

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
ИРКУТСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ

ОСНОВЫ ТРАНСФОРМАЦИИ ТЕПЛА

*Методические указания и контрольные задания
для студентов-заочников высших аграрных учебных заведений,
обучающихся по направлениям
140100 «Теплоэнергетика и теплотехника» и
110800 «Агроинженерия»*

Иркутск 2014

УДК 621.125: 621.438: 621.43(075)

Рецензенты:

Доцент кафедры «Теплоэнергетики» Национального исследовательского иркутского государственного технического университета, канд. техн. наук, В.А. Бочкарев

Основы трансформации тепла: Методические указания и контрольные задания для студентов-заочников высших аграрных учебных заведений, обучающихся по направлениям 140100 «Теплоэнергетика и теплотехника» и 110800 «Агроинженерия» / авт.-сост. В.В. Нечаев, А.А. Тупицын. – Иркутск: ФГБОУ ВПО ИрГСХА, 2014. – 36 с.

Методические указания предназначены для изучения курсов «Основы трансформации тепла» и «Теплотехника».

Пособие включает методику расчета рабочих процессов в холодильных машинах и тепловых насосах. Представлены задания для контрольной работы и методические указания для их решения.

Основной целью методических указаний является оказание помощи студентам при выполнении контрольной работы, практических и лабораторных занятий на тепловых электростанциях и отопительных котельных.

Для бакалавров и магистров заочной и очной формы обучения по направлениям подготовки 140100 «Теплоэнергетика и теплотехника», профиль «Энергообеспечение предприятий»; 110800 «Агроинженерия», профили: «Электрооборудование и электротехнологии», «Технические системы в агробизнесе», «Автомобили и автомобильное хозяйство», «Технологическое оборудование для хранения и переработки сельскохозяйственной продукции», «Технический сервис в агропромышленном комплексе».

УДК 621.125: 621.438: 621.43(075)

© Нечаев В.В., Тупицын А.А., 2014

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Место дисциплины в структуре основной образовательной программы бакалавриата

Цель курса состоит в формировании у студентов теоретических знаний, по термодинамике, теории теплообмена, теплоэнергетическим и холодильным установкам и применению теплоты в сельском хозяйстве.

Дисциплина «Основы трансформации теплота» относится к базовой части профессионального цикла БЗ основной образовательной программы бакалавриата.

Общая трудоёмкость дисциплины составляет 5 зачётных единиц, 180 часов.

При изучении дисциплины «Основы трансформации теплота» используются знания, полученные при изучении дисциплин математика, физика, химия, техническая термодинамика, тепломассообмен.

Результаты изучения дисциплины «Основы трансформации теплоты» будут присутствовать в изучаемом материале дисциплин: энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях; технические измерения и автоматизация тепловых процессов; источники и системы теплоснабжения; тепломассообменное оборудование предприятий; технологические энергоносители предприятий; технологические энергоносители.

В результате освоения дисциплины «Основы трансформации тепла» студент должен:

знать:

- математику;
- физику;
- техническую термодинамику;
- тепломассообмен;

уметь:

- анализировать термодинамические процессы и циклы применительно к идеальным и реальным газам;
- анализировать теплообменные процессы;
- проводить теплотехнические расчёты в области технической термодинамики и тепломассообмена;
- грамотно пользоваться справочниками, каталогами, таблицами, диаграммами при выполнении теплотехнических расчётов;

владеть:

- основными методами теплотехнического расчёта;
- умением пользоваться теплотехнической литературой;

обладать компетенциями:

ОК-1 – способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения;

ОК-6 – способностью в условиях развития науки и изменяющейся социальной практики к переоценке накопленного опыта, анализу своих возможностей, готовностью приобретать новые знания, использовать различные средства и технологии обучения;

ОК-7 – готовность к самостоятельной, индивидуальной работе, принятию решений в рамках своей профессиональной компетенции;

ОК-11 – владеть основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, использовать компьютер как средство работы с информацией;

ПК-2 – способность демонстрировать базовые знания в области естественнонаучных дисциплин и готовность использовать основные законы в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования;

ПК-3 – готовностью выявить естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, и способностью привлечь для их решения соответствующий физико-математический аппарат;

ПК-6 – способность и готовность анализировать научно-техническую информацию, изучать отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования;

ПК-7 – способность формировать законченное представление о принятых решениях и полученных результатах в виде отчета с его публикацией (публичной защитой).

При изучении курса «Основы трансформации тепла» студенты-заочники, руководствуясь учебной программой для специальностей вузов, самостоятельно работают над учебниками и учебными пособиями, выполняют контрольные работы (курсовые проекты) и лабораторные работы. Рекомендуется затем прослушать обзорные лекции по основным вопросам курса.

Материал курса изучают по основному учебнику (см. список рекомендованной литературы). Для более подробного и глубокого изучения отдельных

вопросов и в помощь при выполнении контрольных работ рекомендуется дополнительная литература. При самостоятельной работе над учебником необходимо добиваться отчетливого представления о физической сущности изучаемых явлений и процессов. При этом особое внимание следует уделить изучению теоретических основ теплотехники (технической термодинамике и основам тепло- и массообмена), являющихся базой изучения указанного курса.

При изучении каждого раздела рекомендуется составлять конспект, который будет полезен при повторении материала, и решать задачи для закрепления теоретического материала.

В конце каждой темы и раздела приведены контрольные вопросы, по которым студент может проверить степень усвоения материала. При изучении курса по всем возникшим вопросам студент может получить письменную или устную консультацию на кафедре энергообеспечения и теплотехники.

Методические указания по решению задач приводятся в начале соответствующего раздела.

Студенты некоторых специальностей в соответствии со своим учебным графиком выполняют также курсовой проект или курсовую работу. Задания и методические указания на проект (работу) разрабатываются вузами в зависимости от специальности.

Для улучшения освоения курса студенты-заочники должны выполнить лабораторные работы.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Рудобашта С. П. Теплотехника: учеб. для вузов / С. П. Рудобашта. – М. : Колос, 2010. – 599 с.

2. Архаров А. М. Теплотехника: Учебник для вузов / А. М. Архаров [и др.] ; Под общ. ред. А. М. Архарова, В. Н. Афанасьева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 712 с.

3. Рабинович О. М. Сборник задач по технической термодинамике / О. М. Рабинович. М. : Машиностроение, 1973. – 344 с.

4. . Панкратов Г. П. Сборник задач по общей теплотехнике. Учеб. пособие для студентов вузов / Г. П. Панкратов – М. : Высшая школа, 1977. – 239 с.

Дополнительная

5. Теплотехника: учеб. для вузов/ В. Н. Луканин [и др.] ; под ред. В. Н. Луканина. – Изд. 5-е, стер. – М. : Высш. шк., 2005. – 672 с.

6. Ерофеев В. Л. Теплотехника: учеб. для вузов / В. Л. Ерофеев, П. Д. Семенов, А. С. Пряхин. – М. : Академкнига, 2006. – 488 с.
7. Ляшков В. И. Теоретические основы теплотехники: учеб. пособие для вузов / В. И. Ляшков. – М. : Высш. шк., 2008. – 318 с.
8. Ерохин В. Г. Основы термодинамики и теплотехники: учеб. для сред. спец. учеб. заведений / В. Г. Ерохин, М. Г. Маханько. – 2-е изд. – М. : Либроком, 2009. – 224 с.
9. Соколов Е. Я. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения: Учеб. пособие для вузов / Е. Я. Соколов, В. М. Бродянский. – 2-е изд., перераб. – М. : Энергоиздат, 1981. – 320 с.
10. Драганов Б. Х.. Теплотехника и применение теплоты в сельском хозяйстве. Учебник для с. х. вузов / Б. Х. Драганов, А. В. Кузнецов, С. П. Рудобашта. – М. : Агропромиздат, 1990. – 463 с.
11. Андрианова Т. Н. Сборник задач по технической термодинамике / Т. Н. Андрианова [и др.]. – М. : МЭИ, 2000. – 352 с.

1. ЦИКЛЫ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН, ТЕПЛООВОГО НАСОСА И ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРОВ

Циклы холодильных установок. Холодильный коэффициент и холодопроизводительность. Цикл паровой и воздушной компрессорной холодильной установки. Характеристика холодильных агентов, применяемых в паровых холодильных установках. Понятие об абсорбционных и парозжекторных холодильных установках. Трансформаторы: сущность термотрансформации, коэффициент преобразования теплоты, циклы понижающего и повышающего термотрансформаторов, циклы совместного получения теплоты и холода.

Методические указания

При изучении циклов различных холодильных установок следует обратить внимание на то, что как для тепловых двигателей, так и для холодильных машин эталоном является цикл Карно. Термический КПД цикла Карно определяется формулой $\eta_t = 1 - \frac{T_{\text{мин}}}{T_{\text{макс}}}$, где $T_{\text{мин}}$ – температура холодильника (она же – минимальная температура термодинамической системы); $T_{\text{макс}}$ – температура горячего источника (она же – максимальная температура системы) Термические КПД любых циклов сравниваем с η_t цикла Карно в этих же пределах тем-

ператур. Для холодильных установок холодильником является внешняя атмосфера или водопроводная вода, у которой температура ниже температуры хладагента, а источником теплоты – содержимое холодильной камеры, у которого температура выше температуры хладагента. Поэтому эквивалентным циклом Карно для холодильной установки будет цикл, осуществляемый не между T_{\min} и T_{\max} (в случае холодильных компрессорных установок T_{\min} – температура хладагента после детандера, T_{\max} – температура хладагента после компрессора) между температурами холодильника (воздух, вода) и источника (охлаждаемые предметы в холодильной камере).

Кроме того, необходимо уяснить, почему в воздушных компрессорных установках не применяется процесс дросселирования, почему паровые компрессорные установки имеют холодильный коэффициент значительно больший, чем воздушные.

Вопросы для самопроверки

1. Какой параметр характеризует эффективность холодильной установки?
2. Каковы основные недостатки воздушной компрессорной холодильной установки?
3. Изобразите в Ts -диаграмме цикл воздушной компрессорной холодильной установки и эквивалентный ей обратный цикл Карно.
4. Почему в паровых холодильных установках целесообразно применять процесс дросселирования, а в воздушных – адиабатное расширение в турбине?
5. Какими свойствами должны обладать хладагенты?
6. Какими способами получают сжиженные газы?
7. Как работает тепловой насос?

2. ХОЛОДИЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И ПРИМЕНЕНИЕ ХОЛОДА В ОТРАСЛЯХ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА.

ТРАНСФОРМАТОРЫ ТЕПЛОТЫ

Потребители холода в отрасли. Физическая сущность охлаждения. Способы охлаждения.

Основы получения искусственного холода. Классификация холодильных машин и установок. Холодильные агрегаты и их основные свойства. Воздушные и паровые холодильные машины. Компрессионная и абсорбционная холодильные установки. Холодильные установки с гелионагревателями. Действи-

тельная холодопроизводительность установки.

Тепловые насосы и трансформаторы теплоты. Применение трансформаторов теплоты и тепловых насосов в промышленности и сельском хозяйстве.

Разделы дисциплины для самостоятельного изучения

1. Назначение, область использования и классификация трансформаторов тепла.
2. Термодинамические основы процессов трансформации тепла. Циклические, квазициклические и нециклические процессы в трансформаторах тепла.
3. Парожидкостные компрессионные трансформаторы тепла. Удельные затраты и КПД.
4. Энергетический и эксергетический балансы компрессионных трансформаторов тепла.
5. Удельные энергозатраты и КПД компрессионных трансформаторов тепла.
6. Многоступенчатые компрессионные трансформаторы тепла.
7. Энергетические характеристики нагнетательных и расширительных машин трансформаторов тепла.
8. Термогазодинамические основы процессов сжатия и расширения.
9. Абсорбционные трансформаторы тепла.
10. Принцип действия идеальных абсорбционных установок и удельный расход тепла в них.
11. Схемы и процесс работы реальных абсорбционных трансформаторов тепла.
12. Абсорбционно-диффузионные холодильные установки.
13. Струйные трансформаторы тепла.
14. Принципиальная схема и КПД парожетторных холодильных установок.
15. Газовые (воздушные) компрессионные трансформаторы тепла.
16. Идеальные газовые циклы холодильных машин со стационарными процессами.
17. Расчет нагрузок потребителей тепла на отопление, ГВС и вентиляцию.
18. Использование тепловых насосов в качестве дополнительных источников теплоты в системах теплоснабжения административных и бытовых зданий и сооружений.
19. Цикл теплового насоса.
20. Получение сжиженных газов.
21. Цикл парожетторной холодильной установки.
22. Цикл парожетторной холодильной установки.
23. Цикл газоструйной холодильной установки.
24. Газожидкостные компрессионные трансформаторы тепла.
25. Термодинамические свойства и характеристики основных хладагентов.
26. Каскадные методы охлаждения материалов и веществ.
27. Применение двухступенчатых теплонасосных установок в системах теплоснабжения.

3. ЦИКЛЫ ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Холодильные установки служат для искусственного охлаждения тел ниже температуры окружающей среды. Рабочее тело в холодильных машинах совершает обратный круговой процесс, в котором в противоположность прямому циклу затрачивается работа извне и отнимается теплота от охлаждаемого тела.

Идеальным циклом холодильных машин является обратный цикл Карно (рис. 3.1). В результате осуществления этого цикла затрачивается работа l_0 и тепло q от холодного тела переносится к более нагретому телу.

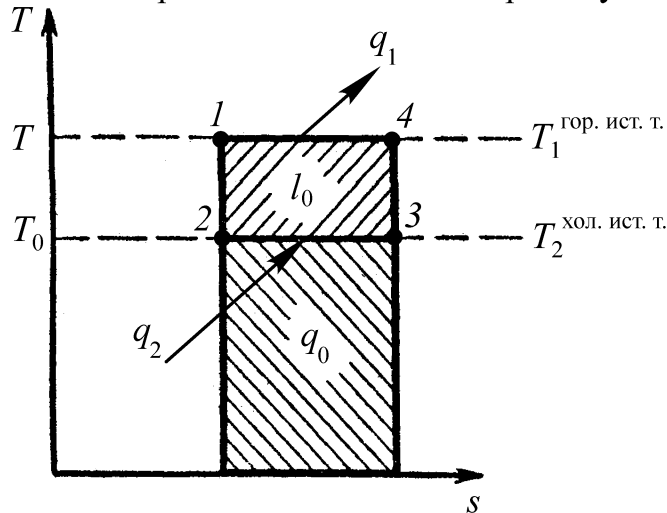


Рис. 3.1

Отношение отведенной от охлаждаемого тела теплоты q_0 (производственного холода) к затраченной работе $q - q_0$ носит название холодильного коэффициента и является характеристикой экономичности холодильной машины:

$$\varepsilon = \frac{q_0}{q - q_0} = \frac{q_2}{q_1 - q_2} = \frac{q_0}{l_0} = \frac{q_2}{l_{\text{ц}}} \quad 262(3.1)$$

Очевидно, максимальное значение холодильного коэффициента при заданном температурном интервале равно холодильному коэффициенту обратного цикла Карно, т.е.

$$\varepsilon_{\text{Карно}} = \frac{T}{T - T_0} = \frac{T_1^{\text{гор.ист.т.}}}{T_1^{\text{гор.ист.т.}} - T_2^{\text{хол.ист.т.}}} \quad 263(3.2)$$

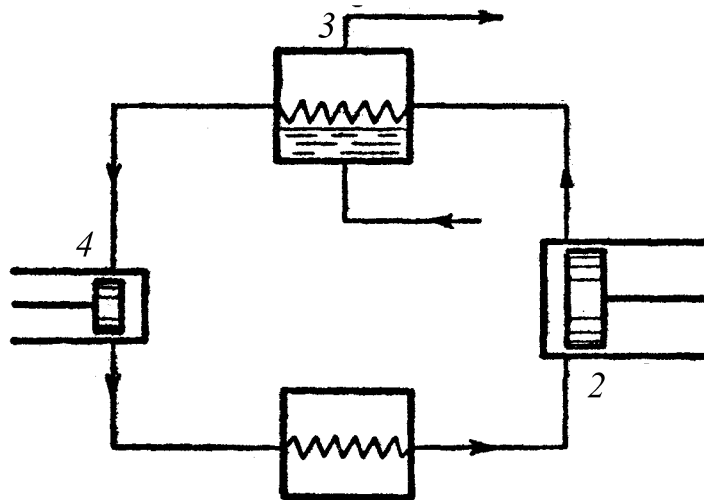
Отношение $\varepsilon/\varepsilon_{\text{к}}$ характеризует степень термодинамического совершенства применяемого цикла.

В качестве холодильных агентов применяют воздух и жидкости с низкими температурами кипения: аммиак, углекислоту, сернистый ангидрит и в последнее время фреоны (галоидные производные насыщенных углеводородов).

Цикл воздушной холодильной установки

На рис. 3.2 дана схема воздушной холодильной установки: охлаждаемое помещение 1, или холодильная камера, в которой по трубам циркулирует охлажденный воздух; компрессор 2, всасывающий этот воздух и сжимающий его; охладитель 3, в котором охлаждается сжатый в компрессоре воздух; расширительный цилиндр 4, в котором воздух расширяется, совершая при этом работу и

понижая свою температуру. Из расширительного цилиндра холодный воздух направляют в холодильную камеру, где он, отнимая теплоту от охлаждаемых тел, нагревается и вновь поступает в компрессор. В дальнейшем этот цикл повторяется.



1
Рис. 3.2

На рис. 3.3 дан теоретический цикл воздушной холодильной установки в диаграмме $p-v$.

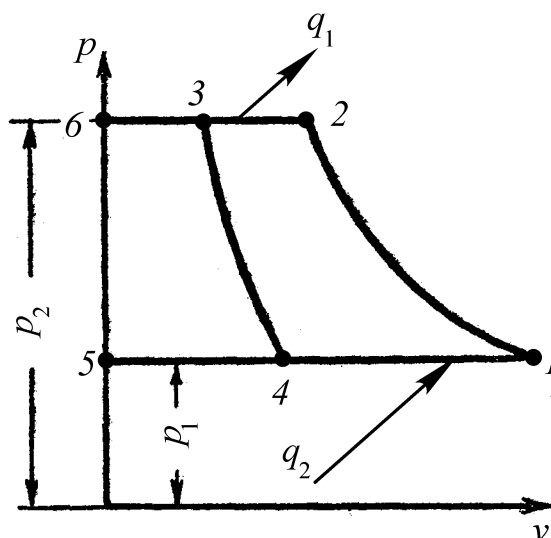


Рис. 3.3

Точка 1 характеризует состояние воздуха, поступающего в компрессор; линия 1-2 – процесс адиабатного сжатия в компрессоре; точка 2 – состояние воздуха, поступающего в охладитель; точка 3 – состояние воздуха, поступающего в расширительный цилиндр; линия 3-4 – адиабатный процесс расширения; точка 4 – состояние воздуха, поступающего в холодильную камеру (охлаждаемое помещение), и линия 4-1 – процесс нагревания воздуха в этой камере. Площадь 1-2-6-5-1 измеряет работу, затраченную компрессорами на сжатие, а площадь 3-6-5-4-3 представляет собой работу, полученную в расширительном цикле. Следовательно, затраты работы в теоретическом цикле воздушной холодильной установки измеряется площадью 1-2-3-4, а количество теплоты сня-

той от охлажденных тел, равно количеству теплоты, воспринятой воздухом в процессе 4-1. Этот же цикл в диаграмме Ts изображен на рис. 3.4. Площадь, лежащая под кривой 4-1, соответствует количеству теплоты q_0 , отведенной от охлаждаемых тел; площадь, лежащая под кривой 1-2, соответствует количеству теплоты, переданной охлаждающей воде в охладителе; а площадь 1-2-3-4-1 – работе, затраченной в цикле.

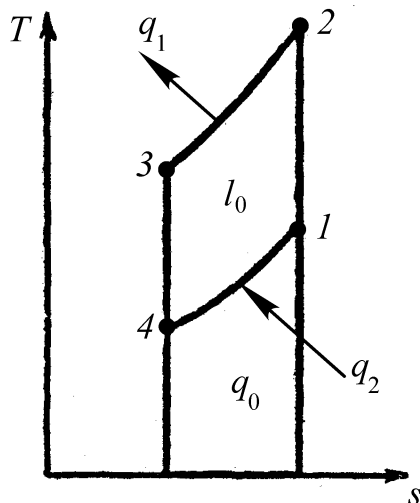


Рис. 3.4

Холодопроизводительность 1 кг воздуха q_0 определяется из уравнения

$$q_0 = q_2 = i_1 - i_4 = c_{pm}(T_1 - T_4), \quad 264(3.3)$$

где T_1 – температура воздуха, выходящего из холодильной камеры и поступающего в компрессор; T_4 – температура воздуха, входящего в холодильную камеру; c_{pm} – средняя массовая теплоемкость воздуха при постоянном давлении.

Работа, затраченная компрессором,

$$l_k = i_2 - i_1 = c_{pm}(T_2 - T_1), \quad 265(3.4)$$

где T_2 – температура воздуха после его сжатия в компрессоре.

Работа, полученная в расширительном цилиндре,

$$l_{p.c.} = i_3 - i_4 = c_{pm}(T_3 - T_4), \quad 266(3.5)$$

где T_3 – температура воздуха перед расширительным цилиндром.

Работа, затраченная в цикле, определяется по уравнению

$$l_0 = l_k - l_{p.c.} \quad 267(3.6)$$

Расход холодильного агента

$$M = \frac{Q_0}{q_0} \text{ кг/с}, \quad 268(3.7)$$

где Q_0 и q_0 – соответственно холодопроизводительность установки и холодопроизводительность 1 кг воздуха в кДж/с и кДж/кг (или в ккал/с и ккал/кг).

Холодильный коэффициент

$$\varepsilon = \frac{q_0}{q - q_0} = \frac{q_0}{l_0} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} = \frac{T_4}{T_3 - T_4}. \quad 269(3.8)$$

Холодильный коэффициент можно выразить также в функции отношения конечного и начального давлений в компрессоре:

$$\varepsilon = \frac{1}{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1} = \frac{1}{\left(\frac{p_3}{p_4}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1}. \quad 270(3.9)$$

Теоретическая мощность, необходимая для привода компрессора,

$$N_{\text{теор}} = M l_0 \text{ кВт}, \quad 271(3.10)$$

если l_0 выражено в кДж/кг.

Основным недостатком воздуха как холодильного агента является его малая теплоемкость, а следовательно, и малое количество теплоты, отнимаемой от охлаждаемого тела одним килограммом агента. Вследствие этого, а также других причин, воздушные холодильные установки в настоящее время не имеют широкого применения.

Цикл паровой компрессорной холодильной установки

Схема паровой компрессорной холодильной установки дана на рис. 3.5. Насыщенный пар аммиака (или другого рабочего тела) при температуре, близкой к температуре охлаждаемого помещения 1, всасывается компрессором 2 и адиабатно сжимается. Из компрессора пар аммиака поступает в конденсатор 3, где при постоянном давлении он конденсируется вследствие отнятия у него теплоты охлаждающей водой. Полученный жидкий аммиак поступает в редукционный вентиль 4, в котором происходит его дросселирование, сопровождаемое падением давления и температуры. При этом аммиак частично испаряется.

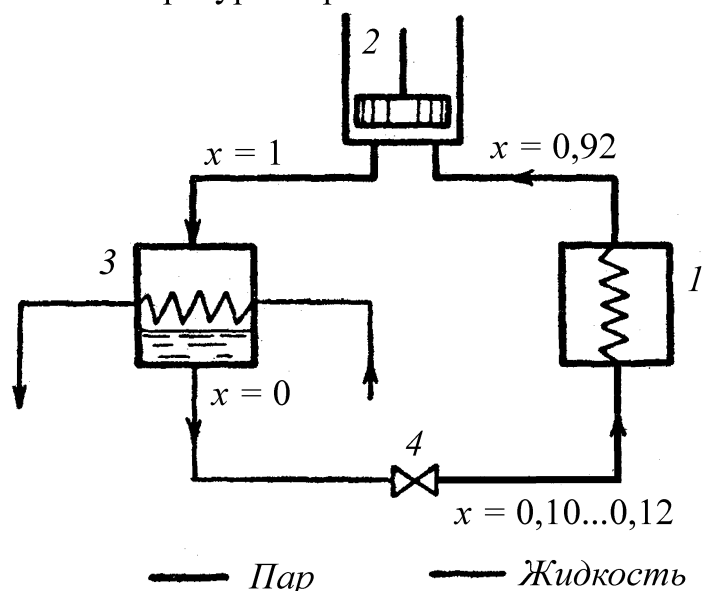


Рис. 3.5

Полученный весьма влажный насыщенный пар (степень сухости x обычно находится в пределах $0,01 \dots 0,15$) с низкой температурой и является хладоносителем. Его направляют в трубы охлаждаемого помещения, где за счет теплоты, отбираемой от охлажденных тел, степень сухости его увеличивается, и он снова

направляется в компрессор. В дальнейшем этот цикл повторяется.

На практике применяют Паровые компрессорные установки с промежуточным теплоносителем. В качестве такого теплоносителя применяют рассолы, т.е. растворы в воде различных солей, главным образом поваренной соли NaCl , хлористого кальция CaCl_2 и хлористого магния MgCl_2 , не замерзающие при низких температурах. В этом случае в схему установки, изображенной на рис. 3.5, вводится дополнительно испаритель 5, в который направляется влажный пар аммиака после редукционного вентиля (рис. 3.6). В испарителе аммиак испаряется, отнимая теплоту у рассола. Охлажденный рассол при помощи насоса 6 направляется в охлаждаемое помещение 1, в котором он нагревается вследствие отнятия теплоты от тел, подлежащих охлаждению, и возвращается в испаритель, где он снова отдает теплоту пару аммиака, поступающему в компрессор. В дальнейшем этот цикл повторяется.

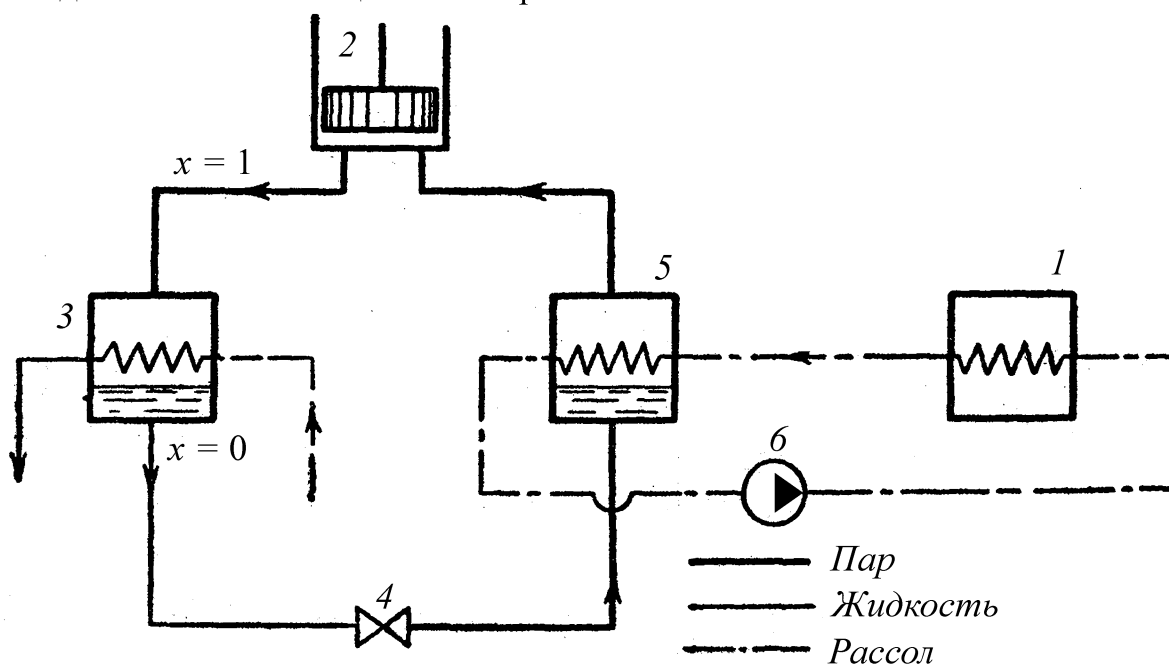


Рис. 3.6

На рис. 3.7 в диаграмме Ts дан цикл изменения состояния 1 кг аммиака в паровой компрессионной установке с промежуточным теплоносителем. Точка 1 характеризует состояние пара аммиака при входе его в компрессор, линия 1–2 – процесс адиабатного сжатия в компрессоре, точка 3 – состояние жидкого аммиака перед входом его в редукционный вентиль, в котором он подвергается дросселированию. Так как это процесс характеризуется равенством значений энтальпий в начальном и конечном состояниях, то в точке 4, соответствующей состоянию аммиака после дросселирования, последний имеет ту же энтальпию что и в точке 3. Линия 4–1 соответствует процессу парообразования в испарителе.

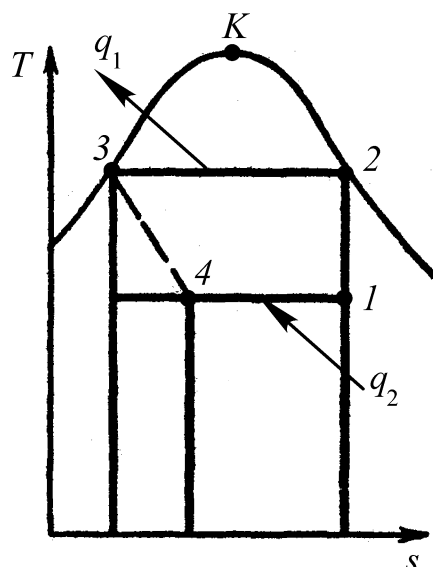


Рис. 3.7

В зависимости от того, какой пар всасывается компрессором (сухой или влажный), процесс в холодильных машинах называют сухим или влажным. При сухом процессе в испарителе получается сухой насыщенный пар. Чтобы обеспечить поступление в компрессор сухого пара, холодильную установку снабжают отделителем жидкости, или сепаратором, через который жидкость возвращается в испаритель. Схема такой установки дана на рис 3.8.

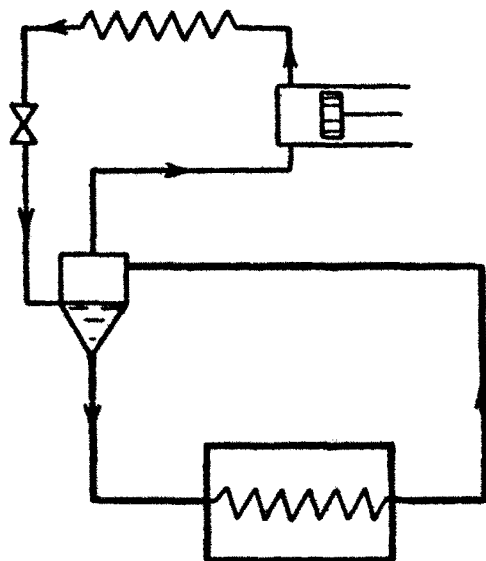


Рис. 3.8

Затрата работы в компрессоре при адиабатном сжатии определяют по формуле

$$l_k = i_2 - i_1. \quad 272(3.11)$$

Холодопроизводительность 1 кг холодильного агента

$$q_0 = i_1 - i_4 = r(x_1 - x_4), \quad 273(3.12)$$

где r – теплота парообразования; x_1 и x_4 – соответственно степень сухости пара после испарителя и после редукционного вентиля.

Тепловая нагрузка конденсатора определяется по формуле

$$q = q_0 + l_0 = i_2 - i_3. \quad 274(3.13)$$

Количество холодильного агента и теоретическую мощность, подводимую к компрессору, определяют по формулам 3.7 и 3.10.

Из цикла паровой компрессионной установки, изображенной на рис. 3.9, видно, что замена расширительного цилиндра редукционным ventилем обуславливает некоторую потерю холодопроизводительности, которая может быть частично уменьшена путем переохлаждения жидкости ниже температуры конденсации. Это видно на рис. 3.9, где изображен цикл паровой компрессорной холодильной установки с переохлаждением конденсата до температуры t_5 , лежащей ниже температуры конденсации t_4 .

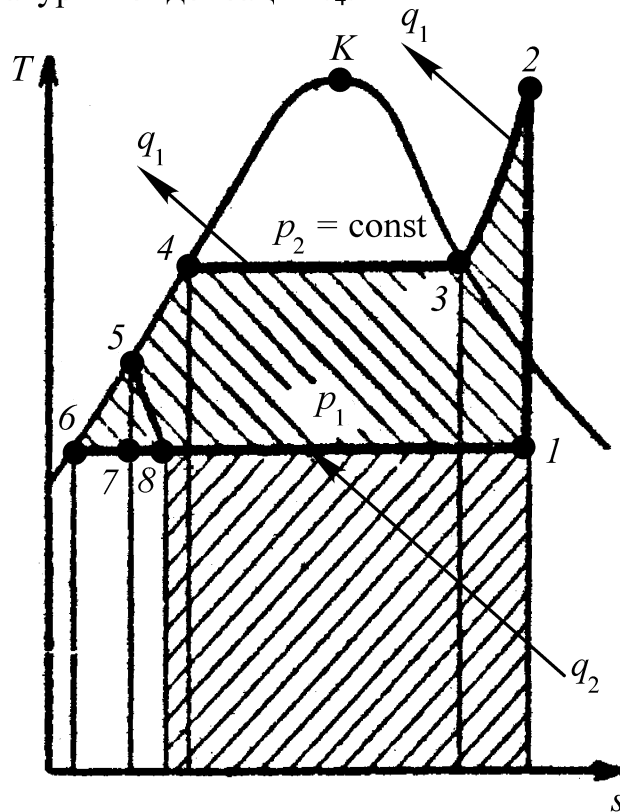


Рис. 3.9

Данные о насыщенных парах аммиака и углекислоты приведены в приложениях 1 и 2.

При решении задач, связанных с холодильными процессами, весьма удобно пользоваться энтропийными диаграммами, помещенными в специальных курсах холодильных установок.

Удобна также диаграмма ip (рис. 3.10). На ней по оси абсцисс отложены энтальпии, а по оси ординат – давления. Для лучшего использования площади диаграммы давления нанесены в логарифмической шкале ($i - \lg p$). На диаграмме нанесены также пограничные кривые, кривые равной сухости пара, изотермы, изохоры и кривые постоянной энтропии.

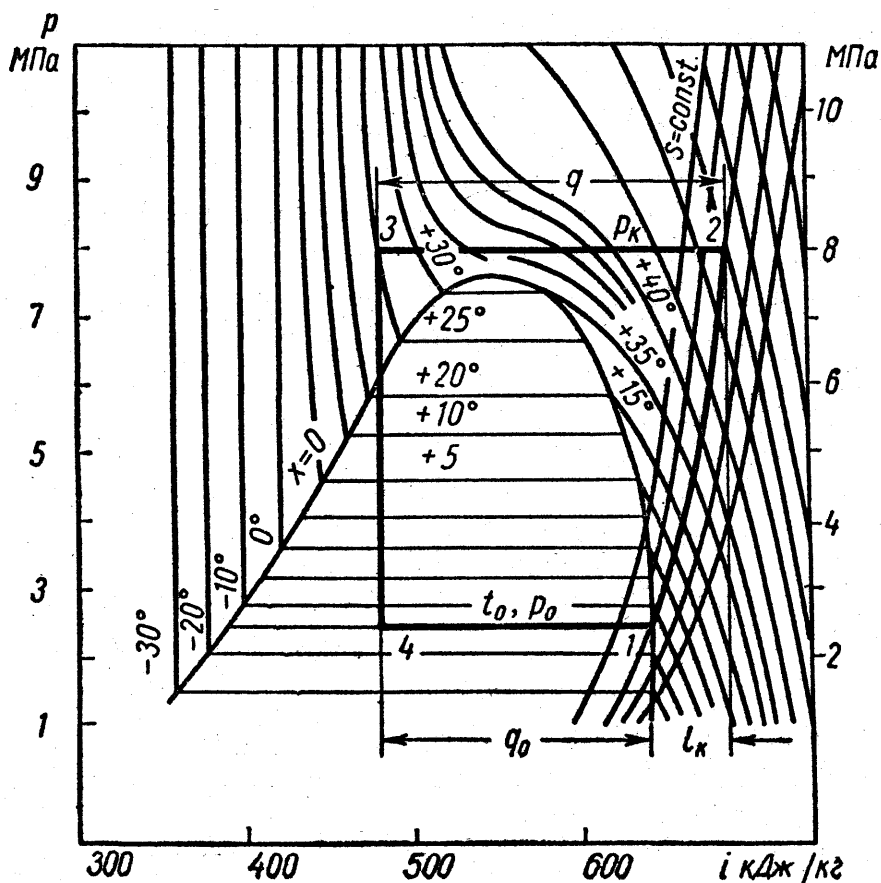


Рис. 3.10

Диаграмма ip позволяет быстро находить параметры пара и дает возможность определять в виде отрезков прямых характеристики рабочего процесса холодильных установок: холодопроизводительность, тепловую нагрузку конденсатора и теоретическую затрату работы в компрессоре.

На рис. 3.10 дана диаграмма ip для углекислоты с изображением цикла холодильной установки. Точка 1 характеризует состояние сухого насыщенного пара на выходе из испарителя и перед поступлением его в компрессор, линия 1–2 – процесс адиабатного сжатия в компрессоре ($s = \text{const}$), точка 2 – состояние сжатой углекислоты, линия 2–3 – процесс отдачи теплоты (q) в конденсаторе при постоянном давлении. Процесс дросселирования в редукционном вентиле можно условно представить вертикально 3–4, а процесс испарения углекислоты – линией 4–1.

Холодопроизводительность q_0 измеряется отрезком 1–2 ($i_1 - i_4$), тепловая нагрузка конденсатора q – отрезком 2–3 ($i_2 - i_3$), а теоретическая затрата работы в компрессоре L_k измеряется разностью энтальпий в точках 2–1. Все указанные величины относятся к 1 кг углекислоты.

Пример 1

В компрессор воздушной холодильной установки поступает воздух из холодильной камеры давлением $p = 0,1$ МПа и температурой $t_1 = -10$ °С. Адиабатно сжатый в компрессоре воздух до давления $p_1 = 0,5$ МПа направляется в охладитель, где он при $p = \text{const}$ снижает свою температуру до $t_3 = +10$ °С. От-

сюда воздух поступает в расширительный цилиндр, где расширяется по адиабате до первоначального давления, после чего возвращается в холодильную камеру. Отнимая теплоту от охлажденных тел, воздух нагревается до $t_1 = -10^\circ\text{C}$ и вновь поступает в компрессор.

Определить температуру воздуха, поступающего в холодильную камеру, теоретическую работу, затрачиваемую в цикле, холодопроизводительность воздуха и холодильный коэффициент для данной установки и для установки, работающей по циклу Карно для того же интервала температур.

Решение

Рассматриваемый цикл холодильной установки изображен на диаграммах $p-v$ и $T-s$ на рис. 3.11 и 3.12. Температуру T_4 воздуха, поступающего в холодильную камеру, определяем из соотношения параметров адиабатного процесса 3–4:

$$T_4 = T_3 \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} = T_3 \left(\frac{p_4}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 283 \left(\frac{0,1}{0,5} \right)^{0,286} = \frac{283}{1,583} = 179 \text{ К.}$$

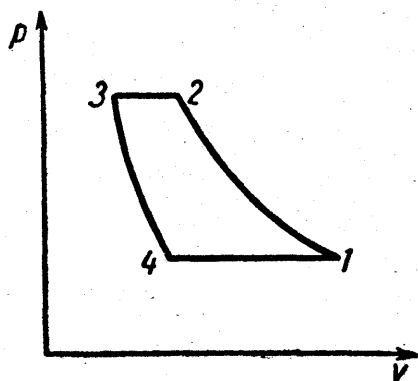


Рис. 3.11

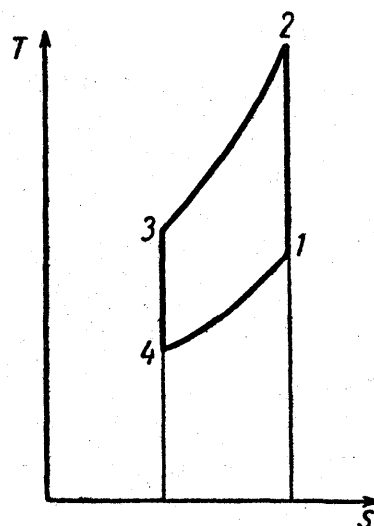


Рис. 3.12

Температура T_2 сжатого воздуха, выходящего из компрессора, определяем из соотношения параметров процесса 1–2:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 263 \cdot 5^{0,286} = 263 \cdot 1,583 = 416 \text{ К.}$$

Работа, затраченная в цикле, равна разности работ: затраченной в компрессоре и полученной в расширительном цилиндре.

Работу, затраченную в компрессоре, определяем по формуле 3.4:

$$l_{\text{к}} = c_{pm} (T_2 - T_1) = 1,012(416 - 263) = 154,8 \text{ кДж/кг.}$$

Работу, полученную в расширительном цилиндре, находим по формуле 3.5:

$$l_{\text{р.ц}} = c_{pm} (T_3 - T_4) = 1,012(283 - 179) = 105,2 \text{ кДж/кг.}$$

Следовательно, работа цикла

$$l_0 = l_k - l_{p.c.} = 157,8 - 105,2 = 49,6 \text{ кДж/кг.}$$

Удельная холодопроизводительность воздуха по формуле 3.3:

$$q_0 = c_{pm} (T_1 - T_4) = 1,012(263 - 179) = 85 \text{ кДж/кг.}$$

Холодильный коэффициент установки

$$\varepsilon = \frac{q_0}{l_0} = \frac{85}{49,6} = 1,71.$$

Холодильный коэффициент установки, работающей по циклу Карно для того же интервала температур:

$$\varepsilon = \frac{T_1}{T_3 - T_1} = \frac{263}{283 - 263} = \frac{263}{20} = 13,15.$$

Пример 2

На рис. 3.13 представлена схема, а на рис. 3.14 изображен цикл паровой компрессорной холодильной установки. Пар аммиака при температуре $t_1 = -10^\circ\text{C}$ поступает в компрессор B , где адиабатно сжимается до давления, при котором его температура $t_2 = 20^\circ\text{C}$, а сухость пара $x_2 = 1$. Из компрессора аммиак поступает в конденсатор C , где при постоянном давлении обращается в жидкость ($x_3 = 0$), после чего в особом расширительном цилиндре D адиабатно расширяется до температуры $t_4 = -10^\circ\text{C}$; при этой же температуре аммиак поступает в охлаждаемое помещение A , где, забирая теплоту от охлаждаемых тел, он испаряется, образуя влажный пар со степенью сухости x_1 .

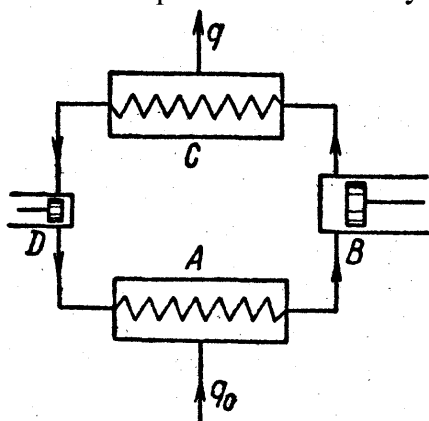


Рис. 3.13

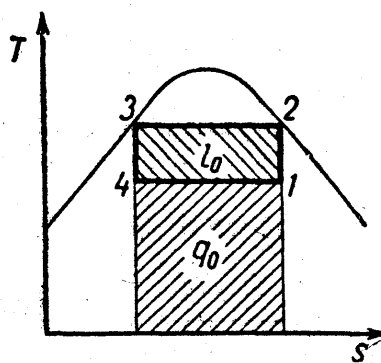


Рис. 3.14

Определить холодопроизводительность аммиака, тепловую нагрузку конденсатора, работу, затраченную в цикле, и холодильный коэффициент.

Решение

Холодопроизводительность аммиака, т.е. количество теплоты, поглощаемой 1 кг аммиака в охлаждаемом помещении, по уравнению 3.12

$$q_0 = i_1 - i_4 = r(x_1 - x_4).$$

По приложению 1 при $t_1 = -10^\circ\text{C}$

$$r_1 = 1296,6 \text{ кДж/кг.}$$

Значения x_1 и x_4 определяем или при помощи диаграммы Ts , или аналитически. В последнем случае используем постоянно энтропии в обратимом адиабатном процессе. Следовательно, в процессе 1–2

$$s_2 = s_1 = s_1' + (s_1'' + s_1')x_1.$$

По приложению 1 находим

$$s_1' = 4,0164 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}; \quad s_1'' = 8,9438 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$s_2 = s_2'' = 8,5658 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Тогда

$$x_1 = \frac{s_2'' - s_1'}{s_1'' - s_1'} = \frac{8,5658 - 4,0164}{8,9338 - 4,0164} = \frac{4,5494}{4,9174} = 0,925.$$

Точно таким же образом определяем x_4 :

$$x_4 = \frac{s_3' - s_1'}{s_1'' - s_1'} = \frac{4,5155 - 4,0164}{8,9338 - 4,0164} = \frac{0,4991}{4,9174} = 0,1015.$$

Следовательно,

$$q = 1296,6(0,925 - 0,1015) = 1067,8 \text{ кДж/кг}.$$

Тепловая нагрузка конденсатора, т.е. количество теплоты, отводимой с охлаждающей водой, по уравнению 3.13

$$q = i_2 - i_3 = r_2.$$

По приложению 1 при $t_2 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ $r_2 = 1186,9 \text{ кДж/кг}$ и, следовательно,

$$q = 1186,9 \text{ кДж/кг}.$$

Работа, затраченная в цикле,

$$l_0 = q - q_0 = 1186,9 - 1067,8 = 119,1 \text{ кДж/кг}.$$

Холодильный коэффициент

$$\varepsilon = \frac{q_0}{l_0} = \frac{1067,8}{119,1} = 8,96.$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Общие указания по выполнению контрольной работы

Контрольная работа должна выполняться студентом после изучения всего курса.

Контрольная работа состоит из 5 задач, задания к каждой из них представлены в 19 вариантах. Студент выбирает в табл. 1–5 тот вариант задания, который соответствует сумме двух последних цифр его учебного шифра (номера зачетной книжки).

При выполнении контрольной работы необходимо соблюдать следующие требования:

- а) обязательно записывать условия задачи;
- б) решение сопровождать кратким пояснительным текстом, в котором должно быть указано, какая величина определяется и по какой формуле, какие величины подставляются в формулу (из условия задачи, из справочника, определена ранее и т. д.)
- в) вычисления давать в развернутом виде;
- г) обязательно представлять размерности всех заданных и расчетных величин в международной системе СИ;
- д) графический материал должен быть выполнен четко в масштабе на миллиметровой бумаге.

После решения задачи должен быть произведен краткий анализ полученных результатов и сделаны соответствующие выводы.

Задача 1

При работе воздушной холодильной установки 1 кг воздуха из холодильной камеры с добавлением с давлением $p_1 = 0,1$ МПа и температурой t_1 (°C) поступает в компрессор, где претерпевает адиабатическое сжатие до давления p_2 (МПа). Из компрессора воздух направляется в охладитель, где он охлаждается при постоянном давлении до t_3 (°C). Затем воздух расширяется в расширительном цилиндре до первоначального давления и вновь возвращается в холодильную камеру, где и нагревается до t_1 .

Определить температуру воздуха, поступающего в холодильную камеру, теоретическую работу, затрачиваемую в цикле, холодопроизводительность воздуха и холодильный коэффициент для данной установки и для установки, работающей по циклу Карно для того же интервала температур.

Изобразить цикл в Ts -диаграмме.

Таблица 1

Варианты задания к задаче 1

| Сумма двух последних цифр шифра | $t_1, ^\circ\text{C}$ | $p_2, \text{МПа}$ | $t_3, ^\circ\text{C}$ |
|---------------------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|
| 0 | -13 | 0,5 | 70 |
| 1 | -14 | 0,5 | 70 |
| 2 | -15 | 0,5 | 70 |
| 3 | -13 | 0,6 | 70 |
| 4 | -14 | 0,6 | 70 |
| 5 | -15 | 0,6 | 75 |
| 6 | -12 | 0,4 | 75 |
| 7 | -10 | 0,4 | 75 |
| 8 | -15 | 0,4 | 65 |
| 9 | -11 | 0,55 | 65 |
| 10 | -13 | 0,55 | 65 |
| 11 | -15 | 0,55 | 67 |
| 12 | -13 | 0,45 | 67 |
| 13 | -14 | 0,45 | 67 |
| 14 | -15 | 0,45 | 72 |
| 15 | -12 | 0,47 | 72 |
| 16 | -10 | 0,47 | 72 |
| 17 | -15 | 0,47 | 74 |
| 18 | -12 | 0,62 | 74 |

Задача 2

Воздушная холодильная машина предназначенная для производства льда, всасывает в компрессор воздух с температурой t_1 ($^{\circ}\text{C}$), давлением $p_1 = 0,1$ МПа и сжимает до давления p_2 (МПа). В холодильнике воздух охлаждается до давления p_2 (МПа). В холодильнике воздух охлаждается до t_3 ($^{\circ}\text{C}$). Расход воздуха V_0 ($\text{м}^3/\text{ч}$). Лед имеет температуру -5 $^{\circ}\text{C}$, а вода, используемая для получения льда, $+10$ $^{\circ}\text{C}$.

Определить холодильный коэффициент; мощность, потребную для привода компрессора, и количество льда, вырабатываемого за час.

Изобразить цикл в Ts -диаграмме.

Таблица 2

Варианты задания к задаче 2

| Сумма двух последних цифр шифра | $t_1, ^{\circ}\text{C}$ | $t_3, ^{\circ}\text{C}$ | $V_0, \text{м}^3/\text{ч}$ | $p_2, \text{МПа}$ |
|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------|
| 0 | -13 | 17 | 1000 | 0,40 |
| 1 | -13 | 17 | 1000 | 0,50 |
| 2 | -13 | 18 | 990 | 0,45 |
| 3 | -13 | 18 | 950 | 0,55 |
| 4 | -12 | 17 | 1050 | 0,40 |
| 5 | -12 | 17 | 1050 | 0,50 |
| 6 | -11 | 18 | 920 | 0,43 |
| 7 | -11 | 18 | 920 | 0,43 |
| 8 | -10 | 16 | 970 | 0,42 |
| 9 | -10 | 16 | 970 | 0,42 |
| 10 | -14 | 17 | 1070 | 0,43 |
| 11 | -14 | 17 | 1070 | 0,43 |
| 12 | -13 | 16 | 990 | 0,47 |
| 13 | -13 | 16 | 990 | 0,47 |
| 14 | -10 | 19 | 1000 | 0,40 |
| 15 | -10 | 19 | 1000 | 0,40 |
| 16 | -11 | 17 | 1100 | 0,49 |
| 17 | -11 | 17 | 1100 | 0,49 |
| 18 | -14 | 17 | 1050 | 0,44 |

Указания к решению задачи 2

Для того, чтобы 1 кг воды при температуре t_3 ($^{\circ}\text{C}$) превратить в лед при температуре -5 $^{\circ}\text{C}$, необходимо от нее отнять тепло q' , идущее на охлаждение воды до 0 $^{\circ}\text{C}$, тепло q'' – теплоту плавления льда, тепло q''' , отнимаемое для того, чтобы понизить температуру льда от 0 до -5 $^{\circ}\text{C}$.

$$q = q' + q'' + q'''.$$

Рекомендуется принять теплоту плавления льда $330,76$ кДж/кг, а его теплоемкость $c_{\text{лед}} = 2,0934$ кДж/(кг·К).

Задача 3

В паровой компрессорной холодильной установке в качестве рабочего тела используется 1 кг углекислоты. Компрессор всасывает пар и по адиабатическому процессу сжимает его, превращая в сухой насыщенный пар, соответствующий температуре конденсации t_2 (°C). Из компрессора углекислота поступает в конденсатор, где и превращается в жидкость, после чего расширяется в расширительном цилиндре до давления, соответствующего температуре испарения t_4 (°C). При этой же температуре углекислота поступает в холодильную камеру, где испаряется, забирая тепло от охлаждаемых тел образуя влажный пар.

Определить холодопроизводительность установки, тепло, отданное в конденсатор, работу, затраченную на совершение цикла, и холодильный коэффициент.

Изобразить цикл в Ts -диаграмме.

Таблица 3

Варианты задания к задаче 3

| Сумма двух последних цифр шифра | $t_2, ^\circ\text{C}$ | $t_4, ^\circ\text{C}$ |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 0 | 15 | 0 |
| 1 | 15 | -5 |
| 2 | 15 | -10 |
| 3 | 15 | -15 |
| 4 | 15 | -20 |
| 5 | 20 | 0 |
| 6 | 20 | -5 |
| 7 | 20 | -10 |
| 8 | 20 | -15 |
| 9 | 20 | -15 |
| 10 | 10 | 0 |
| 11 | 10 | -5 |
| 12 | 10 | -10 |
| 13 | 10 | -15 |
| 14 | 10 | -20 |
| 15 | 5 | 0 |
| 16 | 5 | -5 |
| 17 | 5 | -10 |
| 18 | 5 | -15 |

Задача 4

Для отопления здания может использоваться тепловой насос, в результате работы которого тепло передается источнику с более высокой температурой, чем окружающая среда.

Сколько тепла может передать тепловой насос, если окружающая среда имеет температуру t_1 (°C), температуру отопительных поверхностей t_2 (°C)? Мощность двигателя компрессора N_k (кВт). Холодильный агент – аммиак.

Изобразить цикл в Ts -диаграмме.

Таблица 4

Варианты задания к задаче 4

| Сумма двух последних цифр шифра | $t_1, ^\circ\text{C}$ | $t_2, ^\circ\text{C}$ | $N_k, \text{кВт}$ |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|
| 0 | -10 | 25 | 20 |
| 1 | -15 | 25 | 20 |
| 2 | -5 | 25 | 20 |
| 3 | -10 | 30 | 22 |
| 4 | -15 | 30 | 22 |
| 5 | -5 | 30 | 22 |
| 6 | -10 | 20 | 24 |
| 7 | -15 | 20 | 24 |
| 8 | -5 | 20 | 24 |
| 9 | -10 | 35 | 18 |
| 10 | -15 | 35 | 18 |
| 11 | -5 | 35 | 18 |
| 12 | -10 | 25 | 23 |
| 13 | -15 | 25 | 23 |
| 14 | -5 | 25 | 23 |
| 15 | -10 | 20 | 19 |
| 16 | -15 | 20 | 19 |
| 17 | -5 | 20 | 19 |
| 18 | -10 | 25 | 17 |

Задача 5

Ряд сельскохозяйственных продуктов должен храниться при температуре не выше 0 °С. Для охлаждения помещения склада используется аммиачная холодильная установка, работающая при температуре испарения t_1 (°С) и температуре конденсации t_4 (°С). Приток тепла в помещение Q_0 (кВт), энтальпия i_2 (кДж/кг). Пар из испарителя выходит сухим насыщенным.

Определить количество циркулирующего аммиака, холодильный коэффициент и теоретическую мощность компрессора установки.

Изобразить цикл в Ts -диаграмме.

Таблица 5

Варианты задания к задаче 5

| Сумма двух последних цифр шифра | $t_1, ^\circ\text{C}$ | $t_4, ^\circ\text{C}$ | $Q_0, \text{кВт}$ | $i_2, \text{кДж/кг}$ |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|
| 0 | -10 | 25 | 10 | 1779 |
| 1 | -15 | 25 | 10 | 1850 |
| 2 | -5 | 25 | 10 | 1825 |
| 3 | -10 | 20 | 11 | 1779 |
| 4 | -15 | 20 | 11 | 1850 |
| 5 | -5 | 20 | 11 | 1827 |
| 6 | -10 | 30 | 10 | 1831 |
| 7 | -15 | 30 | 9 | 1780 |
| 8 | -5 | 30 | 9 | 1793 |
| 9 | -10 | 27 | 10,5 | 1800 |
| 10 | -15 | 27 | 10,5 | 1823 |
| 11 | -5 | 27 | 10,5 | 1857 |
| 12 | -10 | 24 | 9,5 | 1908 |
| 13 | -15 | 24 | 9,5 | 1785 |
| 14 | -5 | 24 | 9,5 | 1840 |
| 15 | -10 | 23 | 11,5 | 1852 |
| 16 | -15 | 23 | 11,5 | 1900 |
| 17 | -5 | 23 | 11,5 | 1850 |
| 18 | -10 | 22 | 10,7 | 1820 |

Насыщенный пар аммиака (NH₃), $c_p = 2,0599$ кДж/(кг·К), $k = 1,32$

| $t, ^\circ\text{C}$ | $p, \text{МПа}$ | $v', \text{м}^3/\text{кг}$ | $v'', \text{м}^3/\text{кг}$ | $s', \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ | $s'', \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ | $i', \text{кДж}/\text{кг}$ | $i'', \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ |
|---------------------|-----------------|----------------------------|-----------------------------|---|--|----------------------------|--|
| -50 | 0,0409 | 0,001425 | 2,623 | 3,3000 | 9,6204 | 193,4 | 1608,1 |
| -45 | 0,0546 | 0,001437 | 2,007 | 3,3767 | 9,5199 | 215,6 | 1616,5 |
| -40 | 0,0718 | 0,001449 | 1,550 | 3,4730 | 9,4245 | 237,8 | 1624,9 |
| -35 | 0,0932 | 0,001462 | 1,215 | 3,5672 | 9,3341 | 260,0 | 1632,8 |
| -30 | 0,1195 | 0,001476 | 0,963 | 3,6601 | 9,2486 | 282,2 | 1640,8 |
| -25 | 0,1516 | 0,001490 | 0,771 | 3,7514 | 9,1674 | 304,4 | 1648,3 |
| -20 | 0,1902 | 0,001504 | 0,624 | 3,8410 | 9,0895 | 327,4 | 1655,9 |
| -15 | 0,2363 | 0,001519 | 0,509 | 3,9293 | 9,0150 | 350,0 | 1662,6 |
| -10 | 0,2909 | 0,001534 | 0,418 | 4,0164 | 8,9438 | 372,6 | 1669,3 |
| -5 | 0,3549 | 0,001550 | 0,347 | 4,1022 | 8,8756 | 395,6 | 1675,1 |
| 0 | 0,4294 | 0,001566 | 0,290 | 4,1868 | 8,8094 | 418,7 | 1681,0 |
| 5 | 0,5517 | 0,001583 | 0,244 | 4,2705 | 8,7458 | 441,7 | 1686,4 |
| 10 | 0,6150 | 0,001601 | 0,206 | 4,3530 | 8,6838 | 465,2 | 1691,0 |
| 15 | 0,7283 | 0,001619 | 0,175 | 4,4346 | 8,6240 | 488,6 | 1695,6 |
| 20 | 0,8572 | 0,001639 | 0,149 | 4,5155 | 8,5658 | 512,5 | 1699,4 |
| 25 | 1,0027 | 0,001659 | 0,128 | 4,5954 | 8,5092 | 536,3 | 1703,2 |
| 30 | 1,1665 | 0,001680 | 0,111 | 4,6746 | 8,4563 | 581,1 | 1705,7 |
| 35 | 1,3499 | 0,001702 | 0,096 | 4,7528 | 8,3991 | 584,9 | 1708,2 |
| 40 | 1,5544 | 0,001726 | 0,083 | 4,8307 | 8,3455 | 609,2 | 1709,9 |
| 45 | 1,7814 | 0,001750 | 0,073 | 4,9078 | 8,2928 | 633,9 | 1710,7 |
| 50 | 2,0326 | 0,001777 | 0,064 | 4,9840 | 8,2400 | 659,0 | 1711,1 |

Насыщенный пар углекислоты (CO₂), $c_p = 0,825$ кДж/(кг·К), $k = 1,31$

| $t, ^\circ\text{C}$ | $p, \text{МПа}$ | $v', \text{м}^3/\text{кг}$ | $v'', \text{м}^3/\text{кг}$ | $s', \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ | $s'', \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ | $i', \text{кДж}/\text{кг}$ | $i'', \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ |
|---------------------|-----------------|----------------------------|-----------------------------|---|--|----------------------------|--|
| -56,6 | 0,518 | 0,000849 | 0,0722 | 3,7200 | 5,3273 | 301,5 | 649,4 |
| -55 | 0,555 | 0,000853 | 0,0676 | 3,7334 | 5,3172 | 304,4 | 649,8 |
| -50 | 0,684 | 0,000867 | 0,0554 | 3,7765 | 5,2883 | 314,0 | 651,5 |
| -45 | 0,832 | 0,000881 | 0,0458 | 3,8184 | 5,2607 | 323,6 | 652,7 |
| -40 | 1,005 | 0,000897 | 0,0382 | 3,8594 | 5,2348 | 333,3 | 654,0 |
| -35 | 1,202 | 0,000913 | 0,0320 | 3,8996 | 5,2096 | 342,9 | 654,8 |
| -30 | 1,427 | 0,000931 | 0,0270 | 3,9389 | 5,1854 | 352,5 | 655,6 |
| -25 | 1,681 | 0,000950 | 0,0229 | 3,9779 | 5,1615 | 362,2 | 656,1 |
| -20 | 1,967 | 0,000971 | 0,0195 | 4,0168 | 5,1380 [^] | 372,2 | 656,1 |
| -15 | 2,289 | 0,000994 | 0,0166 | 4,0570 | 5,1154 | 382,7 | 656,1 |
| -10 | 2,647 | 0,001019 | 0,0142 | 4,0976 | 5,0924 | 394,0 | 655,6 |
| -5 | 3,045 | 0,001048 | 0,0121 | 4,1407 | 5,0698 | 405,7 | 654,8 |
| 0 | 3,485 | 0,001081 | 0,0104 | 4,1868 | 5,0472 | 418,7 | 653,6 |
| 5 | 3,972 | 0,001120 | 0,00885 | 4,2299 | 5,0179 | 431,6 | 651,0 |
| 10 | 4,506 | 0,001166 | 0,00752 | 4,2781 | 4,9894 | 445,9 | 647,3 |
| 15 | 5,092 | 0,001223 | 0,00632 | 4,3292 | 4,9551 | 470,0 | 641,4 |
| 20 | 5,733 | 0,001298 | 0,00526 | 4,3827 | 4,9128 | 477,3 | 632,6 |
| 25 | 6,432 | 0,001417 | 0,00417 | 4,4497 | 4,8504 | 497,4 | 616,7 |
| 30 | 7,192 | 0,001677 | 0,00299 | 4,5444 | 4,7524 | 527,1 | 590,3 |
| 31 | 7,351 | 0,002156 | 0,00216 | 4,6465 | 4,6465 | 567,3 | 567,3 |

Термодинамические свойства фреона-12 на линии насыщения

| $t, ^\circ\text{C}$ | $p, \text{МПа}$ | $v', \text{м}^3/\text{кг}$ | $v'', \text{м}^3/\text{кг}$ | $i', \text{кДж/кг}$ | $i'', \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ | $s', \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ | $s'', \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ |
|---------------------|-----------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| -39 | 0,6730 | 0,0006605 | 0,2337 | 384,06 | 554,63 | 4,0513 | 4,7797 |
| -35 | 0,8076 | 0,0006658 | 0,1973 | 387,46 | 556,59 | 4,0655 | 4,7759 |
| -30 | 1,0044 | 0,0006725 | 0,1613 | 391,73 | 559,06 | 4,0832 | 4,7716 |
| -25 | 1,2369 | 0,0006793 | 0,1331 | 396,07 | 561,54 | 4,1007 | 4,7675 |
| -20 | 1,5094 | 0,0006868 | 0,1107 | 400,44 | 563,96 | 4,1180 | 4,7642 |
| -15 | 1,8257 | 0,0006940 | 0,09268 | 404,92 | 566,39 | 4,1353 | 4,7610 |
| -10 | 2,1904 | 0,0007018 | 0,08713 | 409,44 | 568,82 | 4,1525 | 4,7583 |
| -5 | 1,6080 | 0,0007092 | 0,06635 | 414,00 | 571,16 | 4,1695 | 4,7558 |
| 0 | 3,0848 | 0,0007173 | 0,05667 | 418,65 | 573,51 | 4,1865 | 4,7536 |
| +5 | 3,6234 | 0,0007257 | 0,04863 | 423,34 | 578,81 | 4,2033 | 4,7515 |
| +10 | 4,2289 | 0,0007342 | 0,04204 | 428,11 | 578,07 | 4,2201 | 4,7498 |
| +15 | 4,9094 | 0,0007435 | 0,03648 | 432,97 | 580,29 | 4,2368 | 4,7481 |
| +20 | 5,6653 | 0,0007524 | 0,03175 | 437,87 | 582,42 | 4,2534 | 4,7466 |
| +25 | 6,5062 | 0,0007628 | 0,02773 | 442,81 | 584,48 | 4,2699 | 4,7451 |
| +30 | 7,4324 | 0,0007734 | 0,02433 | 447,83 | 586,44 | 4,2864 | 4,7437 |

Сухой насыщенный пар и вода на кривой насыщения (по давлениям)

| $p \cdot 10^5$, Па | $t_{\text{н}}$, °C | v' , м ³ /кг | v'' , м ³ /кг | i' , кДж/кг | i'' , кДж/кг | s' , кДж/(кг·К) | s'' , кДж/(кг·К) |
|------------------------|---------------------|---------------------------|----------------------------|------------------|-------------------|----------------------|-----------------------|
| 0,010 | 6,936 | 0,0010001 | 130,04 | 29,18 | 2513,4 | 0,1053 | 8,9749 |
| 0,015 | 13,001 | 0,0010007 | 88,38 | 54,61 | 2524,7 | 0,1952 | 8,8268 |
| 0,020 | 17,486 | 0,0010014 | 67,24 | 73,40 | 2533,1 | 0,2603 | 8,7227 |
| 0,025 | 21,071 | 0,0010021 | 54,42 | 88,36 | 2539,5 | 0,3119 | 8,6424 |
| 0,030 | 24,078 | 0,0010028 | 45,77 | 100,93 | 2545,3 | 0,3547 | 8,5784 |
| 0,035 | 26,674 | 0,0010035 | 39,56 | 111,81 | 2549,9 | 0,3912 | 8,5222 |
| 0,040 | 28,95 | 0,0010042 | 34,93 | 121,33 | 2553,7 | 0,4225 | 8,4737 |
| 0,05 | 32,89 | 0,0010054 | 28,24 | 137,79 | 2560,9 | 0,4764 | 8,3943 |
| 0,10 | 45,82 | 0,0010102 | 14,70 | 191,84 | 2583,9 | 0,6496 | 8,1494 |
| 0,20 | 60,08 | 0,0010171 | 7,652 | 251,48 | 2609,2 | 0,8324 | 7,9075 |
| 0,25 | 64,99 | 0,0010198 | 6,201 | 272,03 | 2617,6 | 0,8934 | 7,8300 |
| 0,30 | 69,12 | 0,0010223 | 5,232 | 289,30 | 2624,6 | 0,9441 | 7,7673 |
| 0,4 | 75,87 | 0,0010264 | 3,999 | 317,62 | 2636,3 | 1,0261 | 7,6710 |
| 0,5 | 81,33 | 0,0010299 | 3,243 | 340,53 | 2645,2 | 1,0912 | 7,5923 |
| 1,0 | 99,62 | 0,0010432 | 1,696 | 417,47 | 2674,9 | 1,3026 | 7,3579 |
| 2,0 | 120,23 | 0,0010606 | 0,8860 | 504,74 | 2706,8 | 1,5306 | 7,1279 |
| 3,0 | 133,54 | 0,0010733 | 0,6055 | 561,7 | 2725,5 | 1,6716 | 6,9922 |
| 5 | 151,84 | 0,0010927 | 0,3749 | 640,1 | 2748,8 | 1,8605 | 6,8221 |
| 6 | 158,84 | 0,0011009 | 0,3156 | 670,6 | 2756,9 | 1,9311 | 6,7609 |
| 7 | 164,96 | 0,0011081 | 0,2728 | 697,2 | 2763,7 | 1,9923 | 6,7090 |
| 8 | 170,41 | 0,0011149 | 0,2403 | 720,9 | 2769,0 | 2,0461 | 6,6630 |
| 9 | 175,36 | 0,0011213 | 0,2149 | 742,7 | 2773,7 | 2,0945 | 6,6223 |
| 10 | 179,88 | 0,0011273 | 0,1945 | 762,4 | 2777,8 | 2,1383 | 6,5867 |
| 15 | 198,28 | 0,0011538 | 0,1317 | 844,5 | 2791,8 | 2,3148 | 6,4458 |
| 20 | 212,37 | 0,0011768 | 0,09961 | 908,6 | 2799,2 | 2,4471 | 6,3411 |
| 30 | 233,83 | 0,0012164 | 0,06663 | 1008,4 | 2803,1 | 2,6455 | 6,1859 |
| 40 | 250,33 | 0,0012520 | 0,04977 | 1087,5 | 2800,6 | 2,7965 | 6,0689 |
| 50 | 263,91 | 0,0012858 | 0,03943 | 1154,2 | 2793,9 | 2,9210 | 5,9739 |
| 60 | 275,56 | 0,0013185 | 0,03243 | 1213,9 | 2784,4 | 3,0276 | 5,8894 |
| 70 | 285,80 | 0,0013510 | 0,02738 | 1267,6 | 2772,3 | 3,1221 | 5,8143 |
| 80 | 294,98 | 0,0013838 | 0,02352 | 1317,3 | 2758,6 | 3,2079 | 5,7448 |
| 90 | 303,31 | 0,0014174 | 0,02049 | 1363,9 | 2742,6 | 3,2866 | 5,6783 |
| 100 | 310,96 | 0,0014522 | 0,01803 | 1407,9 | 2724,8 | 3,3601 | 5,6147 |
| 120 | 324,64 | 0,001527 | 0,01426 | 1491,1 | 2684,6 | 3,4966 | 5,4930 |
| 140 | 336,63 | 0,001611 | 0,01149 | 1570,8 | 2637,9 | 3,6233 | 5,3731 |
| 160 | 347,32 | 0,001710 | 0,009319 | 1649,6 | 2581,7 | 3,7456 | 5,2478 |
| 180 | 356,96 | 0,001839 | 0,007505 | 1732,2 | 2510,6 | 3,8708 | 5,1054 |
| 200 | 365,72 | 0,00203 | 0,00586 | 1826,8 | 2410,3 | 4,0147 | 4,9280 |
| 220 | 373,71 | 0,00269 | 0,00378 | 2009,7 | 2195,6 | 4,2943 | 4,5815 |

Сухой насыщенный пар и вода на кривой насыщения (по температурам)

| $t_{\text{н}}, ^\circ\text{C}$ | $p \cdot 10^5, \text{Па}$ | $v', \text{м}^3/\text{кг}$ | $v'', \text{м}^3/\text{кг}$ | $i', \text{кДж/кг}$ | $i'', \text{кДж/кг}$ | $s', \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ | $s'', \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ |
|--------------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------|----------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 0 | 0,006108 | 0,0010002 | 206,3 | 0,000 | 2500,8 | 0 | 9,1544 |
| 5 | 0,008718 | 0,0010001 | 147,2 | 21,06 | 2510,0 | 0,0762 | 9,0242 |
| 10 | 0,012271 | 0,0010004 | 106,42 | 42,04 | 2519,2 | 0,1511 | 8,8995 |
| 15 | 0,01704 | 0,0010010 | 77,97 | 62,97 | 2528,4 | 0,2244 | 8,7806 |
| 20 | 0,02337 | 0,0010018 | 57,84 | 83,90 | 2537,2 | 0,2964 | 8,6663 |
| 25 | 0,03167 | 0,0010030 | 43,40 | 104,80 | 2546,4 | 0,3672 | 8,5570 |
| 30 | 0,04241 | 0,0010044 | 32,93 | 125,69 | 2555,6 | 0,4367 | 8,4523 |
| 35 | 0,05622 | 0,0010060 | 25,25 | 146,58 | 2564,8 | 0,5049 | 8,3518 |
| 40 | 0,07375 | 0,0010079 | 19,55 | 167,51 | 2573,6 | 0,5723 | 8,2560 |
| 45 | 0,09582 | 0,0010099 | 15,28 | 188,41 | 2582,4 | 0,6385 | 8,1638 |
| 50 | 0,12335 | 0,0010121 | 12,05 | 209,30 | 2591,6 | 0,7038 | 8,0751 |
| 55 | 0,15741 | 0,0010145 | 9,578 | 230,19 | 2600,4 | 0,7679 | 7,9901 |
| 60 | 0,1992 | 0,0010171 | 7,678 | 251,12 | 2609,2 | 0,8311 | 7,9084 |
| 65 | 0,2501 | 0,0010199 | 6,201 | 272,06 | 2617,6 | 0,8935 | 7,8297 |
| 70 | 0,3116 | 0,0010228 | 5,045 | 292,99 | 2626,4 | 0,9550 | 7,7544 |
| 75 | 0,3855 | 0,0010258 | 4,133 | 313,97 | 2634,8 | 1,0157 | 7,6819 |
| 80 | 0,4736 | 0,0010290 | 3,409 | 334,94 | 2643,1 | 1,0752 | 7,6116 |
| 85 | 0,5780 | 0,0010324 | 2,828 | 355,96 | 2651,5 | 1,1342 | 7,5438 |
| 90 | 0,7011 | 0,0010359 | 2,361 | 376,98 | 2659,5 | 1,1924 | 7,4785 |
| 95 | 0,8452 | 0,0010396 | 1,982 | 398,04 | 2667,8 | 1,2502 | 7,4157 |
| 100 | 1,0132 | 0,0010435 | 1,673 | 419,10 | 2675,8 | 1,3071 | 7,3545 |
| 105 | 1,2080 | 0,0010474 | 1,419 | 440,20 | 2683,3 | 1,3632 | 7,2959 |
| 110 | 1,4327 | 0,0010515 | 1,210 | 461,34 | 2691,3 | 1,4185 | 7,2386 |
| 115 | 1,6906 | 0,0010558 | 1,037 | 482,53 | 2698,8 | 1,4725 | 7,1833 |
| 120 | 1,9851 | 0,0010603 | 0,8917 | 503,7 | 2706,3 | 1,5278 | 7,1289 |
| 125 | 2,3208 | 0,0010649 | 0,7704 | 525,0 | 2713,5 | 1,5814 | 7,0778 |
| 130 | 2,7011 | 0,0010697 | 0,6683 | 546,4 | 2720,6 | 1,6345 | 7,0271 |
| 135 | 3,130 | 0,0010747 | 0,5820 | 567,7 | 2727,3 | 1,6869 | 6,9781 |
| 140 | 3,614 | 0,0010798 | 0,5087 | 589,1 | 2734,0 | 1,7392 | 6,9304 |
| 145 | 4,155 | 0,0010851 | 0,4461 | 610,4 | 2740,3 | 1,7907 | 6,8839 |
| 150 | 4,760 | 0,0010906 | 0,3926 | 632,2 | 2746,5 | 1,8418 | 6,8383 |
| 155 | 5,433 | 0,0010962 | 0,3465 | 653,6 | 2752,4 | 1,8924 | 6,7939 |
| 160 | 6,180 | 0,0011021 | 0,3068 | 675,3 | 2757,8 | 1,9427 | 6,7508 |
| 165 | 7,008 | 0,0011081 | 0,2725 | 697,5 | 2763,7 | 1,9925 | 6,7081 |
| 170 | 7,920 | 0,0011144 | 0,2426 | 719,3 | 2768,7 | 2,0419 | 6,6666 |
| 175 | 8,925 | 0,0011208 | 0,2166 | 741,1 | 2773,3 | 2,0909 | 6,6256 |
| 180 | 10,027 | 0,0011275 | 0,1939 | 763,3 | 2778,4 | 2,1395 | 6,5858 |
| 185 | 11,234 | 0,0011344 | 0,1739 | 785,4 | 2782,5 | 2,1876 | 6,5465 |
| 190 | 12,553 | 0,0011415 | 0,1564 | 807,6 | 2786,3 | 2,2358 | 6,5075 |
| 195 | 13,989 | 0,0011489 | 0,1409 | 829,8 | 2789,7 | 2,2835 | 6,4699 |

Окончание приложения 5

| $t_{\text{н}}, ^\circ\text{C}$ | $p \cdot 10^5, \text{Па}$ | $v', \text{м}^3/\text{кг}$ | $v'', \text{м}^3/\text{кг}$ | $i',$ кДж/кг | $i'',$ кДж/кг | $s',$ кДж/(кг·К) | $s'',$ кДж/(кг·К) |
|--------------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------|------------------|---------------------|----------------------|
| 200 | 15,550 | 0,0011565 | 0,1272 | 852,4 | 2793,0 | 2,3308 | 6,4318 |
| 205 | 17,245 | 0,0011644 | 0,1150 | 875,0 | 2795,5 | 2,3777 | 6,3945 |
| 210 | 19,080 | 0,0011726 | 0,1044 | 897,6 | 2798,0 | 2,4246 | 6,3577 |
| 215 | 21,062 | 0,0011812 | 0,09465 | 920,7 | 2800,1 | 2,4715 | 6,3212 |
| 220 | 23,202 | 0,0011900 | 0,08606 | 943,7 | 2801,4 | 2,5179 | 6,2848 |
| 225 | 25,504 | 0,0011992 | 0,07837 | 967,2 | 2802,6 | 2,5640 | 6,2488 |
| 230 | 27,979 | 0,0012087 | 0,07147 | 990,2 | 2803,1 | 2,6101 | 6,2132 |
| 235 | 30,635 | 0,0012187 | 0,06527 | 1014,0 | 2803,4 | 2,6561 | 6,1780 |
| 240 | 33,480 | 0,0012291 | 0,05967 | 1037,5 | 2803,1 | 2,7022 | 6,1425 |
| 245 | 36,524 | 0,0012399 | 0,05462 | 1061,8 | 2802,6 | 2,7478 | 6,1073 |
| 250 | 39,78 | 0,0012512 | 0,05005 | 1086,1 | 2801,0 | 2,7934 | 6,0721 |
| 255 | 43,25 | 0,0012631 | 0,04591 | 1110,3 | 2788,9 | 2,8395 | 6,0365 |
| 260 | 46,94 | 0,0012755 | 0,04215 | 1135,0 | 2796,4 | 2,8851 | 6,0014 |
| 265 | 50,88 | 0,0012886 | 0,03872 | 1160,2 | 2793,4 | 2,9308 | 5,9658 |
| 270 | 55,05 | 0,0013023 | 0,03560 | 1185,3 | 2789,7 | 2,9764 | 5,9298 |
| 275 | 59,49 | 0,0013168 | 0,03275 | 1210,8 | 2785,1 | 3,0225 | 5,8938 |
| 280 | 64,19 | 0,0013321 | 0,03013 | 1236,8 | 2779,6 | 3,0685 | 5,8573 |
| 285 | 69,18 | 0,0013483 | 0,02774 | 1263,2 | 2773,3 | 3,1146 | 5,8201 |
| 290 | 74,45 | 0,0013655 | 0,02553 | 1290,0 | 2766,2 | 3,1610 | 5,7824 |
| 295 | 80,02 | 0,0013839 | 0,02351 | 1317,2 | 2758,3 | 3,2079 | 5,7443 |
| 300 | 85,92 | 0,0014036 | 0,02164 | 1344,8 | 2749,1 | 3,2548 | 5,7049 |
| 305 | 92,13 | 0,001425 | 0,01992 | 1373,3 | 2739,0 | 3,3025 | 5,6647 |
| 310 | 98,69 | 0,001447 | 0,01831 | 1402,2 | 2727,3 | 3,3507 | 5,6233 |
| 315 | 105,61 | 0,001472 | 0,01683 | 1431,9 | 2714,3 | 3,3997 | 5,5802 |
| 320 | 112,90 | 0,001499 | 0,01545 | 1462,0 | 2699,6 | 3,4495 | 5,5354 |
| 325 | 120,57 | 0,001529 | 0,01417 | 1493,4 | 2683,3 | 3,5002 | 5,4893 |
| 330 | 128,64 | 0,001562 | 0,01297 | 1526,1 | 2665,7 | 3,5521 | 5,4412 |
| 335 | 137,15 | 0,001599 | 0,01184 | 1559,6 | 2645,2 | 3,6057 | 5,3905 |
| 340 | 146,08 | 0,001639 | 0,01078 | 1594,8 | 2621,8 | 3,6605 | 5,3361 |
| 345 | 155,47 | 0,001686 | 0,09771 | 1632,0 | 2595,4 | 3,7183 | 5,2770 |
| 350 | 165,37 | 0,001741 | 0,08805 | 1671,4 | 2564,4 | 3,7786 | 5,2117 |
| 355 | 175,77 | 0,001807 | 0,007869 | 1714,1 | 2527,2 | 3,8439 | 5,1385 |
| 360 | 186,74 | 0,001894 | 0,006943 | 1761,4 | 2481,1 | 3,9163 | 5,0530 |
| 365 | 198,30 | 0,00202 | 0,00600 | 1817,5 | 2420,8 | 4,0009 | 4,9463 |
| 370 | 210,53 | 0,00222 | 0,00493 | 1892,4 | 2330,8 | 4,1135 | 4,7951 |
| 375 | 220,87 | 0,00280 | 0,00361 | 2031,9 | 2171,7 | 4,3258 | 4,5418 |

Физические свойства сухого воздуха (давление $1,013 \cdot 10^5$ Па)

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\rho, \text{кг/м}^3$ | $c_p,$ кДж/(кг·К) | $\lambda \cdot 10^2,$ Вт/(м·К) | $\mu \cdot 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$ | $\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$ | $\text{Pr} = \nu/a$ |
|---------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------------------|--|---------------------------------------|---------------------|
| -50 | 1,584 | 1,013 | 2,04 | 14,6 | 9,23 | 0,728 |
| -40 | 1,515 | 1,013 | 2,12 | 15,2 | 10,04 | 0,728 |
| -30 | 1,453 | 1,013 | 2,20 | 15,7 | 10,80 | 0,723 |
| -20 | 1,395 | 1,009 | 2,28 | 16,2 | 11,79 | 0,716 |
| -10 | 1,342 | 1,009 | 2,36 | 16,7 | 12,43 | 0,712 |
| 0 | 1,293 | 1,005 | 2,44 | 17,2 | 13,28 | 0,707 |
| 10 | 1,247 | 1,005 | 2,51 | 17,6 | 14,16 | 0,705 |
| 20 | 1,205 | 1,005 | 2,59 | 18,1 | 15,06 | 0,703 |
| 30 | 1,165 | 1,005 | 2,67 | 18,6 | 16,00 | 0,701 |
| 40 | 1,128 | 1,005 | 2,76 | 19,1 | 16,96 | 0,699 |
| 50 | 1,093 | 1,005 | 2,83 | 19,6 | 17,95 | 0,698 |
| 60 | 1,060 | 1,005 | 2,90 | 20,1 | 18,97 | 0,696 |
| 70 | 1,029 | 1,009 | 2,96 | 20,6 | 20,02 | 0,694 |
| 80 | 1,000 | 1,009 | 3,05 | 21,1 | 21,09 | 0,692 |
| 90 | 0,972 | 1,009 | 3,13 | 21,5 | 22,10 | 0,690 |
| 100 | 0,946 | 1,009 | 3,21 | 21,9 | 23,13 | 0,688 |
| 120 | 0,898 | 1,009 | 3,34 | 22,8 | 25,45 | 0,686 |
| 140 | 0,854 | 1,013 | 3,49 | 23,7 | 27,80 | 0,684 |
| 160 | 0,815 | 1,017 | 3,64 | 24,5 | 30,09 | 0,682 |
| 180 | 0,779 | 1,022 | 3,78 | 25,3 | 32,49 | 0,681 |
| 200 | 0,746 | 1,026 | 3,93 | 26,0 | 34,85 | 0,680 |
| 250 | 0,674 | 1,038 | 4,27 | 27,4 | 40,61 | 0,677 |
| 300 | 0,615 | 1,047 | 4,60 | 29,7 | 48,33 | 0,674 |
| 350 | 0,566 | 1,059 | 4,91 | 31,4 | 55,46 | 0,676 |
| 400 | 0,524 | 1,068 | 5,21 | 33,0 | 63,09 | 0,678 |
| 500 | 0,456 | 1,093 | 5,74 | 36,2 | 79,38 | 0,687 |
| 600 | 0,404 | 1,114 | 6,22 | 39,1 | 96,89 | 0,699 |
| 700 | 0,362 | 1,135 | 6,71 | 41,8 | 115,4 | 0,706 |
| 800 | 0,329 | 1,156 | 7,18 | 44,3 | 134,8 | 0,713 |
| 900 | 0,301 | 1,172 | 7,63 | 46,7 | 155,1 | 0,717 |
| 1000 | 0,277 | 1,185 | 8,07 | 49,0 | 177,1 | 0,719 |
| 1100 | 0,257 | 1,197 | 8,50 | 51,2 | 199,3 | 0,722 |
| 1200 | 0,239 | 1,210 | 9,15 | 53,5 | 233,7 | 0,724 |

Физические свойства воды на линии насыщения

| $t, ^\circ\text{C}$ | $p \cdot 10^5, \text{Па}$ | $\rho', \text{кг/м}^3$ | $c_p,$ кДж/(кг·К) | $\lambda \cdot 10^2,$ Вт/(м·К) | $\mu \cdot 10^6,$ Па·с | $\nu \cdot 10^6,$ м ² /с | $\beta \cdot 10^4,$ К ⁻¹ | Pr |
|---------------------|---------------------------|------------------------|----------------------|-----------------------------------|---------------------------|--|--|-------|
| 0 | 1,013 | 999,9 | 4,212 | 55,1 | 1788 | 1,789 | 0,63 | 13,67 |
| 10 | 1,013 | 999,7 | 4,191 | 57,4 | 1306 | 1,306 | 0,70 | 9,52 |
| 20 | 1,013 | 998,2 | 4,183 | 59,9 | 1004 | 1,006 | 1,82 | 7,02 |
| 30 | 1,013 | 995,7 | 4,174 | 61,8 | 801,5 | 0,805 | 3,21 | 5,42 |
| 40 | 1,013 | 992,2 | 4,174 | 63,5 | 653,3 | 0,659 | 3,87 | 4,31 |
| 50 | 1,013 | 988,1 | 4,174 | 64,8 | 549,4 | 0,556 | 4,49 | 3,54 |
| 60 | 1,013 | 983,2 | 4,179 | 65,9 | 469,4 | 0,478 | 5,11 | 2,98 |
| 70 | 1,013 | 977,8 | 4,187 | 66,8 | 406,1 | 0,415 | 5,70 | 2,55 |
| 80 | 1,013 | 971,8 | 4,195 | 67,4 | 355,1 | 0,365 | 6,32 | 2,21 |
| 90 | 1,013 | 865,3 | 4,208 | 68,0 | 314,9 | 0,326 | 6,95 | 1,95 |
| 100 | 1,013 | 958,4 | 4,220 | 68,3 | 282,5 | 0,295 | 7,52 | 1,75 |
| 110 | 1,43 | 951,0 | 4,233 | 68,5 | 259,0 | 0,272 | 8,08 | 1,60 |
| 120 | 1,98 | 943,1 | 4,250 | 68,6 | 237,4 | 0,252 | 8,64 | 1,47 |
| 130 | 2,70 | 934,8 | 4,266 | 68,6 | 217,8 | 0,233 | 9,19 | 1,36 |
| 140 | 3,61 | 926,1 | 4,287 | 68,5 | 201,1 | 0,217 | 9,72 | 1,26 |
| 150 | 4,76 | 917,0 | 4,313 | 68,4 | 186,4 | 0,203 | 10,3 | 1,17 |
| 160 | 6,18 | 907,4 | 4,346 | 68,3 | 173,6 | 0,191 | 10,7 | 1,10 |
| 170 | 7,92 | 897,3 | 4,380 | 67,9 | 162,8 | 0,181 | 11,3 | 1,05 |
| 180 | 10,03 | 886,9 | 4,417 | 67,4 | 153,0 | 0,173 | 11,9 | 1,00 |
| 190 | 12,55 | 876,0 | 4,459 | 67,0 | 144,2 | 0,165 | 12,6 | 0,96 |
| 200 | 15,55 | 863,0 | 4,505 | 66,3 | 136,4 | 0,158 | 13,3 | 0,93 |
| 210 | 19,08 | 852,8 | 4,555 | 65,5 | 130,5 | 0,153 | 14,1 | 0,91 |
| 220 | 23,20 | 840,3 | 4,614 | 64,5 | 124,6 | 0,148 | 14,8 | 0,89 |
| 230 | 27,98 | 827,3 | 4,681 | 63,7 | 119,7 | 0,145 | 15,9 | 0,88 |
| 240 | 33,48 | 813,6 | 4,756 | 62,8 | 114,8 | 0,141 | 16,8 | 0,87 |
| 250 | 39,78 | 799,0 | 4,844 | 61,8 | 109,9 | 0,137 | 18,1 | 0,86 |
| 260 | 46,94 | 784,0 | 4,949 | 60,5 | 105,9 | 0,135 | 19,7 | 0,87 |
| 270 | 55,05 | 767,9 | 5,070 | 59,0 | 102,0 | 0,133 | 21,6 | 0,88 |
| 280 | 64,19 | 750,7 | 5,230 | 57,4 | 98,1 | 0,131 | 23,7 | 0,90 |
| 290 | 74,45 | 732,3 | 5,485 | 55,8 | 94,2 | 0,129 | 26,2 | 0,93 |
| 300 | 85,92 | 712,5 | 5,736 | 54,0 | 91,2 | 0,128 | 29,2 | 0,97 |
| 310 | 98,70 | 691,1 | 6,071 | 52,3 | 88,3 | 0,128 | 32,9 | 1,03 |
| 320 | 112,90 | 667,1 | 6,574 | 50,6 | 85,3 | 0,128 | 38,2 | 1,11 |
| 330 | 128,65 | 640,2 | 7,244 | 48,4 | 81,4 | 0,127 | 43,3 | 1,22 |
| 340 | 146,08 | 610,1 | 8,165 | 45,7 | 77,5 | 0,127 | 53,4 | 1,39 |
| 350 | 165,37 | 574,4 | 9,504 | 43,0 | 72,6 | 0,126 | 66,8 | 1,60 |
| 360 | 186,74 | 528,0 | 13,984 | 39,5 | 66,7 | 0,126 | 109 | 2,35 |
| 370 | 210,53 | 450,5 | 40,321 | 33,7 | 56,9 | 0,126 | 264 | 6,79 |

Физические свойства водяного пара на линии насыщения

| $t, ^\circ\text{C}$ | $p \cdot 10^5, \text{Па}$ | $\rho'', \text{кг/м}^3$ | $r, \text{кДж/кг}$ | $c_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ | $\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$ | $\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$ | $\mu \cdot 10^6, \text{Па}\cdot\text{с}$ | Pr |
|---------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------|-------------------------------------|--|---------------------------------------|--|------|
| 10 | 0,0123 | 0,0106 | 2477,4 | 1,861 | 1,89 | — | — | — |
| 20 | 0,0233 | 0,0173 | 2453,8 | 1,866 | 1,94 | 510 | — | — |
| 30 | 0,0424 | 0,0304 | 2430,2 | 1,874 | 1,99 | 313 | — | — |
| 40 | 0,0737 | 0,0511 | 2406,5 | 1,885 | 2,06 | 188 | — | — |
| 50 | 0,123 | 0,0830 | 2382,5 | 1,898 | 2,12 | 119 | — | — |
| 60 | 0,199 | 0,1302 | 2358,4 | 1,915 | 2,19 | 80 | — | — |
| 70 | 0,311 | 0,198 | 2333,8 | 1,936 | 2,26 | 56 | — | — |
| 80 | 0,473 | 0,293 | 2308,9 | 1,962 | 2,32 | 38 | — | — |
| 90 | 0,701 | 0,423 | 2283,4 | 2,006 | 2,35 | 26 | — | — |
| 100 | 1,013 | 0,598 | 2256,8 | 2,135 | 2,372 | 20,02 | 11,97 | 1,08 |
| 110 | 1,43 | 0,826 | 2230,0 | 2,177 | 2,489 | 15,07 | 12,46 | 1,09 |
| 120 | 1,98 | 1,121 | 2202,8 | 2,206 | 2,593 | 11,46 | 12,85 | 1,09 |
| 130 | 2,70 | 1,496 | 2174,3 | 2,257 | 2,686 | 8,85 | 13,24 | 1,11 |
| 140 | 3,61 | 1,966 | 2145,0 | 2,315 | 2,791 | 6,89 | 13,54 | 1,12 |
| 150 | 4,76 | 2,547 | 2114,3 | 2,395 | 2,884 | 5,47 | 13,93 | 1,16 |
| 160 | 6,18 | 3,258 | 2082,6 | 2,479 | 3,012 | 4,39 | 14,32 | 1,18 |
| 170 | 7,92 | 4,122 | 2049,5 | 2,583 | 3,128 | 3,57 | 14,72 | 1,21 |
| 180 | 10,03 | 5,156 | 2015,2 | 2,709 | 3,268 | 2,93 | 15,11 | 1,25 |
| 190 | 12,55 | 6,397 | 1978,8 | 2,586 | 3,419 | 2,44 | 15,60 | 1,30 |
| 200 | 15,55 | 7,862 | 1940,7 | 3,023 | 3,547 | 2,03 | 15,99 | 1,36 |
| 210 | 19,08 | 9,588 | 1900,5 | 3,199 | 3,722 | 1,71 | 16,38 | 1,41 |
| 220 | 23,20 | 11,62 | 1857,8 | 3,408 | 3,896 | 1,45 | 16,87 | 1,47 |
| 230 | 27,98 | 13,99 | 1813,0 | 3,634 | 4,094 | 1,24 | 17,36 | 1,54 |
| 240 | 33,48 | 16,76 | 1765,6 | 3,881 | 4,291 | 1,06 | 17,76 | 1,61 |
| 250 | 39,78 | 19,98 | 1715,8 | 4,158 | 4,512 | 0,913 | 18,25 | 1,68 |
| 260 | 46,94 | 23,72 | 1661,4 | 4,468 | 4,803 | 0,794 | 18,84 | 1,75 |
| 270 | 55,05 | 28,09 | 1604,4 | 4,815 | 5,106 | 0,688 | 19,32 | 1,82 |
| 280 | 64,19 | 33,19 | 1542,9 | 5,234 | 5,489 | 0,600 | 19,91 | 1,90 |
| 290 | 74,45 | 39,15 | 1473,3 | 5,694 | 5,827 | 0,526 | 20,60 | 2,01 |
| 300 | 85,92 | 46,21 | 1404,3 | 6,280 | 6,268 | 0,461 | 21,29 | 2,13 |

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ..... | 3 |
| РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА..... | 5 |
| 1. ЦИКЛЫ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН, ТЕПЛОВОГО НАСОСА И ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРОВ | 6 |
| 2. ХОЛОДИЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И ПРИМЕНЕНИЕ ХОЛОДА В ОТРАСЛЯХ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА. ТРАНСФОРМАТОРЫ ТЕПЛОТЫ..... | 7 |
| 3. ЦИКЛЫ ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК..... | 9 |
| КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ..... | 20 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ..... | 26 |

*Методические указания и контрольные задания
для студентов-заочников высших аграрных учебных заведений*

Нечаев Валерий Владимирович

Тупицын Алексей Альбертович

ОСНОВЫ ТРАНСФОРМАЦИИ ТЕПЛА

Подписано в печать 9.12.2013. Формат 60x86/16. Печ.л. 2,2
Тираж 100 экз.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования «Иркутская государственная
сельскохозяйственная академия»

Отпечатано в типографии ИрГСХА.
664038, г. Иркутск, пос. Молодёжный.
Лицензия на полиграфическую деятельность ЛР № 070444 от 11.03.1998