0,3352 | 694,99 | 1,8978 |
| -25 | 0,6301 | 698,71 | 1,9645 | 0,3631 | 698,03 | 1,9102 |
| -20 | 0,6435 | 701,73 | 1,9765 | 0,3709 | 701,09 | 1,9224 |
| -10 | 0,6698 | 707,85 | 2,0002 | 0,3864 | 707,28 | 1,9464 |
| 0 | 0,6959 | 714,07 | 2,0234 | 0,4019 | 713,56 | 1,9698 |
| 10 | – | – | – | 0,4172 | 719,94 | 1,9928 |
| 20 | – | – | – | 0,4325 | 726,42 | 2,0152 |
| 30 | – | – | – | 0,4478 | 733,01 | 2,0373 |
| | $t_H = -40$ °C ($p = 0,1053$ МПа) | | | $t_H = -30$ °C ($p = 0,164$ МПа) | | |
| -35 | 0,2099 | 690,75 | 1,8344 | – | – | – |
| -30 | 0,2149 | 693,86 | 1,8473 | – | – | – |
| -25 | 0,2299 | 696,98 | 1,8600 | 0,1386 | 695,40 | 1,8127 |
| -20 | 0,2148 | 700,11 | 1,8725 | 0,1419 | 698,64 | 1,8256 |
| -15 | 0,2297 | 703,25 | 1,8848 | 0,1452 | 701,88 | 1,8383 |
| -10 | 0,2346 | 706,41 | 1,8969 | 0,1485 | 705,12 | 1,8507 |
| -5 | 0,2395 | 709,59 | 1,9089 | 0,1517 | 708,38 | 1,8630 |
| 0 | 0,2443 | 712,79 | 1,9207 | 0,1549 | 711,65 | 1,8751 |
| 5 | 0,2491 | 716,01 | 1,9324 | 0,1581 | 714,93 | 1,8870 |
| 10 | 0,2539 | 719,25 | 1,9439 | 0,1613 | 718,23 | 1,8987 |
| 20 | 0,2635 | 725,80 | 1,9667 | 0,1675 | 724,88 | 1,9218 |
| 30 | 0,2730 | 732,44 | 1,9889 | 0,1738 | 731,61 | 1,9444 |
| 40 | 0,2822 | 739,18 | 2,0108 | 0,1799 | 738,42 | 1,9664 |
| 50 | 0,2947 | 746,01 | 2,0323 | 0,1860 | 745,32 | 1,9881 |
| 60 | – | – | – | 0,1922 | 752,31 | 2,0094 |

Продолжение прил. 3

| t , °C | v , м ³ /кг | h , кДж/кг | s , кДж/(кг·К) | v , м ³ /кг | h , кДж/кг | S , кДж/(кг·К) |
|-------------|------------------------------------|-----------------|---------------------|-----------------------------------|-----------------|---------------------|
| | $t_H = -20$ °C ($p = 0,2455$ МПа) | | | $t_H = -10$ °C ($p = 0,355$ МПа) | | |
| -15 | 0,09479 | 699,88 | 1,7937 | – | – | – |
| -10 | 0,09709 | 703,26 | 1,8067 | – | – | – |
| -5 | 0,0994 | 706,64 | 1,8194 | 0,06680 | 704,16 | 1,7770 |
| 0 | 0,1016 | 710,01 | 1,8318 | 0,06849 | 707,69 | 1,7909 |
| 5 | 0,1038 | 713,39 | 1,8441 | 0,07013 | 711,22 | 1,8021 |
| 10 | 0,1060 | 716,77 | 1,8562 | 0,07174 | 714,73 | 1,8154 |
| 15 | 0,1082 | 720,17 | 1,8681 | 0,07331 | 718,25 | 0,8277 |
| 20 | 0,1104 | 723,58 | 0,8798 | 0,07491 | 721,76 | 1,8398 |
| 25 | 0,1125 | 726,99 | 1,8913 | 0,07645 | 725,27 | 1,8517 |
| 30 | 0,1147 | 730,43 | 1,9028 | 0,07800 | 728,80 | 1,8634 |
| 40 | 0,1189 | 737,34 | 1,9252 | 0,08104 | 735,87 | 1,8883 |
| 50 | 0,1231 | 744,34 | 1,9472 | 0,08403 | 742,99 | 1,9087 |
| 60 | 0,1273 | 751,40 | 1,9687 | 0,08703 | 750,17 | 1,9306 |
| 70 | 0,1314 | 753,56 | 1,9899 | 0,08993 | 757,42 | 1,9520 |
| 80 | – | – | – | 0,09285 | 764,74 | 1,9731 |
| | $t_H = 0$ °C ($p = 0,4981$ МПа) | | | $t_H = 10$ °C ($p = 0,6809$ МПа) | | |
| 10 | 0,04953 | 711,90 | 1,7754 | – | – | – |
| 15 | 0,05076 | 715,59 | 1,7883 | 0,03564 | 711,91 | 1,7486 |
| 20 | 0,5198 | 719,26 | 1,8009 | 0,03662 | 715,83 | 1,7621 |
| 25 | 0,05316 | 722,92 | 1,8133 | 0,03755 | 719,71 | 1,7752 |
| 30 | 0,05432 | 726,57 | 1,8254 | 0,03849 | 723,55 | 1,7880 |
| 35 | 0,05546 | 730,22 | 1,8374 | 0,03940 | 727,37 | 1,8005 |
| 40 | 0,05659 | 733,87 | 1,8491 | 0,07029 | 731,18 | 1,8127 |
| 45 | 0,05774 | 737,52 | 0,8607 | 0,04117 | 734,97 | 1,8248 |
| 50 | 0,05886 | 741,17 | 1,8721 | 0,04203 | 738,75 | 1,8366 |
| 60 | 0,06105 | 748,51 | 1,8944 | 0,04372 | 746,32 | 1,8596 |
| 70 | 0,06321 | 755,89 | 1,9163 | 0,04539 | 753,89 | 1,8820 |
| 80 | 0,06536 | 763,33 | 1,9376 | 0,04704 | 761,49 | 1,9038 |
| 90 | – | – | – | 0,04864 | 769,13 | 1,9252 |
| | $t_H = 20$ °C ($p = 0,9097$ МПа) | | | $t_H = 30$ °C ($p = 1,1913$ МПа) | | |
| 25 | 0,02676 | 715,28 | 1,7361 | – | – | – |
| 30 | 0,02754 | 719,43 | 1,7499 | – | – | – |
| 35 | 0,02830 | 423,52 | 1,7633 | 0,02037 | 718,22 | 1,7241 |
| 40 | 0,02903 | 727,57 | 1,7763 | 0,02102 | 722,65 | 1,7384 |
| 45 | 0,02975 | 731,57 | 1,7890 | 0,02164 | 726,99 | 1,7521 |
| 50 | 0,03045 | 735,55 | 1,8014 | 0,02224 | 731,26 | 1,7653 |
| 55 | 0,03114 | 739,50 | 1,8135 | 0,02282 | 735,47 | 1,7783 |
| 60 | 0,03182 | 743,43 | 1,8254 | 0,02339 | 739,64 | 1,7910 |

Окончание прил. 3

| t , °C | v , м ³ /кг | h , кДж/кг | s , кДж/(кг·К) | v , м ³ /кг | h , кДж/кг | S , кДж/(кг·К) |
|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------|---------------------|
| 65 | 0,03249 | 747,35 | 1,8331 | 0,02395 | 743,76 | 1,8033 |
| 70 | 0,03314 | 751,27 | 1,8486 | 0,02449 | 747,86 | 1,8153 |
| 80 | 0,03444 | 759,09 | 1,8710 | 0,02555 | 756,01 | 1,8387 |
| 90 | 0,03570 | 766,92 | 1,8929 | 0,02658 | 764,10 | 1,8613 |
| 100 | 0,03694 | 774,78 | 1,9143 | 0,02758 | 772,18 | 1,8833 |
| 110 | — | — | — | 0,02856 | 780,27 | 1,9046 |
| $t_H = 40$ °C ($p = 1,5327$ МПа) | | | $t_H = 50$ °C ($p = 1,7283$ МПа) | | | |
| 45 | 0,01568 | 720,64 | 1,7124 | — | — | — |
| 50 | 0,01623 | 725,41 | 1,7273 | — | — | — |
| 55 | 0,01675 | 730,05 | 1,7415 | 0,01215 | 722,40 | 1,7004 |
| 60 | 0,01726 | 734,58 | 1,7552 | 0,01263 | 727,60 | 1,7161 |
| 65 | 0,01774 | 739,03 | 1,7685 | 0,01309 | 732,60 | 1,7310 |
| 70 | 0,01821 | 743,41 | 1,7813 | 0,01352 | 737,45 | 1,7453 |
| 75 | 0,01867 | 747,74 | 1,7939 | 0,01394 | 742,17 | 1,7589 |
| 80 | 0,01912 | 752,02 | 1,8061 | 0,01434 | 746,81 | 1,7721 |
| 85 | 0,01956 | 756,27 | 1,8180 | 0,01442 | 751,36 | 1,7850 |
| 90 | 0,01999 | 760,50 | 1,8297 | 0,01510 | 755,85 | 1,7974 |
| 100 | 0,02082 | 768,89 | 1,8526 | 0,01583 | 764,70 | 1,8214 |
| 110 | 0,02164 | 777,24 | 1,8746 | 0,01652 | 773,42 | 1,8445 |
| 120 | 0,02243 | 785,57 | 1,8961 | 0,01719 | 782,06 | 1,8668 |
| 130 | — | — | — | 0,01784 | 790,65 | 1,8883 |
| $t_H = 60$ °C ($p = 2,4267$ МПа) | | | $t_H = 70$ °C ($p = 2,9971$ МПа) | | | |
| 70 | 0,009881 | 729,09 | 1,7045 | — | — | — |
| 75 | 0,01029 | 734,55 | 1,7203 | 0,007326 | 723,08 | 1,6731 |
| 80 | 0,01068 | 739,78 | 1,7353 | 0,007746 | 729,66 | 1,6919 |
| 85 | 0,01104 | 744,85 | 1,7495 | 0,008123 | 735,74 | 1,7090 |
| 90 | 0,01139 | 749,77 | 1,7631 | 0,008474 | 741,48 | 1,7248 |
| 100 | 0,01205 | 759,32 | 1,7891 | 0,009107 | 752,23 | 1,7541 |
| 110 | 0,01266 | 7685,58 | 1,8136 | 0,009690 | 762,36 | 1,7809 |
| 120 | 0,01325 | 777,06 | 1,8370 | 0,01022 | 772,09 | 1,8059 |
| 130 | 0,01382 | 786,61 | 1,8505 | 0,01073 | 781,57 | 1,8297 |
| 140 | 0,01436 | 795,49 | 1,8812 | 0,01121 | 790,87 | 1,8525 |

Приложение 4

Термодинамические свойства аммиака (R717) на линиях кипения и конденсации

| $t_H, ^\circ\text{C}$ | $p_H,$ МПа | $v' \cdot 10^3,$ м ³ /кг | $v'',$ м ³ /кг | $h',$ кДж/кг | $h'',$ кДж/кг | $r,$ кДж/кг | $s',$ кДж/(кг·К) | $s'',$ кДж/(кг·К) |
|-----------------------|---------------|--|------------------------------|-----------------|------------------|----------------|---------------------|----------------------|
| -75 | 0,008774 | 1,368 | 12,853 | 165,72 | 1647,54 | 1481,81 | 0,5740 | 8,0523 |
| -70 | 0,010920 | 1,379 | 9,0253 | 187,50 | 1656,76 | 1469,26 | 0,6826 | 7,9150 |
| -65 | 0,015603 | 1,390 | 6,4641 | 209,33 | 1665,84 | 1456,51 | 0,7887 | 7,7861 |
| -60 | 0,021873 | 1,401 | 4,7103 | 231,20 | 1674,74 | 1443,54 | 0,8925 | 7,6649 |
| -55 | 0,030127 | 1,412 | 3,4916 | 253,13 | 1683,46 | 1430,32 | 0,9941 | 7,5507 |
| -50 | 0,04082 | 1,424 | 2,6288 | 275,13 | 1691,96 | 1416,83 | 1,0938 | 7,4430 |
| -45 | 0,054479 | 1,436 | 2,0072 | 297,20 | 1700,24 | 1403,03 | 1,1915 | 7,3411 |
| -40 | 0,07169 | 1,449 | 1,5530 | 319,36 | 1708,26 | 1388,90 | 1,2874 | 7,2446 |
| -35 | 0,033104 | 1,462 | 1,1662 | 341,59 | 1716,02 | 1374,43 | 1,3816 | 7,1529 |
| -30 | 0,11945 | 1,475 | 0,9634 | 363,91 | 1723,50 | 1359,59 | 1,4742 | 7,0658 |
| -25 | 0,15151 | 1,489 | 0,7710 | 386,32 | 1730,67 | 1344,35 | 1,5653 | 6,9828 |
| -20 | 0,19014 | 1,504 | 0,6230 | 408,83 | 1737,53 | 1328,70 | 1,6548 | 6,9035 |
| -15 | 0,23625 | 1,518 | 0,5081 | 431,45 | 1744,06 | 1312,61 | 1,7431 | 6,8277 |
| -10 | 0,29083 | 1,534 | 0,4179 | 454,18 | 1750,25 | 1296,07 | 1,8299 | 6,7552 |
| -5 | 0,35491 | 1,550 | 0,3463 | 477,02 | 1756,07 | 1279,05 | 1,9156 | 6,6855 |
| 0 | 0,42957 | 1,566 | 0,2890 | 500,00 | 1761,52 | 1261,52 | 2,0000 | 6,6185 |
| 5 | 0,51597 | 1,583 | 0,2428 | 523,12 | 1766,58 | 1243,46 | 2,0834 | 6,5539 |
| 10 | 0,61531 | 1,601 | 0,2052 | 546,4 | 1771,2 | 1224,8 | 2,1658 | 6,4915 |

Окончание прил. 4

| $t_H, ^\circ\text{C}$ | $p_H,$ МПа | $v' \cdot 10^3,$ м ³ /кг | $v'',$ м ³ /кг | $h',$ кДж/кг | $h'',$ кДж/кг | $r,$ кДж/кг | $s',$ кДж/(кг·К) | $s'',$ кДж/(кг·К) |
|-----------------------|---------------|--|------------------------------|-----------------|------------------|----------------|---------------------|----------------------|
| 15 | 0,72881 | 1,619 | 0,1745 | 569,84 | 1775,45 | 1205,61 | 2,2472 | 6,4312 |
| 20 | 0,85777 | 1,639 | 0,1491 | 593,46 | 1779,22 | 1185,76 | 2,3278 | 6,3727 |
| 25 | 1,0035 | 1,659 | 0,1280 | 617,28 | 1782,51 | 1165,23 | 2,4075 | 6,3157 |
| 30 | 1,1675 | 1,680 | 0,1104 | 641,33 | 1785,30 | 1143,97 | 2,4866 | 6,2602 |
| 35 | 1,3510 | 1,702 | 0,09569 | 665,61 | 1787,55 | 1121,94 | 2,5650 | 6,2059 |
| 40 | 1,5555 | 1,726 | 0,08313 | 690,16 | 1789,23 | 1099,07 | 2,6429 | 6,1526 |
| 45 | 1,7826 | 1,751 | 0,07250 | 715,01 | 1790,29 | 1075,28 | 2,7204 | 6,1002 |
| 50 | 2,0337 | 1,777 | 0,06341 | 740,17 | 1790,68 | 1050,51 | 2,7975 | 6,0483 |
| 55 | 2,3106 | 1,804 | 0,05560 | 765,69 | 1790,35 | 1024,66 | 2,8743 | 5,9969 |
| 60 | 2,6147 | 1,834 | 0,04888 | 791,61 | 1789,22 | 997,62 | 2,9510 | 5,9455 |
| 65 | 2,9478 | 1,866 | 0,04303 | 817,96 | 1787,22 | 969,26 | 3,0277 | 5,8941 |
| 70 | 3,3117 | 1,900 | 0,03794 | 844,79 | 1784,24 | 939,45 | 3,1045 | 5,8422 |
| 75 | 3,7081 | 1,937 | 0,03349 | 872,17 | 1780,18 | 908,01 | 3,1815 | 5,7896 |
| 80 | 4,1390 | 1,977 | 0,02957 | 900,17 | 1774,89 | 874,73 | 3,2589 | 5,7358 |
| 90 | 5,1125 | 2,071 | 0,02305 | 958,41 | 1759,91 | 801,50 | 3,4160 | 5,6231 |
| 100 | 6,2497 | 2,189 | 0,01786 | 1020,65 | 1737,28 | 716,63 | 3,5785 | 5,4990 |
| 110 | 7,5715 | 2,349 | 0,01362 | 1089,13 | 1703,34 | 614,21 | 3,7516 | 5,3547 |
| 120 | 9,1042 | 2,594 | 0,01000 | 1169,40 | 1649,62 | 480,21 | 3,9486 | 5,1701 |
| 130 | 10,888 | 3,176 | 0,00636 | 1288,89 | 1537,06 | 248,17 | 4,2357 | 4,8512 |

Приложение 5

**Термодинамические свойства перегретых паров
хладагента R717 (аммиака)**

| t , °C | v , м ³ /кг | h , кДж/кг | s , кДж/(кг·К) | v , м ³ /кг | h , кДж/кг | s , кДж/(кг·К) |
|-------------|-------------------------------------|-----------------|---------------------|-------------------------------------|-----------------|---------------------|
| | $t_H = -70$ °C ($p = 0,01092$ МПа) | | | $t_H = -60$ °C ($p = 0,02187$ МПа) | | |
| -65 | 9,2507 | 1666,90 | 7,9643 | – | – | – |
| -60 | 9,4787 | 1677,04 | 7,0124 | – | – | – |
| -55 | 9,7085 | 1687,18 | 8,0594 | 4,8262 | 1685,07 | 7,7128 |
| -50 | 9,9404 | 1697,33 | 8,1055 | 4,9407 | 1695,38 | 7,7595 |
| -45 | 10,1636 | 1707,49 | 8,1505 | 5,0556 | 1705,69 | 7,8052 |
| -40 | 10,3896 | 1717,66 | 8,1946 | 5,1706 | 1715,99 | 7,8499 |
| -35 | 10,6157 | 1727,85 | 8,2378 | 5,2826 | 1726,30 | 7,8936 |
| -25 | 11,0668 | 1748,26 | 8,3218 | 5,5127 | 1746,93 | 7,9785 |
| -15 | 11,5168 | 1768,76 | 8,4027 | 5,7372 | 1767,61 | 8,0602 |
| -5 | 11,9674 | 1789,35 | 8,4810 | 5,9630 | 1788,35 | 8,1390 |
| 0 | 12,1921 | 1799,69 | 8,5192 | 6,0753 | 1798,75 | 8,1774 |
| 10 | 12,6406 | 1820,45 | 8,5938 | 6,3012 | 1819,63 | 8,2525 |
| 20 | 13,0907 | 1841,33 | 8,6683 | 6,5274 | 1840,61 | 8,3253 |
| 30 | 13,5391 | 1862,35 | 8,7368 | 6,7522 | 1861,71 | 8,3961 |
| 40 | 13,9880 | 1883,52 | 8,8055 | 6,9784 | 1882,94 | 8,4650 |
| 50 | 14,4363 | 1904,83 | 8,8725 | 7,1994 | 1904,32 | 8,5322 |
| | $t_H = -50$ °C ($p = 0,04082$ МПа) | | | $t_H = -40$ °C ($p = 0,07169$ МПа) | | |
| -45 | 2,691 | 1702,5 | 7,490 | – | – | – |
| -40 | 2,754 | 1713,1 | 7,536 | – | – | – |
| -35 | 2,816 | 1723,6 | 7,580 | 1,590 | 1719,2 | 7,291 |
| -30 | 2,878 | 1734,1 | 7,624 | 1,626 | 1730,0 | 7,336 |
| -25 | 2,940 | 1744,6 | 7,667 | 1,662 | 1770,8 | 7,380 |
| -15 | 3,063 | 1765,6 | 7,750 | 1,734 | 1762,3 | 7,465 |
| -5 | 3,186 | 1786,6 | 7,829 | 1,805 | 1783,8 | 7,546 |
| 0 | 3,247 | 1797,1 | 7,866 | 1,840 | 1794,5 | 7,586 |
| 10 | 3,368 | 1818,2 | 7,944 | 1,910 | 1815,9 | 7,663 |
| 20 | 3,490 | 1839,4 | 8,017 | 1,980 | 1837,3 | 7,737 |
| 30 | 3,611 | 1860,6 | 8,089 | 2,050 | 1858,8 | 7,809 |
| 40 | 3,733 | 1882,0 | 8,158 | 2,120 | 1880,3 | 7,879 |
| 50 | 3,854 | 1903,4 | 8,226 | 2,189 | 1902,0 | 7,947 |
| 60 | 3,973 | 1925,0 | 8,291 | 2,258 | 1923,7 | 8,014 |
| 70 | 4,093 | 1946,8 | 8,356 | 2,327 | 1945,6 | 8,078 |
| 80 | – | – | – | 2,396 | 19,67,6 | 8,141 |
| 90 | – | – | – | 2,4641 | 1989,8 | 8,203 |

| t , °C | v , м ³ /кг | h , кДж/кг | s , кДж/(кг·К) | v , м ³ /кг | h , кДж/кг | s , кДж/(кг·К) |
|------------------------------------|-----------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------------------|-----------------|---------------------|
| $t_H = -30$ °C ($p = 0,1194$ МПа) | | | $t_H = -20$ °C ($p = 0,1901$ МПа) | | | |
| -25 | 0,986 | 1734,8 | 7,112 | – | – | – |
| -15 | 1,030 | 1757,2 | 7,200 | 0,638 | 1749,3 | 6,950 |
| -5 | 1,074 | 1779,3 | 7,284 | 0,667 | 1772,5 | 7,038 |
| 0 | 1,096 | 1790,3 | 7,325 | 0,681 | 1784,0 | 7,080 |
| 10 | 1,139 | 1812,2 | 7,404 | 0,709 | 1806,7 | 7,162 |
| 20 | 1,182 | 1834,1 | 7,480 | 0,736 | 1829,3 | 7,240 |
| 30 | 1,234 | 1855,9 | 7,553 | 0,764 | 1851,7 | 7,315 |
| 40 | 1,267 | 1877,8 | 7,624 | 0,790 | 1873,0 | 7,388 |
| 50 | 1,309 | 1899,7 | 7,693 | 0,818 | 1896,3 | 7,458 |
| 60 | 1,351 | 1921,7 | 7,760 | 0,844 | 1919,6 | 7,526 |
| 70 | 1,392 | 1943,7 | 7,825 | 0,871 | 1941,0 | 7,592 |
| 80 | 1,434 | 1965,9 | 7,889 | 0,898 | 1963,4 | 7,656 |
| 90 | 1,476 | 1988,2 | 7,951 | 0,923 | 1985,8 | 7,719 |
| 100 | 1,517 | 2010,7 | 8,051 | 0,950 | 2008,6 | 7,781 |
| 110 | 1,559 | 2033,3 | 8,072 | 0,976 | 2031,3 | 7,841 |
| $t_H = -10$ °C ($p = 0,2908$ МПа) | | | $t_H = 0$ °C ($p = 0,4296$ МПа) | | | |
| -5 | 0,428 | 1762,6 | 6,802 | – | – | – |
| 0 | 0,438 | 1774,8 | 6,847 | – | – | – |
| 5 | 0,447 | 1786,8 | 6890 | 0,296 | 1714,5 | 6,666 |
| 10 | 0,457 | 1798,7 | 6933 | 0,303 | 1787,3 | 6,711 |
| 15 | 0,466 | 1810,5 | 6,974 | 0,310 | 1799,9 | 6,755 |
| 20 | 0,476 | 1822,2 | 7,014 | 0,316 | 1812,3 | 6,798 |
| 25 | 0,485 | 1833,9 | 7,054 | 0,323 | 1824,6 | 6,840 |
| 30 | 0,494 | 1845,5 | 7,092 | 0,329 | 1836,8 | 6,880 |
| 40 | 0,512 | 1868,5 | 7,167 | 0,342 | 1860,8 | 6,958 |
| 50 | 0,530 | 1891,4 | 7,239 | 0,355 | 1884,6 | 7,053 |
| 60 | 0,548 | 1914,2 | 7,309 | 0,367 | 1908,1 | 7,104 |
| 70 | 0,566 | 1937,0 | 7,376 | 0,380 | 1931,5 | 7,174 |
| 80 | 0,583 | 1959,8 | 7,442 | 0,392 | 1954,8 | 7,240 |
| 90 | 0,601 | 1982,6 | 7505 | 0,404 | 1978,0 | 7,303 |
| 100 | 0,618 | 2005,5 | 5,567 | 0,416 | 20001,3 | 7,369 |
| 110 | 0,636 | 2028,5 | 7,628 | 0,428 | 2024,7 | 7,430 |
| 120 | 0,653 | 2051,6 | 7,688 | 0,440 | 2048,0 | 7,491 |
| $t_H = 10$ °C ($p = 0,6153$ МПа) | | | $t_H = 20$ °C ($p = 0,8578$ МПа) | | | |
| 15 | 0,210 | 1785,0 | 6,540 | – | – | – |
| 20 | 0,215 | 1798,5 | 6,586 | – | – | – |
| 25 | 0,220 | 1811,7 | 6,631 | 0,153 | 1793,8 | 6,422 |
| 30 | 0,225 | 1834,7 | 6,674 | 0,157 | 1808,1 | 6,470 |

Продолжение прил. 5

| t , °C | ν , м ³ /кг | h , кДж/кг | s , кДж/(кг·К) | ν , м ³ /кг | h , кДж/кг | s , кДж/(кг·К) |
|--|-------------------------------|-----------------|--|-------------------------------|-----------------|---------------------|
| 35 | 0,230 | 1837,5 | 6,716 | 0,160 | 1822,0 | 6,515 |
| 40 | 0,235 | 1850,2 | 6,757 | 0,164 | 1835,7 | 6,559 |
| 45 | 0,239 | 1862,7 | 6,797 | 0,168 | 1849,1 | 6,602 |
| 50 | 0,244 | 1875,1 | 6,835 | 0,171 | 1862,4 | 6,643 |
| 60 | 0,253 | 1899,7 | 6,910 | 0,178 | 1888,3 | 6,722 |
| 70 | 0,262 | 1923,9 | 6,982 | 0,185 | 1913,7 | 6,797 |
| 80 | 0,271 | 1947,9 | 7,051 | 0,191 | 1938,8 | 6,869 |
| 90 | 0,279 | 1971,8 | 7,117 | 0,198 | 1963,5 | 6,938 |
| 100 | 0,288 | 1995,6 | 7,182 | 0,204 | 1988,1 | 7,005 |
| 110 | 0,296 | 2019,4 | 7,245 | 0,210 | 2012,5 | 7,069 |
| 120 | 0,305 | 2043,2 | 7,306 | 0,217 | 2036,8 | 7,132 |
| 135 | 0,317 | 2079,0 | 7,396 | 0,226 | 2073,2 | 7,223 |
| 150 | 0,330 | 2114,9 | 7,782 | – | – | – |
| 160 | – | – | – | 0,241 | 2134,1 | 7,368 |
| $t_H = 30\text{ °C}$ ($p = 1,1675\text{ МПа}$) | | | $t_H = 40\text{ °C}$ ($p = 1,5555\text{ МПа}$) | | | |
| 35 | 0,0113 | 1800,9 | 6,311 | – | – | – |
| 40 | 0,116 | 1816,1 | 6,360 | – | – | – |
| 45 | 0,119 | 1830,8 | 6,407 | 0,856 | 1806,0 | 6,206 |
| 50 | 0,122 | 1845,2 | 6,452 | 0,0879 | 1822,2 | 6,256 |
| 55 | 0,125 | 1859,4 | 6,495 | 0,0902 | 1837,9 | 6,305 |
| 60 | 0,128 | 1873,2 | 6,537 | 0,0924 | 1853,1 | 6,351 |
| 65 | 0,130 | 1886,9 | 6,578 | 0,0946 | 1868,0 | 6,400 |
| 70 | 0,133 | 1900,3 | 6,617 | 0,0967 | 1882,6 | 6,438 |
| 80 | 0,138 | 1926,7 | 6,693 | 0,101 | 1910,9 | 6,519 |
| 90 | 0,143 | 952,6 | 6,765 | 0,105 | 1938,4 | 6,596 |
| 100 | 0,148 | 1978,1 | 6,835 | 0,109 | 1965,3 | 6,669 |
| 110 | 0,152 | 2003,4 | 6,902 | 0,112 | 1991,7 | 6,739 |
| 120 | 0,158 | 2028,4 | 6,966 | 0,116 | 2017,7 | 6,806 |
| 135 | 0,164 | 2065,8 | 7,059 | 0,122 | 2056,3 | 6,902 |
| 150 | 0,171 | 210,1 | 7,149 | 0,127 | 2094,6 | 6,994 |
| 165 | 0,178 | 2140,3 | 7,235 | 0,132 | 2132,6 | 7,083 |
| $t_H = 50\text{ °C}$ ($p = 2,0337\text{ МПа}$) | | | $t_H = 60\text{ °C}$ ($p = 2,6147\text{ МПа}$) | | | |
| 55 | 0,0654 | 1808,8 | 6,104 | – | – | – |
| 60 | 0,0674 | 1826,2 | 6,157 | – | – | – |
| 65 | 0,0692 | 1843,0 | 6,207 | 0,056 | 1809,0 | 6,005 |
| 70 | 0,0710 | 1859,3 | 6,254 | 0,0522 | 1827,9 | 6,060 |
| 75 | 0,728 | 1875,0 | 6,300 | 0,0538 | 1845,9 | 6,112 |
| 80 | 0,0745 | 1890,3 | 6,344 | 0,0553 | 1863,2 | 6,162 |
| 90 | 0,0778 | 1920,1 | 6,427 | 0,0581 | 1896,3 | 6,254 |

Окончание прил. 5

| t , °C | v , м ³ /кг | h , кДж/кг | s , кДж/(кг·К) | v , м ³ /кг | h , кДж/кг | s , кДж/(кг·К) |
|-------------|-----------------------------|-----------------|---------------------|-----------------------------|-----------------|---------------------|
| 100 | 0,0810 | 1948,8 | 6,505 | 0,0609 | 1927,6 | 6,339 |
| 110 | 0,0840 | 1976,8 | 6,579 | 0,0634 | 1957,7 | 6,418 |
| 120 | 0,0870 | 2004,1 | 6,649 | — | — | — |
| 135 | 0,0914 | 2044,3 | 6,750 | — | — | — |
| 150 | 0,0956 | 2083,8 | 6,845 | — | — | — |
| 165 | 0,0998 | 2123,0 | 6,936 | — | — | — |

Приложение 6

Термодинамические свойства воды и водяного пара (R718) в состоянии насыщения (по температуре)

| $t_H,$ °C | $p_H,$ МПа | $v',$ м ³ /кг | $v'',$ м ³ /кг | $h',$ кДж/кг | $h'',$ кДж/кг | $r,$ кДж/кг | $s',$ кДж/(кг·К) | $s'',$ кДж/(кг·К) |
|--------------|---------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------|------------------|----------------|---------------------|----------------------|
| 0,01 | 0,0006117 | 0,0010002 | 205,997 | 0 | 2500,9 | 2500,9 | 0 | 9,1555 |
| 10 | 0,0012282 | 0,0010003 | 106,309 | 42,02 | 2519,2 | 2477,2 | 0,1511 | 8,8998 |
| 20 | 0,0023392 | 0,0010018 | 57,761 | 83,92 | 2537,5 | 2453,5 | 0,2965 | 8,6661 |
| 30 | 0,0042467 | 0,0010044 | 32,882 | 125,75 | 2555,6 | 2429,8 | 0,4368 | 8,4521 |
| 40 | 0,0073884 | 0,0010079 | 19,517 | 167,54 | 2573,5 | 2406,0 | 0,5724 | 8,2557 |
| 50 | 0,012351 | 0,0010121 | 12,028 | 209,34 | 2591,3 | 2382,0 | 0,7038 | 8,0749 |
| 60 | 0,019946 | 0,0010171 | 7,6677 | 251,15 | 2608,8 | 2357,8 | 0,8312 | 7,9082 |
| 70 | 0,031201 | 0,0010228 | 5,0397 | 293,02 | 2626,1 | 2333,1 | 0,9550 | 7,7540 |
| 80 | 0,047415 | 0,0010290 | 3,4053 | 334,95 | 2643,0 | 2308,1 | 1,0754 | 7,6110 |
| 90 | 0,070182 | 0,0010359 | 2,3591 | 376,97 | 2659,5 | 2282,6 | 1,1927 | 7,4781 |
| 100 | 0,10142 | 0,0010435 | 1,6719 | 419,10 | 2675,6 | 2256,5 | 1,3070 | 7,3541 |
| 110 | 0,14338 | 0,0010516 | 1,2094 | 461,36 | 2691,1 | 2229,7 | 1,4187 | 7,2380 |
| 120 | 0,19867 | 0,0010603 | 0,89130 | 503,8 | 2705,9 | 2202,1 | 1,5278 | 7,1291 |
| 130 | 0,27026 | 0,0010697 | 0,66808 | 546,4 | 2720,1 | 2173,7 | 1,6346 | 7,0264 |
| 140 | 0,36150 | 0,0010798 | 0,50852 | 589,2 | 2733,4 | 2144,2 | 1,7393 | 6,9293 |
| 150 | 0,47610 | 0,0010905 | 0,39250 | 632,3 | 2745,9 | 2113,7 | 1,8420 | 6,8370 |
| 160 | 0,61814 | 0,0011020 | 0,30682 | 675,6 | 2757,4 | 2081,9 | 1,9428 | 6,7491 |
| 170 | 0,97205 | 0,0011143 | 0,24262 | 719,2 | 2767,9 | 2048,7 | 2,0419 | 6,6649 |

Окончание прил. 6

| $t_H,$ °C | $p_H,$ МПа | $v',$ м ³ /кг | $v'',$ м ³ /кг | $h',$ кДж/кг | $h'',$ кДж/кг | $r,$ кДж/кг | $s',$ кДж/(кг·К) | $s'',$ Дж/(кг·К) |
|--------------|---------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------|------------------|----------------|---------------------|---------------------|
| 180 | 1,0026 | 0,0011274 | 0,19386 | 763,2 | 2777,2 | 2014,0 | 2,1395 | 6,5841 |
| 190 | 1,2550 | 0,0011414 | 0,15638 | 807,6 | 2785,3 | 1977,7 | 2,2358 | 6,5060 |
| 200 | 1,5547 | 0,0011565 | 0,12722 | 852,4 | 2792,1 | 1939,7 | 2,3308 | 6,4303 |
| 210 | 1,9074 | 0,0011727 | 0,10430 | 897,7 | 2797,4 | 1899,6 | 2,4248 | 6,3565 |
| 220 | 2,3193 | 0,0011902 | 0,08610 | 943,6 | 2801,1 | 1857,4 | 2,5178 | 6,2842 |
| 230 | 2,7968 | 0,0012090 | 0,07151 | 990,2 | 2803,0 | 1812,8 | 2,6102 | 6,2131 |
| 240 | 3,3467 | 0,0012295 | 0,05971 | 1037,5 | 2803,1 | 1765,5 | 2,7019 | 6,1425 |
| 250 | 3,9759 | 0,0012517 | 0,05009 | 1085,7 | 2801,0 | 1715,3 | 2,7934 | 6,0722 |
| 260 | 4,6921 | 0,0012761 | 0,04218 | 1134,8 | 2796,6 | 1661,8 | 2,8847 | 6,0017 |
| 270 | 5,5028 | 0,0013030 | 0,03562 | 1185,1 | 2789,7 | 1604,6 | 2,9762 | 5,9304 |
| 280 | 6,4165 | 0,0013328 | 0,03015 | 1236,7 | 2779,8 | 1543,2 | 3,0681 | 5,8578 |
| 290 | 7,4416 | 0,0013663 | 0,02556 | 1289,8 | 2766,6 | 1476,8 | 3,1608 | 5,7832 |
| 300 | 8,5877 | 0,0014042 | 0,02166 | 1344,8 | 2749,6 | 1404,8 | 3,2547 | 5,7058 |
| 310 | 9,8647 | 0,0014479 | 0,01834 | 1402,0 | 2727,9 | 1325,9 | 3,3506 | 5,6243 |
| 320 | 11,284 | 0,0014991 | 0,01548 | 1462,1 | 2700,7 | 1238,6 | 3,4491 | 5,5373 |
| 330 | 12,858 | 0,0015606 | 0,01298 | 1525,7 | 2666,2 | 1140,5 | 3,5516 | 5,4425 |
| 340 | 14,600 | 0,0016375 | 0,01078 | 1594,4 | 2622,1 | 1027,6 | 3,6599 | 5,3359 |
| 350 | 16,529 | 0,0017401 | 0,008801 | 1670,9 | 2563,6 | 892,7 | 3,7783 | 5,2109 |
| 360 | 18,666 | 0,0018945 | 0,006946 | 1761,5 | 2481,0 | 719,5 | 3,9164 | 5,0528 |
| 370 | 21,043 | 0,0022220 | 0,004947 | 1892,7 | 2333,6 | 440,9 | 4,1142 | 4,7998 |
| 374,946 | 22,064 | 0,0031061 | 0,003106 | 2087,5 | 2087,5 | 0 | 4,4120 | 4,4120 |

Приложение 7

Теплофизические свойства водного раствора хлористого кальция

| $\xi, \%$ | $t_3, ^\circ\text{C}$ | ρ_{15} кг/м ³ | $t, ^\circ\text{C}$ | $C_p,$ кДж/(кг·К) | $\lambda,$ Вт/(м·К) | $\mu \cdot 10^3,$ Па·с | $\nu \cdot 10^6,$ м ² /с | $a \cdot 10^7,$ м ² /с | Pr |
|-----------|-----------------------|----------------------------------|---------------------|----------------------|------------------------|---------------------------|--|--------------------------------------|------|
| 9,4 | -5,2 | 1080 | 20,0 | 3,642 | 0,584 | 1,236 | 1,15 | 1,48 | 7,78 |
| | | | 10,0 | 3,634 | 0,570 | 1,549 | 1,44 | 1,45 | 9,88 |
| | | | 0,0 | 3,626 | 0,556 | 2,158 | 2,00 | 1,42 | 14,1 |
| | | | -5,0 | 3,601 | 0,549 | 2,548 | 2,36 | 1,41 | 16,7 |
| 14,7 | -10,2 | 1130 | 20,0 | 3,362 | 0,576 | 1,491 | 1,32 | 1,52 | 8,7 |
| | | | 10,0 | 3,349 | 0,563 | 1,863 | 1,64 | 1,49 | 11,0 |
| | | | 0,0 | 3,328 | 0,549 | 2,560 | 2,27 | 1,46 | 15,6 |
| | | | -5,0 | 3,316 | 0,542 | 3,040 | 2,70 | 1,44 | 18,7 |
| | | | -10,0 | 3,308 | 0,534 | 4,060 | 3,60 | 1,43 | 25,3 |
| 18,9 | -15,7 | 1170 | 20,0 | 3,147 | 0,572 | 1,804 | 1,54 | 1,56 | 9,9 |
| | | | 10,0 | 3,140 | 0,558 | 2,236 | 1,91 | 1,52 | 12,6 |
| | | | 0,0 | 3,128 | 0,544 | 2,991 | 2,56 | 1,49 | 17,2 |
| | | | -5,0 | 3,098 | 0,537 | 3,432 | 2,94 | 1,48 | 19,8 |
| | | | -10,0 | 3,086 | 0,529 | 4,668 | 4,00 | 1,47 | 27,3 |
| | | | -15,0 | 3,065 | 0,523 | 6,149 | 5,27 | 1,47 | 35,9 |
| 20,9 | -19,2 | 1190 | 20,0 | 3,077 | 0,569 | 2,001 | 1,68 | 1,55 | 10,9 |
| | | | 10,0 | 3,056 | 0,555 | 2,452 | 2,06 | 1,53 | 13,4 |
| | | | 0,0 | 3,044 | 0,542 | 3,275 | 2,76 | 1,49 | 18,5 |
| | | | -5,0 | 3,014 | 0,535 | 3,825 | 3,22 | 1,49 | 21,5 |

Продолжение прил. 7

| $\xi, \%$ | $t_3, ^\circ\text{C}$ | $\rho_{15,3},$ кг/м ³ | $t, ^\circ\text{C}$ | $C_p,$ кДж/(кг·К) | $\lambda,$ Вт/(м·К) | $\mu \cdot 10^3,$ Па·с | $\nu \cdot 10^6,$ м ² /с | $a \cdot 10^7,$ м ² /с | Pr |
|-----------|-----------------------|-------------------------------------|---------------------|----------------------|------------------------|---------------------------|--|--------------------------------------|------|
| 23,8 | -25,7 | 1220 | 20,0 | 2,973 | 0,565 | 2,354 | 1,94 | 1,56 | 12,5 |
| | | | 10,0 | 2,952 | 0,551 | 2,873 | 2,35 | 1,53 | 15,4 |
| | | | 0,0 | 2,931 | 0,538 | 3,815 | 3,13 | 1,51 | 20,8 |
| | | | -5,0 | 2,910 | 0,530 | 4,413 | 3,63 | 1,49 | 24,4 |
| | | | -10,0 | 2,910 | 0,523 | 5,923 | 4,87 | 1,48 | 33,0 |
| | | | -15,0 | 2,910 | 0,518 | 7,551 | 6,20 | 1,46 | 42,5 |
| | | | -20,0 | 2,889 | 0,510 | 9,473 | 7,77 | 1,44 | 53,8 |
| | | | -25,0 | 2,889 | 0,504 | 11,572 | 9,48 | 1,43 | 66,5 |
| 25,7 | -31,2 | 1240 | 20,0 | 2,889 | 0,562 | 2,628 | 2,12 | 1,57 | 13,5 |
| | | | 10,0 | 2,879 | 0,548 | 3,217 | 2,51 | 1,53 | 16,5 |
| | | | 0,0 | 2,68 | 0,535 | 4,256 | 3,43 | 1,51 | 22,7 |
| | | | -10,0 | 2,847 | 0,521 | 6,678 | 5,40 | 1,48 | 36,6 |
| | | | -15,0 | 2,847 | 0,514 | 8,365 | 6,57 | 1,46 | 46,3 |
| | | | -20,0 | 2,805 | 0,508 | 10,562 | 8,52 | 1,46 | 58,5 |
| | | | -25,0 | 2,805 | 0,501 | 12,905 | 10,40 | 1,44 | 72,0 |
| | | | -30,0 | 2,763 | 0,494 | 14,808 | 12,00 | 1,44 | 83,0 |
| 27,5 | -38,6 | 1260 | 20,0 | 2,847 | 0,558 | 2,932 | 2,33 | 1,56 | 14,9 |
| | | | 10,0 | 2,826 | 0,545 | 3,609 | 2,87 | 1,53 | 18,8 |
| | | | 0,0 | 2,809 | 0,531 | 4,805 | 3,81 | 1,50 | 25,3 |
| | | | -10,0 | 2,784 | 0,519 | 7,522 | 5,97 | 1,48 | 40,3 |

Продолжение прил. 7

| $\xi, \%$ | $t_3, ^\circ\text{C}$ | $\rho_{15},$ кг/м ³ | $t, ^\circ\text{C}$ | $C_p,$ кДж/(кг·К) | $\lambda,$ Вт/(м·К) | $\mu \cdot 10^3,$ Па·с | $\nu \cdot 10^6,$ м ² /с | $a \cdot 10^7,$ м ² /с | Pr |
|-----------|-----------------------|-----------------------------------|---------------------|----------------------|------------------------|---------------------------|--|--------------------------------------|-------|
| 27,5 | -38,61 | 1260 | -20,0 | 2,763 | 0,506 | 11,866 | 9,45 | 1,46 | 65,0 |
| | | | -25,0 | 2,742 | 0,449 | 14,710 | 11,70 | 1,44 | 80,7 |
| | | | -30,0 | 2,742 | 0,492 | 17,161 | 13,60 | 1,42 | 95,5 |
| | | | -35,0 | 2,721 | 0,486 | 21,574 | 17,10 | 1,42 | 120,0 |
| 28,4 | -43,6 | 1270 | 20,0 | 2,805 | 0,557 | 3,138 | 2,47 | 1,56 | 15,8 |
| | | | 0,0 | 2,780 | 0,529 | 5,119 | 4,02 | 1,50 | 26,7 |
| | | | -10,0 | 2,763 | 0,518 | 8,022 | 6,32 | 1,47 | 42,7 |
| | | | -20,0 | 2,721 | 0,505 | 12,651 | 10,00 | 1,45 | 68,8 |
| | | | -25,0 | 2,721 | 0,498 | 15,985 | 12,60 | 1,43 | 87,5 |
| | | | -30,0 | 2,700 | 0,491 | 18,829 | 14,90 | 1,43 | 103,5 |
| | | | -35,0 | 2,700 | 0,484 | 24,517 | 19,30 | 1,41 | 136,5 |
| 29,4 | -50,1 | 1280 | -40,0 | 2,680 | 0,478 | 30,401 | 24,0 | 1,40 | 171,0 |
| | | | 20,0 | 2,805 | 0,555 | 3,403 | 2,65 | 1,55 | 17,2 |
| | | | 0,0 | 2,775 | 0,528 | 5,492 | 4,30 | 1,50 | 28,7 |
| | | | -10,0 | 2,721 | 0,576 | 8,630 | 6,75 | 1,49 | 45,4 |
| | | | -20,0 | 2,680 | 0,504 | 13,827 | 10,8 | 1,47 | 73,4 |
| | | | -30,0 | 2,659 | 0,490 | 21,280 | 16,6 | 1,44 | 115,0 |
| | | | -35,0 | 2,638 | 0,483 | 25,497 | 19,9 | 1,43 | 139,0 |
| | | | -40,0 | 2,638 | 0,447 | 32,362 | 25,3 | 1,42 | 179,0 |
| | | | -45,0 | 2,617 | 0,470 | 40,207 | 31,4 | 1,40 | 223,0 |

Окончание прил. 7

| $\xi, \%$ | $t_3, ^\circ\text{C}$ | $\rho_{15},$ кг/м ³ | $t, ^\circ\text{C}$ | $C_p,$ кДж/(кг·К) | $\lambda,$ Вт/(м·К) | $\mu \cdot 10^3,$ Па·с | $\nu \cdot 10^6,$ м ² /с | $a \cdot 10^7,$ м ² /с | Pr |
|-----------|-----------------------|-----------------------------------|---------------------|----------------------|------------------------|---------------------------|--|--------------------------------------|-------|
| 29,4 | -50,1 | 1280 | -50,0 | 2,617 | 0,464 | 49,033 | 38,3 | 1,30 | 295,0 |
| 29,9 | -55,0 | 1286 | 20,0 | 2,784 | 0,554 | 3,511 | 2,75 | 1,55 | 17,8 |
| | | | 0,0 | 2,738 | 0,528 | 5,688 | 4,43 | 1,50 | 29,5 |
| | | | -10,0 | 2,700 | 0,515 | 9,042 | 7,04 | 1,48 | 47,5 |
| | | | -20,0 | 2,680 | 0,502 | 14,416 | 11,2 | 1,46 | 77,0 |
| | | | -30,0 | 2,659 | 0,488 | 22,555 | 17,6 | 1,43 | 123,0 |
| | | | -35,0 | 2,638 | 0,483 | 28,439 | 22,1 | 1,42 | 156,5 |
| | | | -40,0 | 2,638 | 0,576 | 35,304 | 27,5 | 1,40 | 196,0 |
| | | | -45,0 | 2,617 | 0,470 | 43,149 | 33,5 | 1,39 | 240,0 |
| | | | -50,0 | 2,617 | 0,463 | 50,995 | 39,7 | 1,38 | 290,0 |
| -55,0 | 2,596 | 0,456 | 64,724 | 50,2 | 1,36 | 368,0 | | | |

Приложение 8

Теплофизические свойства сухого воздуха при атмосферном давлении $p = 0,1013$ МПа (760 мм рт. ст.)

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\rho,$ кг/м ³ | $C_p,$ кДж/(кг·К) | $\lambda \cdot 10^2,$ Вт/(м·К) | $a \cdot 10^6,$ м ² /с | $\mu \cdot 10^6,$ Па·с | $\nu \cdot 10^6,$ м ² /с | Pr |
|---------------------|------------------------------|----------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|--|-------|
| -50 | 1,584 | 1,013 | 2,04 | 12,7 | 14,6 | 9,23 | 0,728 |
| -40 | 1,515 | 1,013 | 2,12 | 13,8 | 15,2 | 10,04 | 0,728 |
| -30 | 1,453 | 1,013 | 2,20 | 14,9 | 15,7 | 10,80 | 0,723 |
| -20 | 1,395 | 1,009 | 2,28 | 16,2 | 16,2 | 11,79 | 0,716 |
| -10 | 1,342 | 1,009 | 2,36 | 17,4 | 16,7 | 12,43 | 0,712 |
| 0 | 1,293 | 1,005 | 2,44 | 18,8 | 17,2 | 13,28 | 0,707 |
| 10 | 1,247 | 1,005 | 2,51 | 20,0 | 17,6 | 14,16 | 0,705 |
| 20 | 1,205 | 1,005 | 2,59 | 21,4 | 18,1 | 15,06 | 0,703 |
| 30 | 1,165 | 1,005 | 2,67 | 22,9 | 18,6 | 16,00 | 0,701 |
| 40 | 1,128 | 1,005 | 2,76 | 24,3 | 19,1 | 16,96 | 0,699 |
| 50 | 1,093 | 1,005 | 2,83 | 25,7 | 19,6 | 17,95 | 0,698 |
| 60 | 1,060 | 1,005 | 2,90 | 27,2 | 20,1 | 18,97 | 0,696 |
| 70 | 1,029 | 1,009 | 2,96 | 28,6 | 20,6 | 20,02 | 0,694 |
| 80 | 1,000 | 1,009 | 3,05 | 30,2 | 21,1 | 21,09 | 0,692 |
| 90 | 0,972 | 1,009 | 3,13 | 31,9 | 21,5 | 22,10 | 0,690 |
| 100 | 0,946 | 1,009 | 3,21 | 33,6 | 21,9 | 23,13 | 0,688 |
| 120 | 0,898 | 1,009 | 3,34 | 36,8 | 22,8 | 25,45 | 0,686 |
| 140 | 0,854 | 1,013 | 3,49 | 40,3 | 23,7 | 27,80 | 0,684 |
| 160 | 0,815 | 1,017 | 3,64 | 43,9 | 24,5 | 30,09 | 0,689 |

Окончание прил. 8

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\rho,$ кг/м^3 | $C_p,$ $\text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ | $\lambda \cdot 10^2,$ $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$ | $a \cdot 10^6,$ $\text{м}^2/\text{с}$ | $\mu \cdot 10^6,$ $\text{Па}\cdot\text{с}$ | $\nu \cdot 10^6,$ $\text{м}^2/\text{с}$ | Pr |
|---------------------|----------------------------|--|---|--|---|--|-------|
| 180 | 0,779 | 1,022 | 3,78 | 47,5 | 25,3 | 32,49 | 0,682 |
| 200 | 0,746 | 1,026 | 3,93 | 51,4 | 26,0 | 34,85 | 0,681 |
| 250 | 0,674 | 1,038 | 4,27 | 61,0 | 27,4 | 40,61 | 0,670 |
| 300 | 0,615 | 1,047 | 4,60 | 71,6 | 29,7 | 48,33 | 0,677 |
| 350 | 0,566 | 1,059 | 4,91 | 81,9 | 31,4 | 55,46 | 0,674 |
| 400 | 0,524 | 1,068 | 5,21 | 93,1 | 33,0 | 63,09 | 0,678 |
| 500 | 0,456 | 1,093 | 5,74 | 115,3 | 36,2 | 79,38 | 0,686 |
| 600 | 0,404 | 1,114 | 6,22 | 138,3 | 39,1 | 96,89 | 0,697 |
| 700 | 0,362 | 1,135 | 6,71 | 163,4 | 41,8 | 115,4 | 0,706 |
| 800 | 0,329 | 1,156 | 7,18 | 188,8 | 44,3 | 134,8 | 0,713 |
| 900 | 0,301 | 1,172 | 7,63 | 216,2 | 46,7 | 155,1 | 0,717 |
| 1000 | 0,277 | 1,185 | 8,07 | 245,9 | 49,0 | 177,1 | 0,719 |

Приложение 9

Свойства влажного насыщенного воздуха ($B = 100 \text{ кПа} = 750 \text{ мм рт. ст.}$)

| $t_H,$ °C | p_H'' , Па | d'' , г/кг | $c_{p,\Gamma}$, кДж/(кг·К) | $c_{p,B.B.}$, кДж/(кг·К) | h_Γ , кДж/кг | h_H'' , кДж/кг | $h_{B.B.}$, кДж/кг | ρ_Γ , кг/м ³ | $\rho_{B.B.}$, кг/м ³ |
|--------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------|---------------------|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| -50 | 3,866 | 0,02405 | 1,006 | 1,0061 | -50,30 | 0,0579 | -50,24 | 1,562 | 1,562 |
| -45 | 6,933 | 0,04313 | 1,006 | 1,0061 | -45,27 | 0,1042 | -45,17 | 1,528 | 1,528 |
| -40 | 12,399 | 0,07713 | 1,006 | 1,0061 | -40,24 | 0,1871 | -40,05 | 1,495 | 1,495 |
| -35 | 22,265 | 0,1385 | 1,006 | 1,0063 | -35,21 | 0,3373 | -34,87 | 1,464 | 1,464 |
| -30 | 37,330 | 0,2323 | 1,006 | 1,0064 | -30,18 | 0,5680 | -29,61 | 1,434 | 1,434 |
| -25 | 62,795 | 0,3908 | 1,006 | 1,0067 | -25,15 | 0,9591 | -24,19 | 1,405 | 1,405 |
| -20 | 102,925 | 0,6408 | 1,006 | 1,0072 | -20,12 | 1,579 | -18,54 | 1,377 | 1,377 |
| -15 | 165,053 | 1,028 | 1,006 | 1,0079 | -15,09 | 2,542 | -12,55 | 1,351 | 1,350 |
| -10 | 259,445 | 1,618 | 1,006 | 1,0090 | -10,06 | 4,016 | -6,04 | 1,325 | 1,324 |
| -5 | 401,033 | 2,504 | 1,006 | 1,0107 | -5,03 | 6,239 | 1,21 | 1,300 | 1,298 |
| 0 | 610,8 | 3,823 | 1,006 | 1,0131 | 0 | 9,561 | 9,56 | 1,276 | 1,273 |
| 5 | 871,8 | 5,470 | 1,006 | 1,0162 | 5,03 | 13,732 | 18,76 | 1,253 | 1,249 |
| 10 | 1227,1 | 7,727 | 1,006 | 1,0205 | 10,06 | 19,470 | 29,53 | 1,231 | 1,225 |
| 15 | 1704,1 | 10,783 | 1,006 | 1,0268 | 15,09 | 27,271 | 42,36 | 1,210 | 1,202 |
| 20 | 2336,8 | 14,883 | 1,006 | 1,0339 | 20,12 | 37,779 | 57,90 | 1,189 | 1,179 |
| 25 | 3166,3 | 20,338 | 1,0061 | 1,0435 | 25,15 | 51,816 | 76,97 | 1,169 | 1,155 |
| 30 | 4241,7 | 27,552 | 1,0062 | 1,0586 | 30,19 | 70,453 | 100,64 | 1,150 | 1,131 |
| 35 | 5621,7 | 37,050 | 1,0063 | 1,0755 | 35,22 | 95,087 | 130,31 | 1,131 | 1,107 |
| 40 | 7374,9 | 49,524 | 1,0064 | 1,0999 | 40,26 | 127,56 | 167,82 | 1,113 | 1,082 |
| 45 | 9881,7 | 65,914 | 1,0065 | 1,1299 | 45,29 | 170,74 | 215,69 | 1,096 | 1,056 |
| 50 | 12335 | 87,519 | 1,0065 | 1,1711 | 50,33 | 227,07 | 277,40 | 1,079 | 1,028 |

Окончание прил. 9

| $t_H,$ °C | p_{II}'' , Па | d'' , г/кг | $c_{p,г}$, кДж/(кг·К) | $c_{p,в.в}$, кДж/(кг·К) | $h_{г}$, кДж/кг | h_{II}'' , кДж/кг | $h_{в.в}$, кДж/кг | $\rho_{г}$, кг/м ³ | $\rho_{в.в}$, кг/м ³ |
|--------------|--------------------|-----------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| 55 | 15740 | 116,191 | 1,0066 | 1,3245 | 55,36 | 302,54 | 357,90 | 1,062 | 0,999 |
| 60 | 19919 | 154,714 | 1,0067 | 1,2966 | 60,40 | 404,30 | 464,70 | 1,046 | 0,976 |
| 65 | 25008 | 207,422 | 1,0068 | 1,3939 | 65,44 | 543,97 | 609,42 | 1,031 | 0,933 |
| 70 | 31161 | 281,558 | 1,0070 | 1,5343 | 70,49 | 741,03 | 811,52 | 1,016 | 0,896 |
| 75 | 38548 | 390,172 | 1,0071 | 1,7368 | 75,53 | 1030,54 | 1106,08 | 1,001 | 0,855 |
| 80 | 47359 | 559,588 | 1,0073 | 2,0545 | 80,58 | 1483,24 | 1563,83 | 0,987 | 0,810 |
| 85 | 57803 | 852,038 | 1,0074 | 2,6006 | 85,63 | 2266,38 | 2352,01 | 0,973 | 0,760 |
| 90 | 70108 | 1458,824 | 1,0076 | 3,7359 | 90,68 | 3894,04 | 3984,72 | 0,960 | 0,705 |
| 95 | 84525 | 3397,390 | 1,0078 | 7,3621 | 95,74 | 9100,42 | 9196,16 | 0,947 | 0,644 |

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основной

1. **Богданов С.Н., Клецкий А.В., Куприянова А.В.** Сборник задач по технической термодинамике. – СПб.: СПбГАХиПТ, 1996. – 189 с.
2. Лабораторный практикум по термодинамике: Учеб. пособие / Г.Н. Данилова, А.В. Клецкий, А.В. Куприянова, В.Н. Филаткин, М.Г. Щербов, О.Б. Цветков, В.Н. Федоров, В.В. Митропов. – СПб.: НИУ ИТМО, ИХиБТ, 2012. – 82 с.
3. Лабораторный практикум по теплопередаче. Часть I: Учеб. пособие / О.Б. Цветков, А.В. Клецкий, А.В. Куприянова, С.Н. Богданов, Ю.А. Лаптев, Ю.Н. Ширяев, Р.В. Ключева. – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2013. – 57 с.
4. Сборник задач по процессам теплообмена в пищевой и холодильной промышленности / Г.Н. Данилова, В.Н. Филаткин, М.Г. Щербов, Н.А. Бучко. – М.: Колос, 1995. – 303 с.
5. Теоретические основы хладотехники. Часть I. Термодинамика / С.Н. Богданов, Э.И. Гуйго, Г.Н. Данилова, О.П. Иванов, А.В. Клецкий, В.Т. Плотников, В.Н. Филаткин, О.Б. Цветков; Под ред. Э.И. Гуйго. – М.: Колос, 1994. – 288 с.
6. Теоретические основы хладотехники. Часть II. Тепломассообмен / С.Н. Богданов, Н.А. Бучко, Э.И. Гуйго, Г.Н. Данилова, В.Т. Плотников, В.Н. Филаткин, О.Б. Цветков; Под ред. Э.И. Гуйго. – М.: Колос, 1994. – 368 с.
7. Холодильная техника. Кондиционирование воздуха. Свойства веществ: Справ. / С.Н. Богданов, С.И. Бурцев, О.П. Иванов, А.В. Куприянова; Под ред. С.Н. Богданова. – СПб.: СПбГУНиПТ, 1999. – 308 с.
8. **Цветков О.Б., Лаптев Ю.А.** Термодинамика и теплопередача: Учеб.-метод. пособие. – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2013. – 54 с.
9. **Цветков О.Б., Лаптев Ю.А.** Таблицы свойств холодильных агентов: Учебно-метод. пособие. – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2013. – 52 с.

10. **Цветков О.Б., Лаптев Ю.А., Пятаков Г.Л.** Расчет горизонтального кожухотрубного испарителя: Учебно-метод. пособие. – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2013. – 34 с.

Дополнительный

Теплотехника: Учеб. для вузов / А.А. Архаров, И.А. Архаров, В.Н. Афанасьев и др.; Под ред. А.М. Архарова, В.Н. Афанасьева. – М.: Изд-во МГУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 712 с.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ..... | 3 |
| ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И ИНДЕКСЫ | 4 |
| РАБОЧАЯ ПРОГРАММА | 5 |
| Техническая термодинамика | 5 |
| Теплопередача. Тепломассообмен..... | 8 |
| КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА ПО ТЕРМОДИНАМИКЕ..... | 11 |
| КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА ПО ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ..... | 15 |
| КУРСОВАЯ РАБОТА | 18 |
| КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА ПО ТЕРМОДИНАМИКЕ № 1..... | 19 |
| КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА ПО ТЕРМОДИНАМИКЕ № 2 | 21 |
| КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА ПО ТЕПЛОМАССООБМЕНУ № 1 ... | 24 |
| КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА ПО ТЕПЛОМАССООБМЕНУ № 2 ... | 27 |
| КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА | 30 |
| КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА | 34 |
| КУРСОВАЯ РАБОТА | 38 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ | 39 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 61 |

Цветков Олег Борисович
Лаптев Юрий Александрович
Ширяев Юрий Николаевич

ТЕРМОДИНАМИКА. ТЕПЛОМАССОБМЕН ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ПРИКЛАДНОЙ ТЕПЛОМАССОБМЕН

Учебно-методическое пособие

Ответственный редактор
Т.Г. Смирнова

Титульный редактор
Т.В. Белянкина

Компьютерная верстка
Ю.А. Лаптев

Печатается
в авторской редакции

Подписано в печать 29.12.2014. Формат 60x84 1/16
Усл. печ. л. 3,96. Печ. л. 4,25. Уч.-изд. л. 4,06
Тираж 55 экз. Заказ № С 84

НИУ ИТМО. 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49
ИИК ИХиБТ. 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9