

**Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство сельского хозяйства Российской Федерации**



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ИРКУТСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»**

**Энергетический факультет
Кафедра энергообеспечения и теплотехники**

Э.А. ТАИРОВ

**ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ.
ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА**

**Методические указания и задания
для выполнения контрольной работы**

Иркутск 2014

Рецензенты:

доцент кафедры теплоэнергетики Института энергетики
Национального исследовательского Иркутского государственного
технического университета,
кандидат технических наук
В.А. Бочкарев

Таиров, Э.А.

Основы термодинамики. Техническая термодинамика.

Методические указания и задания к выполнению контрольных работ студентами вузов. – Иркутск: ФГБОУ ВПО ИрГСХА, 2014. – 43 с.

Методические указания предназначены для самостоятельного изучения дисциплин “Основы термодинамики”, “Техническая термодинамика”, “Теплотехника”. Содержат основные положения рабочей программы, задачи, упражнения и вопросы для самопроверки. Основной целью издания является оказание помощи при самостоятельном изучении курсов, а также при решении инженерных теплотехнических задач, выполнении контрольных и расчетно-графических работ.

Для студентов заочной и очной формы обучения по направлениям подготовки 140100.62,68 Теплоэнергетика и теплотехника, 110800 Агроинженерия.

© Таиров Э.А., 2014

© Издательство ИрГСХА, 2014

ВВЕДЕНИЕ

Курсы “Основы термодинамики” и “Техническая термодинамика” являются базовыми при подготовке инженеров-теплоэнергетиков. Цель изучения дисциплины – подготовка студентов к усвоению вопросов технической термодинамики в спецкурсах и к использованию полученных знаний и навыков на стадии дипломного проектирования и в профессиональной деятельности.

Задача изучения данных дисциплин – усвоение принципов работы тепловых машин и оценки их эффективности; приобретение умений и навыков в проведении расчетов термодинамических процессов и циклов и решении практических задач, связанных с различными видами преобразования энергии в теплотехнических системах. Для изучения дисциплин необходимо знание высшей математики, физики и гидродинамики.

В списке рекомендуемой литературы выделены учебник и задачник (основной комплект книг), в которых объем и структура материала в наибольшей степени согласуется с утвержденной программой дисциплины, а приведенные в приложениях справочные данные достаточны, чтобы в полном объеме выполнить расчеты, предусмотренные контрольными заданиями.

В случае затруднений с приобретением указанных в списке изданий учебника [1] и задачника [3], можно воспользоваться этими же книгами предыдущих изданий, а также учебниками из списка дополнительной литературы.

Большое внимание студенту нужно обратить на самостоятельную работу с учебной литературой. Настоящее издание преследует цель – обеспечить единство процессов самостоятельной проработки текста рекомендуемого учебника и самоконтроля за качеством усвоения программного материала дисциплины в форме ответов на вопросы и решения контрольных заданий.

ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

Тема 1. Основные понятия термодинамических параметров и процессов, законы идеального газа

Программа

Предмет общей термодинамики и ее задачи. Раздел технической термодинамики, основы метода классической термодинамики.

Основные параметры состояния вещества, уравнение состояния, термодинамический процесс. Отображение параметров состояния и термодинамического процесса на диаграммах состояния вещества. Понятия равновесного и неравновесного процессов.

Идеальный газ, законы идеального газа, уравнение состояния идеального газа. Газовые смеси, закон Авогадро, универсальная и удельная газовые постоянные. Понятие о теплоемкости.

Литература: [1, гл. 1].

Методические указания

При изучении темы необходимо усвоить сущность вводимых параметров состояния вещества и единиц их измерений. Обратит внимание на особенность термодинамических параметров как выражение интенсивных свойств термодинамического тела. Весьма важным является утверждение о том, что для простых веществ достаточно знание двух любых термодинамических параметров для нахождения остальных.

Студент должен освоить графическое отображение параметров с помощью термодинамических диаграмм состояния вещества. При изучении понятия термодинамического процесса обратит внимание, что в разделе технической термодинамики рассматриваются равновесные процессы как идеализация реальных процессов, протекающих с чрезвычайно малой скоростью. Особую роль играет понятие абсолютной температуры, исчисляемой по шкале Кельвина.

Необходимо уметь записывать уравнение Клапейрона для 1 кг, 1 кмоль и M кг идеального газа, а также усвоить сущность закона Авогадро и следствий из него. Важно четко усвоить значения таких понятий и определений, как универсальная и удельная газовые постоянные, законы Дальтона и Амага для газовой смеси, нахождение газовой постоянной смеси.

Вопросы для самопроверки

1.1 В чем состоит различие между экстенсивными и интенсивными свойствами вещества?

1.2 Можно ли, зная температуру газа, определить его удельный объем?

1.3 Какое из давлений больше: 50 бар или 50 кгс/см²?

1.4 Какие из пар параметров p, v ; p, T ; V, T ; p, V ; могут быть использованы для создания диаграммы состояния вещества?

1.5 В чем различие между равновесными и неравновесными процессами? Которые из них можно отобразить на диаграммах состояния вещества?

1.6 В чем заключается суть адиабатного процесса?

1.7 Как вычислить удельную газовую постоянную для газа с молекулярной массой 28 кг/кмоль?

1.8 Что называется парциальным давлением данного газа в составе газовой смеси?

1.9 Что называется приведенным объемом данного газа в составе газовой смеси?

1.10 Что называется кажущейся молекулярной массой смеси, и как она связана с молекулярными массами отдельных газов, входящих в данную смесь?

1.11 Как можно рассчитать газовую постоянную смеси?

1.12 В чем состоит различие между истинной теплоемкостью и средней теплоемкостью?

1.13 В каких размерностях исчисляются удельная массовая, объемная и мольная теплоемкости вещества?

1.14 Зависит ли теплоемкость от вида термодинамического процесса?

Тема 2. Первый закон термодинамики

Программа

Эквивалентность теплоты и работы. Работа расширения, ее отображение на p, v – диаграмме. Уравнение первого закона термодинамики. Внутренняя энергия и энтальпия, связь их изменения с теплоемкостью. Формула Майера. Уравнение первого закона термодинамики для потока.

Литература: [1, гл. 2].

Методические указания

Основным вопросом темы является формулировка общего закона сохранения энергии. При этом основное внимание должно быть уделено анализу составляющих этого уравнения – теплоте, внутренней энергии или энтальпии, внешней работе, а также математическим выражениям связи этих величин с температурой, давлением, объемом.

Вопросы для самопроверки

2.1 Какую цель преследовал своими опытами английский физик Джоуль?

2.2 Какие два вида энергии связывает между собой механический эквивалент тепла?

2.3 Может ли работа расширения производиться без изменения внутренней энергии?

2.4 Может ли работа расширения осуществляться без изменения давления?

2.5 Является ли работа расширения, как и внутренняя энергия, параметром состояния вещества?

2.6 Можно ли утверждать, что любой процесс расширения между двумя наперед заданными состояниями рабочего тела производит одинаковую работу?

2.7 В чем состоит различие свойства внутренней энергии идеального и реального газов?

2.8 Может ли изменяться энтальпия вещества, когда его внутренняя энергия остается постоянной?

2.9 Можно ли выразит удельную газовую постоянную идеального газа через его теплоемкости?

2.10 Является ли работа по ускорению потока частью работы расширения в потоке?

2.11 В какой вид энергии преобразуется работа против сил трения в потоке?

Тема 3. Второй закон термодинамики

Программа

Понятие циклов теплового двигателя и холодильной машины; понятие термического коэффициента полезного действия. Обратимые

и необратимые процессы, необратимость и неравновесность реальных процессов переноса теплоты и производства работы.

Общие формулировки второго закона термодинамики. Цикл Карно, теорема Карно. Энтропия, ее изменение в обратимых и необратимых процессах. Изображение циклов на T,s – диаграмме.

Математическое выражение второго закона термодинамики. Объединенное уравнение первого и второго законов термодинамики.

Литература: [1, гл. 3, §3.1-3.4, 3.6-3.8].

Методические указания

При изучении циклов необходимо уяснить их назначение как способа непрерывного преобразования тепловой энергии в работу тепловых двигателей.

Важно понять роль второго закона термодинамики, подчеркивающего необратимый характер самопроизвольных реальных процессов и возможность работы теплового двигателя только в необратимом процессе передачи теплоты от горячего источника к холодному.

Обратить внимание на то, что введенная Клаузиусом при суммировании (интегрировании) элементарных приведенных теплот в произвольном обратимом цикле новая функция – энтропия, является функцией состояния. Здесь важным является вывод о влиянии необратимости процессов на возрастание энтропии в изолированной системе.

Вопросы для самопроверки

3.1 Можно ли отнести к циклам процесс непрерывного охлаждения горячего тела?

3.2 Можно ли создать тепловой двигатель, работающий при равенстве температур горячего и холодного источника?

3.3 Что называется термическим коэффициентом полезного действия (η_T) цикла?

3.4 Может ли неравновесный процесс быть обратимым?

3.5 Влияет ли на величину термического к.п.д. обратимого цикла Карно изменение температуры горячего источника?

3.6 Верно ли, что совершение работы расширения всегда сопровождается изменением энтропии рабочего тела?

3.7 Зависит ли изменение энтропии от траектории термодинамического процесса между двумя состояниями рабочего тела?

3.8 В каких единицах измеряется площадь цикла, изображенного на T,s – диаграмме?

3.9 Изменится ли энтропия системы из двух тел, если часть тепла горячего тела без потерь перейдет к холодному телу?

3.10 Какая из величин – Tds или dq , изменяется в необратимых процессах больше?

3.11 Запишите объединенное уравнение первого и второго законов термодинамики.

Тема 4. Равновесие термодинамических систем и фазовые переходы

Программа

Термодинамическое равновесие и его устойчивость. Условия равновесия для изолированной системы при четырех формах взаимодействия системы с окружающей средой. Характеристические функции, химический потенциал.

Условия термической и механической устойчивости в однородной изолированной системе.

Виды фазовых переходов для чистых веществ, линии фазовых переходов и их изображение на p,T – диаграмме, тройная точка. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса. Иллюстрация устойчивости фаз в парожидкостной системе с использованием функции химического потенциала.

Литература: [1, гл. 5, §5.1-5.7].

Методические указания

При выводе условий устойчивости с помощью характеристических функций обратите внимание на соответствующие им формы взаимодействия термодинамической системы с окружающей средой. Необходимо уметь отобразить линии фазовых переходов для чистых веществ на p,T – диаграмме с указанием тройной и критической точек. Следует отчетливо представлять, что уравнение фазового перехода Клаузиуса-Клапейрона не определяет явно положение кривой фазового перехода на p,T – диаграмме, но дает дифференциальную связь между изменениями давления и температуры вдоль этой кривой.

Вопросы для самопроверки

4.1 В чем отличие между стабильным и нестабильным состояниями системы?

4.2 Может ли в изолированной системе после достижения ею состояния равновесия наблюдаться возрастание энтропии?

4.3 В чем различие между изохорно-изотермическим и изобарно-изотермическим потенциалами?

4.4 Минимум какой характеристической функции достигается в состоянии равновесия для системы, если процесс взаимодействия ее с окружающей средой происходит при $V = \text{const}$ и $S = \text{const}$.

4.5 Относится ли энтропия к характеристическим функциям?

4.6 Какую функцию называют химическим потенциалом вещества?

4.7 Как называют процесс фазового перехода вещества из твердого состояния в газообразное?

4.8 Возможно ли термодинамическое равновесие одновременно между тремя фазами вещества – твердой, жидкой и газообразной?

4.9 Какие термодинамические параметры входят в уравнение Клапейрона-Клаузиуса?

4.10 Является ли химический потенциал паровой фазы выше химического потенциала жидкой фазы в состоянии термодинамического равновесия парожидкостной системы?

Тема 5. Термодинамические свойства реальных веществ

Программа

Опыты Эндрюса. Критическая точка. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Изотермы, изохоры и изобары реальных газов. Термодинамические свойства вещества на линии фазовых переходов. Двухфазные системы. Степень сухости двухфазной смеси, определение параметров двухфазной смеси. Термодинамические диаграммы состояния вещества ($p, v; T, v; p, s; T, s$); h, s – диаграмма водяного пара.

Литература: [1, гл. 6, §6.2-6.5, 6.8].

Методические указания

Внимательно изучите ход изотерм в опытах Эндрюса, выделите в них класс докритических и сверхкритических изотерм. Обратите внимание на критическое давление как верхнюю границу существо-

вания двухфазной области “пар-жидкость”. Сравните линии изотерм, изохор и изобар реальных газов с линиями аналогических процессов идеального газа. При изучении уравнения Ван-дер-Ваальса необходимо иметь в виду, что оно представляет модификацию уравнения состояния идеального газа и по этой причине не в состоянии описать двухфазную область. Обратите внимание на линейные уравнения, определяющие параметры парожидкостной смеси с использованием значений этих параметров на нижней и верхней пограничной кривой и значения сухости пара в рассматриваемой точке.

В отличие от p, T – диаграммы состояния вещества, на других диаграммах границы фазовых переходов образуют самостоятельные области. В этих областях при постоянных значениях p и T происходят изменения удельного объема v и энтропии s .

Важной для изучения процессов расширения влажного и сухого пара является h, s – диаграмма, в которой обратите внимание на положение критической точки и ход линий $p = \text{const}$, $T = \text{const}$, $v = \text{const}$.

Вопросы для самопроверки

- 5.1 Как изменяется плотность воды при нагреве от $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $10\text{ }^{\circ}\text{C}$?
- 5.2 Как изменяется удельная изобарная теплоемкость воды при увеличении температуры от $30\text{ }^{\circ}\text{C}$?
- 5.3 К какому виду процесса – изобарный, изотермический, изохорный – можно отнести опыты Эндрюса?
- 5.4 Какое изменение в свойствах жидкости наблюдается при переходе от докритического давления к сверхкритическому?
- 5.5 Какую точку на линии насыщения называют критической точкой?
- 5.6 Какой пар называют насыщенным?
- 5.7 Какой пар называют перегретым?
- 5.8 Как определить приведенные давление π , температуру τ и удельный объем ω по известным параметрам $p_{кр}$, $T_{кр}$ и $v_{кр}$ в критической точке?
- 5.9 Что называют влажным паром?
- 5.10 Что понимают под степенью сухости x влажного пара?
- 5.11 Можно ли, зная только степень сухости пара x и удельный объем насыщенного пара v'' , определить удельный объем влажного пара?
- 5.12 Как определяется энтальпия двухфазной смеси “пар – жид-

кость”?

5.13 Как называется линия фазового перехода “твердое тело – жидкость”?

5.14 Как называется линия фазового перехода “твердое тело – газ”?

Тема 6. Основные термодинамические процессы

Программа

Изохорный процесс, изобарный процесс, изотермический процесс, адиабатный процесс, политропный процесс. Вычисление теплоты, работы и изменения энтропии в этих процессах. Изображение процессов на p, v -, p, T -, T, s – диаграммах.

Дросселирование, эффект Джоуля-Томсона. Процессы смешения. Процессы сжатия в компрессоре, индикаторная диаграмма компрессора. Техническая работа сжатия в компрессоре. Сравнение работы сжатия в компрессоре при сжатии по адиабате, по изотерме и по политропе. Многоступенчатое сжатие в компрессоре, распределение перепада давления между ступенями компрессора.

Литература: [1, гл. 7, §7.1-7.6, 7.8-7.9].

Методические указания

При изучении темы важно освоить методы определения работы расширения (сжатия), количество подводимой (отводимой) теплоты и изменение параметров состояния термодинамической системы в рассматриваемых процессах. Использование уравнения состояния идеального газа позволяет в ряде случаев упростить расчеты и получение конечных формул.

Необходимо научиться отображать рассматриваемые процессы с помощью термодинамических диаграмм состояния вещества. Важно обратить внимание на процесс дросселирования как изоэнтальпийный процесс, который может сопровождаться как понижением, так и повышением температуры газа.

Анализ работы компрессора должен проводиться с использованием его индикаторной диаграммы, при этом следует четко отличать ее от p, v – диаграммы состояния газа. Важно обратить внимание на выигрыш в работе, получаемый при изотермическом сжатии газа по сравнению с адиабатным или политропным сжатиями. Эффективность

многоступенчатого сжатия нужно рассматривать с применением промежуточных холодильников, обеспечивающих понижение конечной температуры сжатия и приближение процесса многоступенчатого сжатия к изотермическому процессу.

Вопросы для самопроверки

6.1 Можно ли получить полезную работу расширения в изохорном процессе?

6.2 В какой вид энергии переходит сообщаемое системе тепло в изохорном процессе?

6.3 Изменением какой характеристики термодинамической системы может быть оценено сообщаемое ей тепло от окружающей среды в изотермическом процессе?

6.4 Чему равна теплоемкость c_T изотермического процесса?

6.5 Возможен ли при адиабатном процессе теплообмен между термодинамической системой и окружающей средой?

6.6 Возможен ли при политропном процессе теплообмен между термодинамической системой и окружающей средой?

6.7 Какую величину называют показателем изоэнтропы?

6.8 Как связаны между собой показатель изоэнтропы k и удельные теплоемкости c_p и c_v идеального газа?

6.9 Какие процессы относят к политропным?

6.10 В чем заключается эффект дросселирования?

6.11 В какой вид энергии переходит работа, совершаемая против сил трения, при адиабатном дросселировании?

6.12 В чем заключается эффект Джоуля-Томсона?

6.13 Может ли в процессе адиабатного дросселирования повышаться температура потока?

6.14 Чем отличается изображение работы компрессора на его индикаторной диаграмме от изображения этого процесса на p, v – диаграмме?

6.15 Какой из процессов сжатия – изотермический или адиабатный, приводит к наименьшей технической работе компрессора?

6.16 Для чего применяется многоступенчатое сжатие в компрессоре?

6.17 Изобразите процесс политропного сжатия в многоступенчатом компрессоре с промежуточным охлаждением газа на p, v - и T, s – диаграммах.

Тема 7. Процессы течения газов и жидкостей

Программа

Основные уравнения процессов течения. Частный случай адиабатного течения без трения. Скорость звука. Истечение из суживающихся сопел, критическая скорость и критическое отношение давлений. Переход через скорость звука. Сопло Лаваля. Температура адиабатного торможения.

Литература: [1, гл. 8, §8.1-8.4, 8.7].

Методические указания

При выводе уравнения течения горизонтального потока в отсутствии технической работы надо понимать, что оно является частным случаем выражения первого закона термодинамики для потока.

Интегрирование уравнения адиабатного потока позволяет установить непосредственные связи между изменением скорости в двух различных сечениях потока с изменениями энтальпии или давления между этими сечениями.

Скорость звука “ a ” в среде характеризует скорость распространения малых возмущений давления, происходящих в изоэнтропных условиях. Здесь важно подчеркнуть, что скорость звука зависит от сжимаемых свойств среды, поэтому в выражении для “ a ” присутствует давление p , удельный объем v и показатель изоэнтропы k . Только в частном случае, для идеального газа, скорость звука может быть выражена через его температуру.

Важным является анализ уравнения неразрывности для потока, из которого устанавливаются условия достижения сверхзвуковых скоростей течения использованием профилированных сопел.

Вопросы для самопроверки

7.1 Взаимодействия каких видов энергии представлены в уравнении первого закона термодинамики для потока (общее уравнение движения)?

7.2 На что будет расходоваться подводимое тепло к потоку, если течение совершается в горизонтальной плоскости без обмена технической работой с окружающей средой?

7.3 Что называется скоростью звука в среде?

7.4 В чем состоит различие между понятиями изотермической

и адиабатной скорости звука?

7.5 Справедливо ли уравнение скорости звука Лапласа для металлов?

7.6 Как изменится скорость звука в идеальном газе при увеличении его температуры?

7.7 Что понимается под критическим давлением истечения из суживающегося сопла?

7.8 Чему равна максимальная скорость истечения из суживающегося сопла?

7.9 Как изменяется скорость сверхзвукового потока в расширяющемся сопле?

7.10 Как ведет себя скорость дозвукового потока в расширяющемся сопле?

7.11 Что представляет собой сопло Лавалья?

7.12 Что понимают под температурой адиабатного торможения?

Контрольные задания и упражнения к темам 1-3

1. Пользуясь справочными данными, выразите нормальное физическое давление $p = 101,325 \text{ кПа}$ в барах, в мм ртутного столба, в мм водяного столба и в $\text{кгс}/\text{см}^2$.

2. Получите размерность удельной газовой постоянной R из уравнения состояния для 1 кг идеального газа при известных размерностях T (K), v ($\text{м}^3/\text{кг}$); p ($\text{Па} = \text{Н}/\text{м}^2$).

3. Определите количество тепла, необходимое для изобарного нагрева 5 кг водяного пара от 120°C до 420 K при средней изобарной теплоемкости $c_p = 1,91 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$.

4. Определите количество тепла, необходимое для изохорного нагрева 5 м^3 водяного пара от 120°C до 420 K при средней изохорной теплоемкости $c_v = 1,44 \text{ кДж}/(\text{м}^3\cdot\text{K})$.

5. Определите показатель адиабаты k водяного пара по данным заданий п. 3 и п. 4.

6. Определите, пользуясь формулой Майера, удельную газовую постоянную водяного пара $R_{\text{H}_2\text{O}}$ по данным заданий п. 3 и п. 4.

7. Выведите закон Бойля-Мариотта, рассматривая уравнение состояния идеального газа для произвольных точек изотермического процесса.

8. Выведите уравнение связи удельных объемов и температур

в произвольных точках изобарного процесса, пользуясь уравнением состояния идеального газа.

9. Выведите уравнение связи давлений и температур в двух произвольных точках изохорного процесса, пользуясь уравнением состояния идеального газа.

10. Выразите в джоулях энергию, равную $3 \text{ кВт} \cdot \text{час}$.

11. Вычислите работу расширения при вдуве 4 м^3 газа в объем давлением 1 МПа , выразите эту работу в килоджоулях.

12. Определите конечную удельную энтальпию водяного пара для задания п. 3, если начальная его энтальпия составляет 2717 кДж/кг .

13. Определите удельную внутреннюю энергию газа, характеризуемого давлением 98 кПа , удельным объемом $2,2 \text{ м}^3/\text{кг}$ и энтальпией 780 кДж/кг .

14. Вычислите работу проталкивания 1 кг воды в потоке между сечениями с давлениями $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ и $p_2 = 1 \text{ МПа}$. Жидкость считать несжимаемой с удельным объемом $v = 0,00103 \text{ м}^3/\text{кг}$.

15. Определите изменение энтропии в процессе испарения 1 кг воды при температуре, равной 100°C , если известно, что теплота парообразования $r = 2257 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$.

16. Определите термический к.п.д. обратимого цикла Карно, совершаемого при температурах горячего и холодного источников тепла 1000°C и 370°C .

17. Определите термический к.п.д. теплового двигателя, работающего по обратимому циклу Карно. Температура подвода теплоты 500°C , температура отвода теплоты 20°C . Определите также, сколько подводится и сколько отводится теплоты в этом двигателе, если его мощность $N = 5 \text{ МВт}$.

18. Используя полученное решение предыдущего задания п. 17, найдите изменение энтропии рабочего тела двигателя в процессах подвода и отвода теплоты.

19. Найдите полное давление бинарного газа, если парциальное давление первого газа составляет 95 кПа , а второго газа – 45 кПа .

20. Найдите объем бинарной смеси, если приведенный объем первого газа данной смеси равен $0,6 \text{ м}^3$, а приведенный объем второго газа – $1,6 \text{ м}^3$.

Задачи к темам 1-3

Задача 1 (к теме 1). Идеальный газ находится при нормальных физических условиях ($t = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $p = 101,325 \text{ кПа}$). Требуется определить его плотность по известному составу, представленному в таблице 1.

Таблица 1

| № варианта | Газ | Химическое обозначение | Относительная молекулярная масса (кг/кмоль) |
|------------|------------------|--|---|
| 1 | Воздух | – | 28,96 |
| 2 | Гелий | He_4 | 4,0026 |
| 3 | Аргон | Ar | 39,948 |
| 4 | Водород | H_2 | 2,0159 |
| 5 | Азот | N_2 | 28,0134 |
| 6 | Кислород | O_2 | 31,9988 |
| 7 | Хлор | Cl_2 | 70,906 |
| 8 | Оксид углерода | CO | 28,009 |
| 9 | Диоксид углерода | CO_2 | 44,011 |
| 10 | Сернистый газ | SO_2 | 64,0658 |
| 11 | Аммиак | NH_3 | 17,0304 |
| 12 | Газовая смесь | $He_4 (0,4 \text{ кг})$ $Ar (0,6 \text{ кг})$ | – |

Методические указания

Эта задача на определение параметров состояния идеального газа. Следовательно, для ее решения нужно использовать уравнение состояния Клапейрона:

$$pv = RT \text{ или } p = \rho RT.$$

Здесь R – удельная газовая постоянная, выражаемая как отношение универсальной газовой постоянной $\tilde{R} = 8314 \text{ Дж}/(\text{кмоль}\cdot\text{K})$ к молекулярной массе рассматриваемого газа.

Для газовых смесей выражение газовой постоянной имеет вид:

$$R_{CM} = \sum_{i=1}^n m_i R_i,$$

где m_i – массовые доли входящих в состав смеси газов; R_i – удельные газовые постоянные компонентов смеси.

После нахождения численного решения задачи необходимо убе-

даться в правильности полученной размерности для искомой плотности газа ρ , кг/м³.

Задача 2 (к теме 2) .Какое количество теплоты необходимо подвести к воздуху, заключенному в объеме $V = 50 \text{ м}^3$ при давлении p_1 и температуре t_1 , чтобы поднять его температуру до $t_2 = 600 \text{ }^\circ\text{C}$. Найти также давление p_2 в конечной точке процесса.

Таблица 2 – Варианты задания

| Номер варианта | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| p_1 , МПа | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 |
| t_1 , $^\circ\text{C}$ | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 150 | 150 | 150 | 150 |

При решении задачи необходимо воспользоваться таблицей термодинамических функций воздуха по С.Л. Ривкину [3, 9], данные из которой воспроизведены в нижеследующей таблице.

Таблица 3 – Термодинамические свойства воздуха

| t | h | u | | t | h | u |
|------------------|--------|--------|--|------------------|--------|--------|
| $^\circ\text{C}$ | кДж/кг | кДж/кг | | $^\circ\text{C}$ | кДж/кг | кДж/кг |
| 0 | 273,32 | 194,90 | | 300 | 579,05 | 414,50 |
| 20 | 293,39 | 209,23 | | 350 | 631,58 | 452,67 |
| 50 | 323,53 | 230,75 | | 400 | 684,68 | 491,42 |
| 100 | 373,92 | 266,79 | | 450 | 738,39 | 530,78 |
| 150 | 424,58 | 303,09 | | 500 | 792,70 | 570,73 |
| 200 | 475,61 | 339,77 | | 550 | 847,61 | 611,28 |
| 250 | 527,08 | 376,88 | | 600 | 903,09 | 652,41 |

Методические указания

Прежде чем приступить к непосредственному выполнению задачи, нужно сначала отметить, что она описывает изохорный процесс подвода теплоты к идеальному газу.

Принцип решения задачи основан на совместном использовании уравнения первого закона термодинамики (закона сохранения и превращения энергии) и уравнения состояния идеального газа применительно к известному его объему.

Согласно уравнению первого закона термодинамики все подводимое в изохорном процессе тепло идет на повышение внутренней

энергии газа. Последняя для идеального газа является функцией только его температуры. Данные таблицы 3 позволяют найти приращение удельной внутренней энергии ($u_2 - u_1$).

Искомое количество подводимой теплоты находится по уравнению

$$Q = M(u_1 - u_2),$$

где M – масса воздуха, заключенного в рассматриваемом объеме V . Для нахождения M следует использовать уравнение состояния идеального газа для произвольного его объема:

$$pV = MRT.$$

Давление в конечной точке изохорного процесса вычисляется по закону Бойля-Мариотта, являющегося частным следствием из общего уравнения состояния идеального газа.

Задача 3 (к теме 3). В паротурбинной установке средняя температура воды и водяного пара в процессе нагревания за счет сгоревшего топлива равна t_n . Температура конденсации пара равна 28°C . В топке сжигается G_T т/час топлива с теплотой сгорания Q_n^p МДж/кг.

Определите термический к.п.д. установки, теоретическую мощность для теоретического цикла данной паротурбинной установки и количество тепла, отдаваемое холодному источнику.

Таблица 4 – Варианты задания

| Номер варианта | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $t_n, ^\circ\text{C}$ | 325 | 350 | 375 | 400 | 425 | 450 | 475 | 500 |
| $G_T, \text{ т/час}$ | 50 | 50 | 50 | 75 | 75 | 75 | 100 | 100 |
| $Q_n^p, \text{ МДж/кг}$ | 20 | 25 | 30 | 35 | 20 | 25 | 30 | 35 |

Методические указания

Данную задачу следует рассматривать как задачу на анализ цикла тепловой машины.

В условии задачи обращаем внимание на то, что подвод и отвод тепла представлены как изотермические процессы. Следовательно, рабочий цикл, осуществляемый в данной паротурбинной установке,

может быть представлен циклом Карно.

Термический к.п.д. теоретического (обратимого) цикла Карно определяется по формуле

$$\eta_T = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

где T_1 – верхняя температура цикла, равная $(t_n + 273,15) \text{ K}$; T_2 – нижняя температура цикла, равная $(28 + 273,15) \text{ K}$.

Теоретическая мощность установки рассчитывается с учетом ее к.п.д. по следующей формуле:

$$N = \eta_T \cdot Q_1,$$

где Q_1 – количество тепла, получаемого в цикле за счет сгорания топлива в единицу времени, $Q_1 = G_T \cdot Q_H^p$.

Количество тепла, отдаваемого в конденсаторе, находится как разность между Q_1 и полученной работой (мощностью) N в цикле

$$Q_2 = Q_1 - N.$$

Контрольные задания и упражнения к темам 4-5

1. Пользуясь объединенным уравнением первого и второго законов термодинамики, выразите условие стремления к равновесию для изолированной системы.

2. Пользуясь объединенным уравнением первого и второго законов термодинамики, покажите, что для системы, у которой $V = const$ и $T = const$, в состоянии равновесия достигается минимум изохорно-изотермического потенциала $\Phi = U - TS$.

3. Пользуясь объединенным уравнением первого и второго законов термодинамики, покажите, что для системы, у которой $p = const$ и $T = const$, в состоянии равновесия достигается минимум изобарно-изотермического потенциала $\Phi = H - TS$.

4. Изобразите линии фазовых переходов между твердой, жидкой и газообразной фазами вещества на p, T – диаграмме. Укажите положение тройной точки и критической точки.

5. Найдите при помощи уравнения Клапейрона-Клаузиуса те-

плоту парообразования водяного пара при $t = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$, если удельные объемы жидкости и пара на линии фазового перехода равны

$$v' = 0,0011565 \text{ м}^3 / \text{кг}, \quad v'' = 0,12714 \text{ м}^3 / \text{кг},$$

$$\text{а производная } \frac{dP_s}{dT} = 32,55 \text{ кПа/К}.$$

6. Изобразите на p, v – диаграмме вид изотерм, полученных в опытах Эндрюса при давлениях, ниже критического. Проведите на ней пограничную кривую раздела жидкой и паровой фазы.

7. Изобразите на T, v – диаграмме изобары реального газа и проведите на ней пограничную кривую раздела жидкой и газообразной фазы.

8. Запишите уравнение состояния Ван-дер-Ваальса для реального газа и сравните его с записью уравнения состояния Клапейрона для идеального газа.

9. Вычислите постоянные “ a ” и “ b ” в уравнении Ван-дер-Ваальса для водяного пара по формулам $a = \frac{27}{64} \cdot \frac{R^2 T_{KP}^2}{p_{KP}}$; $b = \frac{v_{KP}}{3}$.

Значения параметров в критической точке возьмите из справочных таблиц, например, [4].

10. Пользуясь таблицами свойств водяного пара, например [5], вычислите удельный изобарно-изотермический потенциал для пара при $p = 1 \text{ МПа}$ и $T = 350 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

11. Постройте изотермы $T = 350\text{K}$ и $T = 600\text{K}$ для водяного пара в p, v – диаграмме с помощью уравнения Ван-дер-Ваальса. Значения постоянных “ a ” и “ b ” для уравнения Ван-дер-Ваальса возьмите из расчетов задания п. 9.

12. Пользуясь таблицами термодинамических свойств воды и водяного пара, определите агрегатное состояние воды, если заданы следующие параметры: а) $p = 5 \text{ МПа}$, $t = 310 \text{ }^{\circ}\text{C}$; б) $p = 15 \text{ МПа}$, $t = 310 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

13. Состояние водяного пара задано следующими параметрами $p = 8 \text{ МПа}$, $t = 310 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Определите объем, энтальпию, внутреннюю энергию и энтропию 1 кг пара. Для решения используйте справочные данные, например, [9].

14. Найдите степень сухости влажного пара при давлении 10 МПа, если его удельная энтальпия равна 2200 кДж/кг.

15. Изобразите на p, v – диаграмме области однофазного (твердое, жидкое, газообразное) и двухфазного (твердая фаза-жидкость, жидкость-пар, твердая фаза-пар) состояний реального ве-

щества. Выделите соответствующие пограничные кривые для двухфазных областей.

16. Покажите на h,s – диаграмме водяного пара положение пограничной кривой, отметьте на ней положение критической точки K .

17. Изобразите на h,s – диаграмме водяного пара ход изотерм и изобар.

18. Изобразите на h,s – диаграмме пограничную кривую и ход линий постоянной сухости в области влажного пара.

19. Покажите с помощью T,v – диаграммы процесс изохорного нагрева двухфазной смеси “пар-жидкость” с удельным объемом $v_{\text{дв}} < v_{\text{кр}}$ до критической температуры. Определите агрегатное состояние в конце нагрева.

20. Изобразите на T,v – диаграмме процесс изохорного нагрева двухфазной смеси “пар-жидкость” с удельным объемом $v_{\text{дв}} > v_{\text{кр}}$ до критической температуры. Определите агрегатное состояние в конце нагрева.

Задачи к темам 4-5

Задача 1 (к теме 4). При помощи уравнения Клапейрона-Клаузиуса определите теплоту парообразования r при температуре t $^{\circ}\text{C}$ и сравните ее с табличными значениями. Производную dp_s/dT найдите приближенно методом конечных разностей на основании зависимости давления насыщения от температуры насыщения, приведенной в таблице 5. Значение температуры t для своего варианта возьмите из таблицы 6.

Методические указания

Применительно к фазовому переходу “жидкость-пар” уравнение Клапейрона-Клаузиуса можно записать следующим образом:

$$\frac{dp_s}{dT} = \frac{r}{T(v'' - v')}$$

где r – теплота парообразования; v'' и v' – удельные объемы пара и воды на линии фазового перехода; T – температура фазового перехода.

Таблица 5 – Свойства воды и пара на линии насыщения

| $t_s, ^\circ\text{C}$ | P_s МПа | $v', \text{м}^3/\text{кг}$ | $v'', \text{м}^3/\text{кг}$ | $t_s, ^\circ\text{C}$ | P_s МПа | $v', \text{м}^3/\text{кг}$ | $v'', \text{м}^3/\text{кг}$ |
|-----------------------|--------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------|--------------|----------------------------|-----------------------------|
| 264 | 5,0066 | 0,0012861 | 0,03936 | 279 | 6,3228 | 0,0013292 | 0,03061 |
| 265 | 5,0872 | 0,0012887 | 0,03870 | 280 | 6,4191 | 0,0013324 | 0,03010 |
| 266 | 5,1688 | 0,0012914 | 0,03805 | 281 | 6,5165 | 0,0013356 | 0,02961 |
| 267 | 5,2514 | 0,0012942 | 0,03741 | 282 | 6,6150 | 0,0013388 | 0,02912 |
| 268 | 5,3349 | 0,0012969 | 0,03679 | 283 | 6,7147 | 0,0013420 | 0,02864 |
| 269 | 5,4195 | 0,0012997 | 0,03617 | 284 | 6,8155 | 0,0013453 | 0,02817 |
| 270 | 5,5051 | 0,0013025 | 0,03553 | 285 | 6,9174 | 0,0013487 | 0,02771 |
| 271 | 5,5917 | 0,0013053 | 0,03498 | 286 | 7,0206 | 0,0013520 | 0,02725 |
| 272 | 5,6794 | 0,0013082 | 0,03440 | 287 | 7,1249 | 0,0013554 | 0,02681 |
| 273 | 5,7681 | 0,0013111 | 0,03383 | 288 | 7,2303 | 0,0013589 | 0,02637 |
| 274 | 5,8579 | 0,0013141 | 0,03327 | 289 | 7,3370 | 0,0013624 | 0,02593 |
| 275 | 5,9487 | 0,0013170 | 0,03272 | 290 | 7,4448 | 0,0013659 | 0,02551 |
| 276 | 6,0406 | 0,0013200 | 0,03218 | 291 | 7,5539 | 0,0013695 | 0,02509 |
| 277 | 6,1336 | 0,0013232 | 0,03164 | 292 | 7,6642 | 0,0013732 | 0,02467 |
| 278 | 6,2277 | 0,0013261 | 0,03112 | 293 | 7,7757 | 0,0013769 | 0,02427 |

Таблица 6 – Варианты задания

| Номер варианта | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Температура $t, ^\circ\text{C}$ | 266 | 269 | 272 | 275 | 278 | 281 | 284 | 287 | 290 | 291 |

Для нахождения производной dp_s/dT используйте формулу следующего численного дифференцирования

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_{[0]} = \frac{-2y_{-2} - y_{-1} + y_1 + 2y_2}{10h},$$

где h – шаг таблицы по независимому аргументу (в нашем случае по температуре t_s), $y_{\pm k}$ – значения дифференцируемой функции (в нашем случае это давление p_s), взятые на $\pm k$ шаге от точки, в которой производится дифференцирование.

При решении задач обратите внимание на правильность использования размерностей физических величин. При $t = 280 ^\circ\text{C}$, $r = 1541,6$ кДж/кг.

Задача 2 (к теме 5). В барабане котельного агрегата находится кипящая вода и над ней водяной пар под давлением p , МПа. Масса воды $m_{\text{в}}$, кг. Объем барабана $V = 8 \text{ м}^3$. Какова масса пара $m_{\text{п}}$, находящегося над зеркалом испарения, если пар считать сухим насыщенным.

Таблица 7 – Варианты задания

| Номер варианта | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| p , МПа | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| $m_{\text{в}}$, кг | 4000 | 4100 | 4200 | 4300 | 4400 | 4500 | 4600 | 4700 | 4800 | 4900 |

Методические указания

Для решения задачи используйте таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара. По известной массе воды $m_{\text{в}}$ и ее удельному объему ν' можно найти объем, занимаемый насыщенной водой в барабане. Остальная часть объема барабана заполнена насыщенным паром. При известной величине парового объема и удельной плотности насыщенного пара ν'' сразу определяется масса пара.

Задача 3 (к теме 5). В сосуде находится влажный пар. Его масса 100 кг и параметры $t_1 = 270 \text{ }^\circ\text{C}$, $x_1 = 0,44$. В сосуде отсепарировано и удалено m кг воды, причем давление поддерживалось постоянным.

Определите параметры (p , ν , h , s) оставшегося в сосуде влажного пара.

Таблица 8 – Варианты задания

| Номер варианта | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|----|
| m , кг | 7,5 | 10,0 | 12,5 | 15,0 | 17,5 | 20,0 | 22,5 | 25,0 | 27,5 | 30 |

Методические указания

Для расчета термических и калорических свойств влажного пара используется формула вида

$$f_{\text{вл.п}} = f' + x(f'' - f'),$$

где f'' и f' – соответствующие параметры на линии насыщения воды и

водяного пара, находятся из справочных таблиц по одному из параметров – температуре насыщения, либо давлению насыщения, имеющих между собой однозначную связь. Обратите внимание на изобарность задаваемых условий.

Для нахождения степени сухости x влажного пара необходимо вспомнить, что она представляет относительную массовую долю сухого насыщенного пара в парожидкостной смеси. При определении p и v можно воспользоваться данными таблицы 5.

Контрольные задания и упражнения к темам 6-7

1. Используя уравнение первого закона термодинамики, получите связь между количеством теплоты и изменением внутренней энергии в изохорном процессе.

2. Оцените величину работы расширения в изохорном процессе.

3. Используя уравнение первого закона термодинамики, получите связь между количеством теплоты и изменением энтальпии в изобарном процессе.

4. Запишите выражение удельной работы расширения в изобарном процессе. Проведите анализ размерности физических величин в этом выражении и выведите единицу измерения работы.

5. Выведите формулу вычисления работы расширения в изотермическом процессе. Для вычисления интеграла $\int p dv$ используйте уравнение состояния идеального газа.

6. Запишите связь между количеством теплоты и изменением энтропии в изотермическом процессе.

7. Покажите, что в адиабатном процессе работа совершается за счет убыли внутренней энергии. Отталкивайтесь от первого закона термодинамики.

8. Запишите уравнение политропного процесса. Покажите, что при $n = \infty$ он переходит в изохорный процесс; при $n = 0$ – в изобарный; при $n = 1$ – в изотермический; $n = k$ – в адиабатный. Изобразите процессы на p, v – диаграмме.

9. Используя уравнение состояния идеального газа, получите связь между температурами и удельными объемами в двух точках адиабатного процесса.

10. Найдите работу проталкивания насоса, перекачивающего 12 *т/час* несжимаемой жидкости плотностью 800 *кг/м³*. Давления на входе и выходе насоса равны 0,4 *МПа* и 14 *МПа*.

11. В трубопроводе горячей воды установлена дроссельная шайба. Параметры воды перед дросселем: $p = 6$ *МПа*, $t = 150$ ⁰*С*. При каком давлении после дросселя начнется вскипание воды? Для решения используйте таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара.

12. В трехступенчатом компрессоре происходит сжатие газа с начальным давлением 0,1 *МПа* до 0,8 *МПа*. Найдите давление за каждой ступенью компрессора.

13. Рассчитайте скорость звука в углекислом газе (*CO₂*) при температурах 20 ⁰*С* и 750 ⁰*С*. Газ считается идеальным с показателем адиабаты $k = 1,31$.

14. Покажите, что, при прочих равных условиях в газах, скорость звука в кислороде ниже скорости звука в азоте.

15. Изобразите характер зависимости расхода G через сужающееся сопло от величины отношения давления газа на выходе из сопла, к давлению перед соплом $\psi = \frac{p_2}{p_1}$. Укажите на графике положение критического отношения $\psi_{кр}$.

Задачи к темам 6-7

Задача 1 (к теме 6). В закрытом сосуде объемом 0,8 *м³* находится диоксид углерода (*CO₂*) при p_1 , *МПа* и t_1 , ⁰*С*. Газу сообщается $Q_v = 4600$ *кДж* теплоты. Определите температуру t_2 и давление газа p_2 в конце процесса, принимая среднюю теплоемкость диоксида углерода равной $c_v = 0,747$ *кДж/кг·К*.

Таблица 9 – Варианты задания

| Номер варианта | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $p, \text{МПа}$ | 2,2 | 1,7 | 2,7 | 3,2 | 1,2 | 3,7 | 4,0 | 2,0 | 3,5 | 3,8 |
| $t_1, \text{°С}$ | 20 | 50 | 80 | 110 | 140 | 170 | 200 | 230 | 260 | 290 |

Методические указания

В данной задаче требуется провести анализ изохорного процес-

са. Из первого закона термодинамики следует, что сообщаемое газу тепло Q_v идет на изменение его внутренней энергии ΔU . Рассматривая CO_2 как идеальный газ, можно выразить изменение его внутренней энергии через изохорную теплоемкость и приращение температуры

$$\Delta U = c_v M(t_2 - t_1),$$

где M – масса газа заключенного в закрытом сосуде.

Для нахождения M следует обратиться к уравнению состояния идеального газа, записанного для M кг газа. После чего из уравнения сохранения энергии находится температура t_2 . Давление p_2 в конце процесса определяется из уравнения связи между температурами и давлениями в двух точках изохорного процесса.

При решении задачи обратите внимание на правильное использование размерностей физических величин.

Задача 2 (к теме 6). В цилиндре, площадь поперечного сечения которого равна 1 дм^2 , под поршнем находится $0,5$ кмоль азота при $t_1 = 65 \text{ }^\circ\text{C}$. Поршень находится под постоянной внешней нагрузкой F кН. Газу извне сообщается теплота Q кДж, вследствие чего он расширяется, отодвигая поршень. Определите параметры p_2 , v_2 , t_2 в конце процесса, изменение внутренней энергии ΔU , изменение энтальпии ΔH и работу расширения L , совершаемую газом.

Для решения задачи используйте термодинамические функции азота из таблицы 10.

Таблица 10 – Термодинамические функции азота

| t , $^\circ\text{C}$ | h , кДж/кг | u , кДж/кг | t , $^\circ\text{C}$ | h , кДж/кг | u , кДж/кг | t , $^\circ\text{C}$ | h , кДж/кг | u , кДж/кг |
|---------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------|-----------------|-----------------|
| 50 | 335,26 | 239,35 | 350 | 651,68 | 466,73 | 650 | 986,34 | 712,34 |
| 100 | 387,30 | 276,55 | 400 | 705,95 | 506,16 | 700 | 1044,18 | 755,35 |
| 150 | 439,49 | 313,90 | 450 | 760,81 | 546,18 | 750 | 1102,55 | 798,88 |
| 200 | 491,94 | 351,51 | 500 | 816,29 | 586,81 | 800 | 1161,43 | 842,92 |
| 250 | 544,73 | 389,46 | 550 | 872,37 | 628,06 | 850 | 1220,78 | 887,43 |
| 300 | 597,96 | 427,84 | 600 | 929,06 | 669,91 | 900 | 1280,57 | 932,38 |

Таблица 11 – Варианты задания

| Номер варианта | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $F, \text{кН}$ | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,5 | 5,0 | 5,5 | 6,0 | 6,5 |
| $Q, \text{кДж}$ | 6300 | 6500 | 6700 | 6900 | 7100 | 7300 | 7500 | 7700 | 7900 | 8100 |

Методические указания

Прежде всего, отмечаем, что в задаче исследуется изобарный процесс. Для нахождения давления используйте сведения о силе действия F на поршень и площади сечения S поршня, на которую эта сила действует.

Для нахождения изменения полной энтальпии ΔH используйте уравнение первого закона термодинамики

$$Q = \Delta H - V\Delta p$$

при условии, что $\Delta p = 0$.

При вычислении изменения удельной энтальпии $\Delta h, \text{кДж/кг}$ необходимо заданное количество массы азота выразить в кг. Поиск термодинамических параметров в конце процесса начните с определения, пользуясь таблицей 10, начальных параметров, включая h_1 , по заданной температуре t_1 . Затем, найдя $h_2 = h_1 + \Delta h$, определите параметры газа в конце процесса.

Работа расширения L , совершаемая газом, равна $L = p(V_2 - V_1)$. Здесь для нахождения V_1 следует использовать уравнение состояния газа в исходном состоянии, а для нахождения V_2 уравнение связи между объемами и температурами в изобарном процессе.

Задача 3 (к теме 7). Из суживающегося сопла вытекает газ, находящийся в резервуаре, давление и температура в котором постоянны и соответственно равны: $p_0 = 0,6 \text{ МПа}$ и $t_0 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$. Давление среды, в которую происходит истечение $p_2 = 0,36 \text{ МПа}$.

Определите скорость истечения и расход газа, если площадь выходного сечения сопла $f = 20 \text{ мм}^2$.

Газ подчиняется уравнению $pv = RT$, теплоемкость не зависит от температуры. Входная скорость близка к нулю. Процесс истечения газа – изоэнтропный.

Таблица 12 – Варианты задания

| Номер варианта | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--|-------------------|--------|---------------|---------------|---------------|------------------|
| Вид газа | Кислород O_2 | Воздух | Гелий He | Азот N_2 | Аргон Ar | Водород H_2 |
| Относительная молекулярная масса, кг/кмоль | 32,000 | 28,970 | 4,003 | 28,016 | 39,948 | 2,016 |
| Показатель адиабаты, k | 1,4 | 1,4 | 1,67 | 1,4 | 1,67 | 1,4 |

Методические указания

Прежде всего определите режим истечения, является он докритическим или сверхкритическим. Для этого сравните действующее отношение давлений $\beta = \frac{P_2}{P_0}$ с критическим отношением

$$\beta_{кр} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \text{ для данного газа.}$$

Определив режим истечения можно рассчитать теоретическую скорость истечения из сопла w_2 , выбрав соответствующую полученному $\beta > \beta_{кр}$ или $\beta < \beta_{кр}$ формулу из литературного источника, например [1].

Массовый секундный расход газа находится при помощи формулы неразрывности

$$G_T = \frac{fw_2}{v_2}.$$

Удельный объем газа в выходном сечении суживающегося сопла v_2 следует находить из уравнения адиабатного процесса

$$v_2 = v_0 \left(\frac{p_0}{p_2} \right)^{\frac{1}{k}},$$

где удельный объем газа v_0 в резервуаре вычисляется из уравнения состояния идеального газа по известным параметрам p_0 и t_0 .

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

Тема 8. Теплосиловые газовые циклы

Программа

Циклы поршневых двигателей. Цикл Отто с изохорным подводом тепла. Цикл Дизеля с изобарным подводом тепла. Цикл Тринклера со смешанным подводом тепла. Изображение циклов ДВС на p, v - и T, s – диаграммах. Термический коэффициент полезного действия этих циклов, их сравнительные характеристики.

Циклы газотурбинных установок. Цикл Брайтона со сгоранием при $p = \text{const}$ с изотермическим и адиабатным сжатием воздуха в компрессоре. Термический коэффициент полезного действия цикла. Изображение циклов ГТУ на p, v - и T, s – диаграммах.

Цикл газотурбинной установки со сгоранием при $V = \text{const}$.

Литература: [1, гл. 10, §10.1, 10.2].

Методические указания

При изучении циклов поршневых двигателей обратите внимание на новые понятия – степень сжатия ϵ , степень предварительного расширения ρ в изобарном процессе сгорания, степень повышения давления λ в изохорном процессе сгорания. Проследите за влиянием этих величин на термический коэффициент полезного действия циклов. Чтобы перейти от общих формул расчета термического к.п.д. циклов к конечным их выражениям необходимо умение использовать основные соотношения процессов идеального газа.

Изучение циклов газотурбинных установок начните с того, что выделите отдельные технические устройства, в которых совершаются процессы сжатия, расширения и работы цикла. Проследите за влиянием повышения степени давления в процессе сжатия на величину термического к.п.д. цикла газотурбинной установки. С помощью T, s – диаграммы убедитесь в термодинамическом преимуществе цикла с адиабатным сжатием в компрессоре по отношению к циклу с изотермическим сжатием.

Вопросы для самопроверки

- 8.1 В чем состоит различие между циклами Отто и Дизеля?
- 8.2 За счет чего происходит воспламенение топлива при цикле Дизеля?

8.3 К какому типу процессов можно отнести процесс отвода тепла холодному источнику в циклах двигателей внутреннего сгорания?

8.4 Что понимается под термином “степень сжатия” ε ?

8.5 Что понимается под термином “степень предварительного расширения” ρ ?

8.6 Какие типы процессов охватывает подвод тепла в цикле Тринклера?

8.7 Какое назначение имеет компрессор в газотурбинной установке?

8.8 В какой вид энергии преобразуется работа расширения продуктов сгорания в газотурбинной установке?

8.9 К какому типу основных термодинамических процессов относится сгорание топлива в цикле Брайтона?

8.10 Как повлияет на величину термического к.п.д. цикла Брайтона переход от адиабатного сжатия в компрессоре к политропному?

Тема 9. Теплосиловые паровые циклы

Программа

Циклы Карно и Ренкина на влажном паре. Цикл Ренкина с перегревом пара. Изображение цикла Ренкина на p, v -, T, s - и h, s – диаграммах. Термический к.п.д. цикла Ренкина, теоретическая работа турбины и насоса. Анализ цикла Ренкина с учетом необратимых потерь, действительная работа турбины и насоса. Внутренние относительные к.п.д. турбины, насоса и цикла в целом. Цикл с промежуточным перегревом пара. Регенеративный цикл. Бинарные циклы. Теплофикационные циклы.

Литература: [1, гл. 11, §11.1, 11.7].

Методические указания

Изучение циклов совмещайте с рассмотрением принципиальных схем теплосиловых установок и назначения, присутствующих на схемах агрегатов. Обратите внимание, что цикл Ренкина на влажном паре появился как усовершенствование цикла Карно. Введение в цикл Ренкина первичного и промежуточного перегрева пара, а также использование регенерации тепла, следует рассматривать с позиций повышения термического к.п.д. цикла и преодоления проблем, связан-

ных с технологическими ограничениями допустимой температуры в пароперегревателе и влажности пара в конечных ступенях турбины.

Обратите внимание на различие обратимых и необратимых процессов расширения в турбине и сжатия в насосе, для этого проанализируйте действительные процессы повышения давления воды в насосе и расширения пара в турбине на h,s - и T,s – диаграммах. Сопоставьте конечные параметры этих процессов для обратимых и действительных процессов.

При рассмотрении теплофикационного парового цикла обратите внимание, что оценка его эффективности производится через коэффициент использования тепла, учитывающий, в отличие от термического к.п.д. цикла, также тепло, отданное внешнему потребителю.

Вопросы для самопроверки

9.1 В каком техническом устройстве осуществляется процесс сжатия для цикла Ренкина?

9.2 Какие термодинамические параметры сохраняют постоянство в процессе отвода тепла от пара в конденсаторе?

9.3 Чем ограничивается верхняя температура парового цикла Карно?

9.4 Для чего в цикле Ренкина применяют перегрев пара?

9.5 Что понимают под внутренним относительным к.п.д. турбины?

9.6 К какому виду основных термодинамических процессов относят обратимый процесс расширения пара в турбине?

9.7 Как с помощью h, s – диаграммы определяется работа пара в турбине?

9.8 Почему в турбинах высокого давления применяют промежуточный перегрев пара?

9.9 Каким образом ведет себя энтропия пара в обратимом и действительном процессах расширения в турбине?

9.10 В каком из двух процессов расширения пара в турбине – обратимом или необратимом, влажность пара на выходе из турбины оказывается выше?

9.11 Что является нагреваемой средой в регенеративных теплообменниках турбоустановки?

9.12 Что называется теплофикацией?

9.13 Для чего служат теплофикационные турбины?

9.14 Что называют коэффициентом использования тепла на те-

плоэлектроцентралях?

Тема 10. Холодильные циклы

Программа

Обратные тепловые циклы. Холодильные установки, холодильный коэффициент ε , обратимый холодильный цикл Карно. Цикл воздушной холодильной установки, отображение цикла на p , v - и T,s – диаграммах, холодильный коэффициент цикла воздушной холодильной установки.

Парокомпрессорная холодильная установка, схема установки и ее термодинамический цикл, оценка эффективности цикла. Хладоагенты и их сравнительные характеристики. Цикл парожетворной холодильной установки. Принципы работы теплового насоса.

Литература: [1, гл. 13, §13.1-13.4, 13.7].

Методические указания

При изучении темы внимательно разберите назначение каждого устройства в схеме холодильной установки. Обратите внимание на то, что, в отличие от термического к.п.д. прямого цикла, величина холодильного коэффициента может превышать единицу. Выделите различие между процессами расширения в холодильном цикле без совершения и с совершением работы в детандре.

Рассмотрите сходство цикла парокомпрессорной холодильной установки с обратным циклом Ренкина, осуществляемом во влажном паре с изотермическими условиями подвода и отвода тепла. При сравнении различных хладоагентов обратите внимание на связь между требуемым расходом и теплотой парообразования.

При изучении работы теплового насоса отталкивайтесь от принципов работы холодильной установки, предназначенной для решения задач нагрева теплоприемника путем частичного использования тепла, отводимого от холодного источника.

Вопросы для самопроверки

10.1 Какое назначение имеют холодильные циклы?

10.2 Как оценивается термодинамическая эффективность цикла холодильной установки?

10.3 Для чего используется детандер?

10.4 Может ли холодильный коэффициент быть больше единицы?

10.5 Как ведет себя температура хладагента воздушной холодильной установки в процессе отбора тепла из охлаждаемого объема?

10.6 На что затрачивается подводимая в холодильном цикле внешняя работа?

10.7 Может ли в цикле холодильной машины работа расширения хладагента превышать работу его сжатия?

10.8 Изменяется ли температура хладагента парокомпрессорной холодильной установки в процессе отбора тепла из охлаждаемого объема?

10.9 На каком участке цикла парокомпрессорной холодильной установки применяется процесс дросселирования хладагента?

10.10 Какое свойство хладагента существенно влияет на его требуемый расход в холодильной машине?

10.11 Что отличает тепловой насос от холодильной установки?

10.12 В чем сходство работ теплового насоса и холодильной установки?

10.13 Какой величиной оценивается эффективность теплового насоса?

Тема 11. Влажный воздух

Программа

Основные понятия. Влагосодержание, абсолютная и относительная влажность. Калорические свойства влажного воздуха. Психрометр. h,d – диаграмма влажного воздуха, изображение пути осушки воздуха.

Литература: [1, гл.14, §14.1-13.2]

Методические указания

Влажный воздух рассматривается как разновидность газовой смеси, парциальное давление одного из компонентов которой – паров воды, не может превышать давление насыщения водяного пара при данной температуре влажного воздуха.

Поскольку при рассмотрении свойств влажного воздуха используется модель идеального газа, рекомендуется предварительно вос-

становить знания о свойствах идеальных газовых смесей из ранее изученного раздела.

В соответствии с установленной практикой начало отсчета энтальпии воды ведется от 0°C , поэтому при расчете энтальпии водяного пара вместе с теплотой его нагрева от 0°C до заданной температуры $t^{\circ}\text{C}$ необходимо учитывать теплоту парообразования при 0°C .

При изучении косоугольной h,d – диаграммы влажного воздуха, которая, надо иметь в виду, построена для атмосферного давления, следует обратить внимание на излом изотерм при прохождении их из области насыщенного воздуха в область тумана. В последнем случае рост влагосодержания происходит за счет жидкой фазы, энтальпия которой не содержит теплоты фазового перехода в пар.

Вопросы для самопроверки

11.1 Можно ли влажный воздух рассматривать как газовую смесь?

11.2 Что из себя представляет сухой воздух?

11.3 В чем состоит принципиальное отличие влажного воздуха от обычных газовых смесей?

11.4 Какие агрегатные состояния воды могут присутствовать во влажном воздухе?

11.5 Каково максимальное парциальное давление пара во влажном воздухе?

11.6 Что называют массовым влагосодержанием воздуха?

11.7 Что называют относительной влажностью воздуха?

11.8 Какую температуру характеризует точка росы?

11.9 Как соотносятся между собой температура мокрого термометра в психрометре и температура точки росы?

11.10 Какие области состояния влажного воздуха разделяет линия насыщения водяным паром на h,d – диаграмме?

11.11 Изменяется ли массовое влагосодержание ненасыщенного воздуха при его нагреве?

11.12 Изменяется ли относительная влажность ненасыщенного воздуха при его нагреве?

Тема 12. Элементы химической термодинамики

Программа

Первый закон термодинамики в применении к процессам с хими-

ческими превращениями. Теплоты химических реакций. Закон Гесса. Уравнение Кирхгофа. Применение второго закона термодинамики к процессам с химическими превращениями. Уравнение Гиббса – Гельмгольца. Равновесие в химических реакциях. Константа равновесия химических реакций. Тепловой закон Нернста.

Литература: [1, гл.15, §15.1-15.4]

Методические указания

В отличие от ранее изученных основных термодинамических процессов, протекающих при одном неизменном параметре термодинамической системы, анализ теплового эффекта химических реакций производится при двух неизменных параметрах $V = \text{const}$ и $T = \text{const}$ или $p = \text{const}$ и $T = \text{const}$. Важно закрепить, что тепловые эффекты изохорно-изотермической и изобарно-изотермической реакций определяются только начальными и конечными состояниями системы и не зависят от промежуточных стадий. Необходимо обратить внимание на связи соответствующих тепловых эффектов с изменениями внутренней энергии и энтальпии рассматриваемой системы.

Применение второго закона термодинамики к системе с химическими превращениями следует рассматривать с точки зрения нахождения условий ее равновесия, когда ход обратимых реакций в прямом и обратном направлениях не приводит к изменению концентраций продуктов реакции. Уравнение Гиббса-Гельмгольца представляет математическое выражение этого закона.

При рассмотрении константы равновесия нужно обратить внимание на ее связь с уравнениями действующих масс химической реакции. Рассмотрение теплового закона Нернста следует проводить с учетом того, что он охватывает различные по химическому составу вещества вблизи абсолютного нуля.

Вопросы для самопроверки

12.1 Какие химические реакции относятся к эндотермическим и к экзотермическим?

12.2 Что понимают под тепловым эффектом реакции?

12.3 Какая существует связь изохорного Q_v и изобарного Q_p тепловых эффектов с внутренней энергией U и энтальпией I системы?

12.4 Как формулируется закон Гесса?

12.5 Каковы основные следствия из закона Гесса?

- 12.6 Как формулируется закон Кирхгоффа для производной от теплового эффекта по температуре?
- 12.7 Как записывается уравнение Гиббса-Гельмгольца?
- 12.8 Что представляет собой константа равновесия K_c ?
- 12.9 Что такое константа равновесия K_p ?
- 12.10 Какая связь между константами равновесия K_c и K_p ?
- 12.11 Как формулируется принцип смещения равновесия Ле-Шателье-Брауна?
- 12.12 Как формулируется тепловой закон Нернста?
- 12.13 Какую формулировку закона Нернста вывел Планк?

Контрольные задания и упражнения к темам 8-11

1. Изобразите на p, v - и T, s – диаграммах идеализированный цикл ДВС (двигатель внутреннего сгорания) с подводом тепла при постоянном объеме ($v = \text{const}$).
2. Выведите формулу для термического к.п.д. цикла Отто (с подводом тепла при $v = \text{const}$), используя в конечном выражении величину степени сжатия $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$ (здесь v_1 и v_2 – удельные объемы рабочего тела до и после сжатия).
3. Постройте график зависимости η_T цикла Отто от величины степени сжатия ε в интервале изменения ε от 1 до 10.
4. Изобразите на p, v - и T, s – диаграммах идеализированный цикл ДВС с подводом тепла при постоянном давлении ($p = \text{const}$).
5. Нарисуйте принципиальную схему ГТУ (газотурбинной установки) с подводом тепла при постоянном давлении ($p = \text{const}$), изобразите на p, v - и T, s – диаграммах идеализированный цикл работы такой установки с изотермическим сжатием воздуха в компрессоре.
6. Сравните на T, s – диаграмме циклы ГТУ с подводом тепла при $p = \text{const}$, когда сжатие воздуха в компрессоре является: а) изотермическим, б) адиабатным. Покажите что термический к.п.д. цикла с адиабатным сжатием в компрессоре превышает к.п.д. цикла с изотермическим сжатием, $\eta_T^{ад} > \eta_T^{изотерм}$.
7. Изобразите цикл Карно в области влажного пара на p, v - и T, s – диаграммах. Проследите изменение формы цикла при увеличении температуры подвода тепла.

8. Изобразите цикл Ренкина без перегрева пара и с перегревом пара на p, v - и T, s – диаграммах

9. Выведите формулу термического к.п.д. цикла Ренкина с перегревом пара, выделите в ней слагаемые, выражающие полезную работу турбины и техническую работу насоса.

10. Выведите формулу термического к.п.д. цикла Ренкина с одним промежуточным перегревом пара, изобразите этот цикл на T, s - и h, s – диаграммах.

11. Изобразите на T, s – диаграмме действительные процессы расширения пара в турбине и сжатия воды в насосе при наличии необратимых потерь.

12. Нарисуйте принципиальную схему паротурбинной установки, работающей по циклу Ренкина с одним промежуточным перегревом пара.

13. Нарисуйте принципиальную схему паротурбинной установки с четырьмя регенеративными подогревателями питательной воды.

14. Используя таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара, определите термический к.п.д. идеального цикла Ренкина, в котором начальная температура и давление пара равны $t_1 = 600$ °С; $p_1 = 12$ МПа, а конечное давление $p_2 = 0,02$ МПа.

Постройте кривую зависимости η_T от p_1 , приняв его равным 12, 15, 18, 21, 24 МПа.

15. Определите внутренний относительный к.п.д. турбины η_{oi}^T , если внутренние потери вследствие необратимости процесса расширения пара в турбине составляют 138 кДж/кг. Состояние пара перед турбиной $p_1 = 10$ МПа, $t_1 = 500$ °С, давление в конденсаторе $p_2 = 40$ гПа.

Для решения используйте таблицы термодинамических свойств или h, s – диаграмму водяного пара.

16. Нарисуйте принципиальную схему воздушной холодильной установки с детандером.

17. Изобразите на p, v - и T, s – диаграммах цикл воздушной холодильной установки с адиабатным процессом расширения воздуха в детандере и адиабатным сжатием его в компрессоре.

18. Выразите холодильный коэффициент $\varepsilon = \frac{q_2}{l_c}$, где q_2 – тепло, отбираемое от холодильного источника; l_c – работа, подводимая в цикле, для обратимого холодильного цикла Карно через верхнюю T_1 ,

и нижнюю T_2 температуры цикла.

19. Нарисуйте принципиальную схему парокомпрессионной холодильной установки, использующей в качестве хладагента влажный пар легкокипящей жидкости.

20. Изобразите на T,s – диаграмме цикл парокомпрессионной холодильной установки с влажным паром.

21. Запишите выражение для холодильного коэффициента парокомпрессионного цикла через энтальпии влажного пара в характерных точках этого цикла.

22. Определите изобарную теплоемкость влажного воздуха при следующих параметрах: влагосодержание воздуха $d = 0,02$ кг. влаги/кг. сухого воздуха; удельная изобарная теплоемкость сухого воздуха $c_{p,v} = 1$ кДж/кг·К, удельная изобарная теплоемкость водяного пара $c_{p,n} = 1,96$ кДж/кг·К.

23. Найдите энтальпию I влажного воздуха при следующих условиях: температура влажного воздуха $t = 50$ °С; влагосодержание воздуха $d = 0,02$; теплоемкости сухого воздуха $c_{p,v} = 1$ кДж/кг·К, водяного пара $c_{p,n} = 1,96$ кДж/кг·К; энтальпии при $t = 0$ °С – сухого воздуха $i_e(0$ °С) = 0; водяного пара $i_n(0$ °С) = 2501 кДж/кг.

24. Решите предыдущее задание, пользуясь h,d – диаграммой влажного воздуха, и сравните между собой полученные результаты.

Задачи к темам 8-11

Задача 1 (к теме 8). Газотурбинная установка (ГТУ), в которой топливо сгорает при $p = const$, работает при следующих параметрах: температура и давление газа перед входом в компрессор равны t_1 °С и $p_1 = 0,09$ МПа, степень повышения давления – β , температура газов перед соплами турбины t_3 равна 750 °С. Внутренние относительные к.п.д. турбины и компрессора равны $\eta_{o,i}^T$ и $\eta_{o,i}^K$.

Рассчитайте значения внутреннего к.п.д. установки. Определите также термический к.п.д. установки, приняв показатель адиабаты $k = 1,4$.

Методические указания.

Для нахождения внутреннего к.п.д. ГТУ и термического к.п.д. этой установки нужно рассмотреть действительный 1-2д-3-4д-1 и обратимый 1-2-3-4-1 циклы газотурбинной установки со сгоранием топ-

лива при $p_2 = const$ и адиабатным сжатием в компрессоре.

Таблица 13 – Варианты задания

| Номер варианта | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $t_1, ^\circ C$ | 5 | 5 | 10 | 10 | 15 | 15 | 20 | 20 | 25 | 25 |
| β | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| η_{oi}^T | 0,80 | 0,84 | 0,88 | 0,91 | 0,91 | 0,86 | 0,84 | 0,87 | 0,80 | 0,80 |
| η_{oi}^K | 0,80 | 0,82 | 0,84 | 0,80 | 0,91 | 0,83 | 0,82 | 0,81 | 0,80 | 0,80 |

Рассмотрение внутреннего к.п.д. цикла полезно начать с общего его определения как отношения действительной полезной работы цикла l_u° к действительному количеству подведенного тепла q_1° :

$$\eta_i^{ГТУ} = \frac{l_u^\circ}{q_1^\circ} = \frac{l_T^\circ - l_K^\circ}{q_1^\circ},$$

где l_T°, l_K° – действительные работы турбины и компрессора.

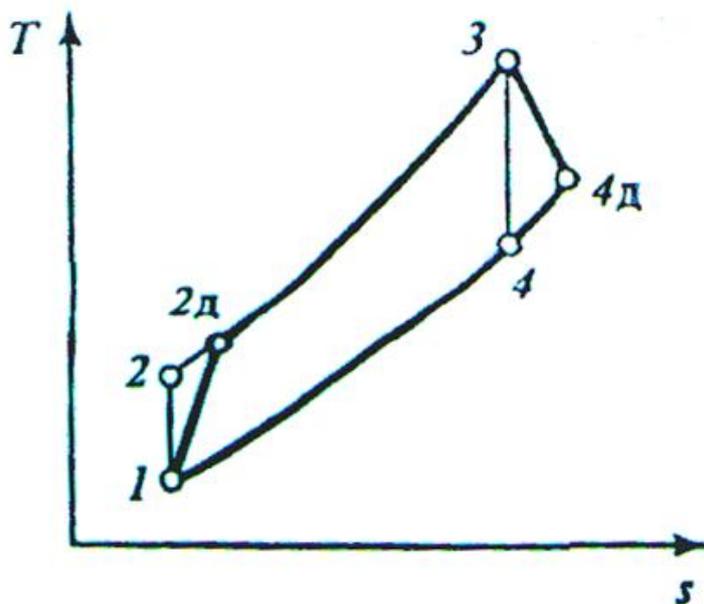


Рисунок 1 – Необратимый цикл ГТУ со сгоранием топлива при $p = const$

При известных величинах внутреннего относительного к.п.д. турбины η_{oi}^T и компрессора η_{oi}^K можно в числителе перейти к использованию теоретических работ в обратимых процессах, тогда

$$\eta_i^{ГТУ} = \frac{l_T^T \eta_{oi}^T - l_K^T / \eta_{oi}^K}{q_1^\delta}, \quad (a)$$

где $l_T^T = h_3 - h_4$ – теоретическая работа турбины;

$l_T^K = h_2 - h_1$ – теоретическая работа компрессора;

$q_1^\delta = h_3 - h_{2\delta}$.

Так как в условии задачи нет указаний по выбору теплоемкости газа, считая ее постоянной, можно совершить переход от удельных энтальпий к температурам:

$$l_T^T = c_p (t_3 - t_4),$$

$$l_T^K = c_p (t_2 - t_1),$$

$$q_1^\delta = c_p (t_3 - t_{2\delta}).$$

Таким образом, расчет $\eta_i^{ГТУ}$ по формуле (a) сводится к расчету температур в характерных точках процесса.

При нахождении температур $t_2 = T_2 - 273,15$ и $t_4 = T_4 - 273,15$ используйте уравнение связи между температурой T и давлением p в адиабатных процессах сжатия между точками 1-2 и расширения – 3-4. Для определения давления p_2 в условии задачи указана степень повышения давления в компрессоре β .

Значение неизвестной температуры $t_{2\delta}$ в конце действительного процесса сжатия находится с помощью основной формулы внутреннего относительного к.п.д. компрессора

$$\eta_{oi}^K = \frac{h_2 - h_1}{h_{2\delta} - h_1} = \frac{t_1 - t_2}{t_{2\delta} - t_1}.$$

Для нахождения термического к.п.д. цикла ГТУ на идеальном газе необходимо воспользоваться известной формулой:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}}.$$

Задача 2 (к теме 9). Паротурбинная установка работает по циклу Ренкина с начальными параметрами перед турбиной p_1 и t_1 . Давление в конденсаторе $p_2 = 4$ кПа.

Определите термический к.п.д. цикла Ренкина и сравните его с термическим к.п.д. цикла Карно в том же интервале температур.

Таблица 14 – Варианты задачи

| Номер варианта | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $p_1, \text{МПа}$ | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 21 | 24 | 25 | 26 |
| $t_1, ^\circ\text{C}$ | 480 | 490 | 500 | 510 | 520 | 530 | 540 | 550 | 560 | 570 |

Методические указания

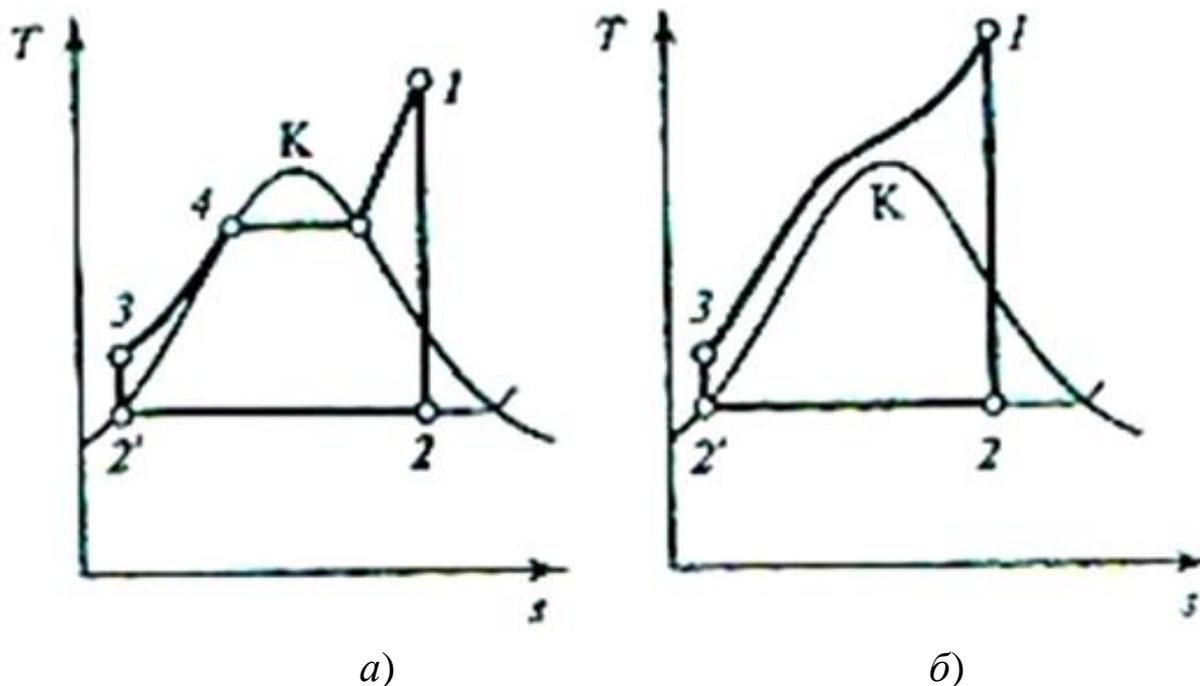


Рисунок 2 – Обратимые циклы Ренкина с перегретым паром (а) и паром со сверхкритическим давлением (б)

Решение задачи начните с построения T,s – диаграммы цикла Ренкина для рассматриваемой паротурбинной установки. Обратите внимание, что при $p_1 < 22,115$ МПа (докритические давления) имеем цикл Ренкина с перегретым паром, а при $p_1 > 22,115$ МПа – с паром со сверхкритическим давлением.

Расчет термического к.п.д. цикла Ренкина производится по формуле

$$\eta_t = \frac{l_u^{обр}}{q_1} = \frac{l_{турб}^{теор} - l_{нас}^{теор}}{q_1} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_3 - h_{2'})}{h_1 - h_3}.$$

Здесь $l_u^{обр}$ – работа обратимого цикла, равная разности теоретической работы, полученной в турбине $l_{турб}^{теор}$ и технической работы питательного насоса $l_{нас}^{теор}$; q_1 – тепло, подведенное в цикле рабочему телу. Для их расчета необходимо определить энтальпию рабочего тела в характерных точках цикла с помощью таблиц теплофизических свойств воды и водяного пара [4].

По известным начальным параметрам p_1 и t_1 определяется энтальпия h_1 и энтропия s_1 пара на входе турбины. Процесс расширения в турбине 1-2 считается изоэнтропным, поэтому $s_2 = s_1$. По известным значениям давления p_2 и энтропии s_2 на выходе из турбины находится значение энтальпии h_2 в конце процесса расширения. Разность $(h_1 - h_2)$ определяет теоретическую работу турбины.

Процесс отвода тепла в конденсаторе 2-2' совершается по изобаре p_2 до ее пересечения с линией насыщения для воды.

Таким образом, находятся $h_{2'} = h'(p_2)$ и $s_{2'} = s'(p_2)$.

Процесс сжатия воды 2'-3 от p_2 до p_1 в насосе считается также изоэнтропным, поэтому $s_3 = s_{2'}$. По известным давлению p_1 и энтальпии s_3 на выходе из насоса определяется энтальпия h_3 воды в точке начала подвода теплоты.

Когда найдены значения энтальпий в характерных точках процесса, можно вычислить термический к.п.д. всего цикла Ренкина.

Для нахождения термического к.п.д. цикла Карно в том же интервале температур нужно знать верхнюю T_1 и нижнюю T_2 температуры цикла:

$$\eta_T^K = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Значение верхней температуры T_1 берется из условия задачи. Значение нижней температуры T_2 определяется с помощью термодинамических таблиц по заданному значению давления насыщения p_2 в конденсаторе.

Задача 3 (к теме 10). Парокомпрессорная холодильная установка в качестве рабочего тела использует фреон-12. Компрессор всасывает влажный пар сухостью x_1 и изоэнтропно сжимает его, превращая в сухой насыщенный пар при давлении, соответствующем температуре конденсации t_2 °С. Из компрессора фреон поступает в конденсатор, где при постоянном давлении p_2 превращается в жидкость. Жидкость при давлении p_2 и температуре t_2 направляется в дроссельный (редукционный) вентиль, где она изоэнтальпийно дросселируется до давления p_1 , соответствующего температуре испарения $t_1 = -12$ °С. При этой температуре фреон поступает в охлаждаемый объем, где, забирая теплоту от находящихся в нем тел, испаряется, образуя влажный пар со степенью сухости x_1 .

Определите: удельную холодопроизводительность холодильной установки; теплоту, отдаваемую в конденсаторе; работу, затраченную в цикле и холодильный коэффициент.

Таблица 15 – Варианты задания

| Номер варианта | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| $t_2, ^\circ\text{C}$ | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 |

Необходимые термодинамические свойства фреона-12 представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Термодинамические свойства фреона-12 в состоянии насыщения

| T | p_s | h' | h'' | s' | s'' | r |
|--------|--------------|-----------------|-----------------|------------------------------|------------------------------|-----------------|
| K | МПа | кДж/кг | кДж/кг | $\text{кДж/кг}\cdot\text{K}$ | $\text{кДж/кг}\cdot\text{K}$ | кДж/кг |
| 261,15 | 0,2036 | 388,8 | 547,5 | 3,958 | 4,566 | 158,7 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 283,15 | 0,4228 | 409,6 | 557,3 | 4,034 | 4,556 | 147,7 |
| 285,15 | 0,4491 | 411,5 | 558,3 | 4,041 | 4,555 | 146,7 |
| 287,15 | 0,4766 | 413,4 | 559,0 | 4,047 | 4,554 | 145,6 |
| 289,15 | 0,5053 | 415,4 | 559,8 | 4,054 | 4,554 | 144,5 |
| 291,15 | 0,5352 | 417,3 | 560,7 | 4,061 | 4,553 | 143,3 |
| 293,15 | 0,5665 | 419,3 | 561,5 | 4,067 | 4,552 | 142,2 |
| 295,15 | 0,5991 | 421,2 | 562,3 | 4,074 | 4,552 | 141,0 |
| 297,15 | 0,6331 | 423,2 | 563,1 | 4,081 | 4,551 | 139,9 |
| 299,15 | 0,6685 | 425,2 | 563,9 | 4,087 | 4,551 | 138,7 |
| 301,15 | 0,7053 | 427,2 | 564,6 | 4,094 | 4,550 | 137,4 |

Методические указания

Изобразите теоретический цикл парокомпрессорной холодильной установки на влажном паре в T, s – диаграмме. Решение задачи выполните с помощью таблицы термодинамических свойств фреона-12.

1. Удельная холодопроизводительность установки, т.е. количество теплоты, поглощаемое 1 кг фреона-12 в охлаждающем объеме, определяется разностью энтальпий в точках 1 и 3:

$$q_0 = h_1 - h_3.$$

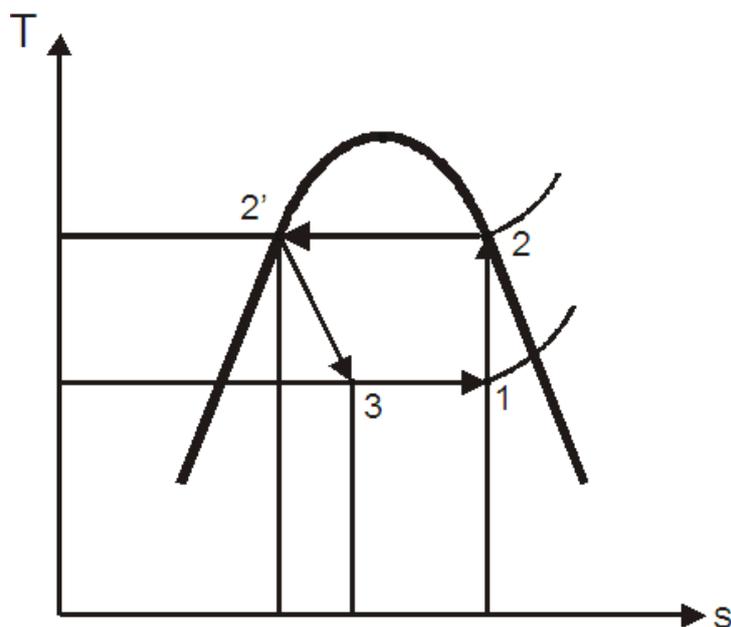


Рисунок 3 – Цикл парокомпрессорной холодильной установки на влажном паре

Для энтальпии двухфазной смеси h_1 справедлива формула

$$h_1 = h'(T_1) + r(T_1)x_1.$$

При нахождении x_1 нужно учесть изоэнтропный характер сжатия фреона в компрессоре, который позволяет найти сначала значение энтропии $s(x_1)$ по уравнению

$$s_1 = s(x_1) = s_2 = s''(T_2).$$

Значение энтропии и степени сухости пара в точке 1 связаны известным уравнением

$$s_1 = s'(T_1) + x_1 [s''(T_1) - s'(T_1)],$$

из которого находится x_1 .

Так как процесс дросселирования через редукционный клапан является изоэнтальпийным, то $h_3 = h_{2'} = h'(T_2)$.

2. Теплота q_1 , отданная в конденсаторе, равная $h_2 - h_{2'} = r(T_2)$, может быть найдена с помощью таблиц.

3. Работа, затраченная в цикле, вычисляется как разность теплоты, переданной в конденсаторе и полученной в охлаждающем объеме: $l_{ц} = q_1 - q_0$.

4. Холодильный коэффициент $\varepsilon = \frac{q_0}{l_{ц}}$.

БИБЛИГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Основная

1. Кириллин, В.А. Техническая термодинамика / В.А. Кириллин, В.В. Сычев, А.Е. Шейндлин. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 496 с.
2. Ляшков, В.И. Теоретические основы теплотехники / В.И. Ляшков. – М.: Высшая школа, 2008. – 318 с.
3. Сборник задач по технической термодинамике / Т.Н. Андрианова, Б.В. Дзампов, В.Н. Зубарев, С.А. Ремизов, Н.Я. Филатов. – М.: Изд-во МЭИ, 2000. – 356 с.
4. Кудинов, В.А. Техническая термодинамика / В.А. Кудинов, Э.М. Карташов. – М.: Высшая школа, 2003. – 430 с.
5. Александров, А.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара / А.А. Александров, Б.А. Григорьев. – М.: Изд-во МЭИ, 1999. – 168 с.

Дополнительная

6. Теплотехника / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и [др.]. – М.: Высшая школа, 2003. – 671 с.
7. Таиров, Э.А. Практикум по технической термодинамике / Э.А. Таиров, В.В. Нечаев. – Иркутск: ИрГСХА, 2007. – 109 с.
8. Термодинамика: уч. пособие для вузов: в 2-х кн. / В.П. Бурдаков, Б.В. Дзюбенко, С.Ю. Меснянкин, Т.В. Михайлова. – М.: Дрофа, 2009. – Ч.1. – 479 с.
9. Ривкин, С.Л. Термодинамические свойства газов / С.Л. Ривкин. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 286 с.
10. Теплоэнергетика и теплотехника / Под общ. ред. А.В. Клименко и В.М. Зорина. – М.: Издательство МЭИ, 2000. – 528 с.; Кн. 1: Общие вопросы: Справочник.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 3 |
| ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ | 4 |
| Тема 1. Основные понятия термодинамических параметров, процессов, законы идеального газа..... | 4 |
| Тема 2. Первый закон термодинамики..... | 5 |
| Тема 3. Второй закон термодинамики..... | 6 |
| Тема 4. Равновесие термодинамических систем и фазовые переходы..... | 8 |
| Тема 5. Термодинамические свойства реальных веществ..... | 9 |
| Тема 6. Основные термодинамические процессы..... | 11 |
| Тема 7. Процессы истечения газов и жидкостей..... | 13 |
| Контрольные задания и упражнения к темам 1-3.. | 14 |
| Задачи к темам 1-3..... | 16 |
| Контрольные задания и упражнения к темам 4-5.. | 19 |
| Задачи к темам 4-5..... | 21 |
| Контрольные задания и упражнения к темам 6-7.. | 24 |
| Задачи к темам 6-7..... | 25 |
| ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА | 29 |
| Тема 8. Теплосиловые газовые циклы..... | 29 |
| Тема 9. Теплосиловые паровые циклы..... | 30 |
| Тема 10. Холодильные циклы..... | 32 |
| Тема 11. Влажный воздух..... | 33 |
| Тема 12. Элементы химической термодинамики..... | 34 |
| Контрольные задания и упражнения к темам 8-11 | 36 |
| Задачи к темам 8-11..... | 38 |
| БИБЛИГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК | 46 |