

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Промышленная теплоэнергетика
и теплотехника»

Р.И. Есьман
Ю.П. Ярмольчик

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

Методическое пособие
по выполнению курсовой работы
для студентов специальностей
1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика»,
1-43 01 04 «Тепловые электрические станции»,
1-43 01 08 «Паротурбинные установки АЭС»,
1-53 01 04 «Автоматизация и управление
энергетическими процессами»

Минск
БНТУ
2010

УДК 536.7: 621.036

ББК 31я7

Е 87

Рецензенты:

Н.Б. Карницкий, В.Л. Драгун

Есьман, Р.И.

Е 87 Техническая термодинамика: методическое пособие по выполнению курсовой работы для студентов специальностей 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика», 1-43 01 04 «Тепловые электрические станции», 1-43 01 08 «Паротурбинные установки АЭС», 1-53 01 04 «Автоматизация и управление энергетическими процессами» / Р.И. Есьман, Ю.П. Ярмольчик. – Минск: БНТУ, 2010. – 42 с.

ISBN 978-985-525-349-6.

Методическое пособие предназначено для оказания помощи студентам при выполнении курсовой работы по дисциплине «Техническая термодинамика».

К каждому разделу дисциплины разработаны методические указания, способствующие более глубокому изучению и усвоению материала.

Материал методической части подобран и изложен таким образом, чтобы сосредоточить внимание студентов на основных, наиболее важных вопросах технической термодинамики.

Также приводятся варианты заданий к курсовой работе.

УДК 536.7: 621.036

ББК 31я7

ISBN 978-985-525-349-6

© Есьман Р.И.,
Ярмольчик Ю.П., 2010
© БНТУ, 2010

Введение

Дисциплина «Техническая термодинамика» играет важную роль в подготовке инженера-энергетика для работы в системе ТЭК, на промышленных предприятиях и в других энергопотребляющих отраслях промышленности.

Термодинамические процессы лежат в основе ряда производств, а также определяют режим работы многих устройств, механизмов и установок. Глубокое понимание процессов, протекающих в теплотехнических установках, предполагает знание и усвоение студентами теоретических положений теплотехники, включающих основные законы и методологические принципы термодинамики.

Изучение дисциплины «Техническая термодинамика» студентами, обучающимися по специальностям 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика», 1-43 01 04 «Тепловые электрические станции», 1-43 01 08 «Паротурбинные установки АЭС», 1-53 01 04 «Автоматизация и управление энергетическими процессами», является основой для более глубокого освоения современного теплоэнергетического и холодильного оборудования, встроенного в технологические процессы различных отраслей народного хозяйства с целью максимальной экономии топлива и материальных ресурсов, интенсификации и оптимизации современных тепло-технологических процессов, выявления и использования ВЭР (вторичных энергоресурсов), диверсификации инновационных энергосберегающих технологий в энергетической машиностроительной и других отраслях промышленного производства.

1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Процесс обучения студентов по данной дисциплине включает: получение информации на лекциях, самостоятельную работу над учебниками и учебно-методическими пособиями, выполнение контрольных и лабораторных работ, приобретение навыков решения конкретных теплотехнических задач на практических занятиях, получение консультаций на кафедре «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника» по вопросам, возникающим при изучении материала. Для более глубокого усвоения и закрепления материала предлагается ответить на вопросы для самопроверки, которые приводятся в настоящем методическом пособии к каждому разделу дисциплины.

При выполнении заданий к курсовой работе необходимо соблюдать следующие требования. Вначале должны быть четко выписаны исходные параметры, заданные по условию задачи, и определена конечная цель задачи. Например, определить термический КПД теплового двигателя, построить график процесса на диаграмме состояния и т.п. Все вычисления проводить, пользуясь Международной системой единиц (СИ). Все вычисления приводить в развернутом виде. При подстановке табличных значений величин (теплофизических характеристик, вспомогательных функций и коэффициентов), уравнений подобия, графических зависимостей необходимо давать ссылки на источники, которые используются. Графическое изображение циклов представить на отдельных листах формата А3. Решения задач сопровождать кратким пояснительным текстом. Указывать, какая из величин определяется расчетным путем, либо выбирается из справочников, учебных и учебно-вспомогательных пособий и т. д.

Задания к курсовой работе представлены вариантами, соответствующими шифру студента: одна часть задания выбирается по последней цифре шифра, другая – по предпоследней.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИЗУЧЕНИЮ РАЗДЕЛОВ ДИСЦИПЛИНЫ «ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА»

Изучению дисциплины «Техническая термодинамика» должна предшествовать глубокая проработка современного состояния энергетики в Республике Беларусь, пути совершенствования теплоэнергетического оборудования и теплотехнологий промышленного производства. Важным фактором в дальнейшем развитии теплоэнергетики в Республике Беларусь является все углубляющаяся интеграция с Российской Федерацией, странами СНГ, а также с другими странами в рамках все более открытого сотрудничества по обмену опытом, новыми технологиями и конструктивными идеями в области энергетики.

2.1. Основные понятия и определения

Предмет и метод термодинамики. Термодинамическая система и окружающая среда. Равновесное и неравновесное состояния термодинамической системы. Понятие термодинамического процесса. Основные термодинамические параметры состояния. Термодинамические функции состояния: внутренняя энергия, энтальпия, энтропия. Обратимый и необратимый процессы. Термодинамическое равновесие.

Методические указания. Термодинамика изучает закономерности преобразования энергии в различных физических и химических процессах при взаимодействии материальных тел. В технической термодинамике рассматриваются закономерности взаимного преобразования теплоты и работы. Устанавливаются количественные соотношения между тепловым и механическим взаимодействием, изучаются состояние и свойства газообразных рабочих тел при различных физических условиях.

Основу термодинамики составляют законы, или начала, установленные опытным путем. Из них получают соотноше-

ния, справедливые для конкретных изучаемых тел или процессов. Особое внимание следует уделить физической сущности первого и второго законов термодинамики. Первый закон характеризует количественную сторону процессов преобразования энергии, второй – качественную, устанавливает направленность тепловых процессов, определяет условия и возможности преобразования теплоты в работу.

В технической термодинамике термодинамическая система (ТС) представлена газообразным рабочим телом, посредством которого осуществляется взаимное преобразование теплоты и механической работы. Материальные тела, не вошедшие в систему, но взаимодействующие с ней, объединяются в понятие окружающей среды (ОС). Одной из наиболее простых математических моделей газообразных рабочих тел является идеальный газ. Необходимо отчетливо представлять различие между идеальным и реальным газом.

Более подробно следует остановиться на понятиях термодинамических параметров и функций состояния, а также уравнений состояния. Уяснить физический смысл газовой постоянной. Усвоить ряд понятий и определений, относящихся к смесям идеальных газов. Уметь рассчитывать газовую постоянную, среднюю молекулярную массу и параметры состояния смеси газов. Оценить факторы, влияющие на величину теплоемкости газа (параметры газа, его природа, характер термодинамического процесса и количество газа), уметь рассчитывать теплоемкость смеси идеальных газов.

Причина возникновения термодинамических процессов в системе заключается во взаимодействии систем с ОС. Необходимо разобраться в различиях между равновесными и неравновесными, обратимыми и необратимыми процессами. Усвоить понятие основных термодинамических процессов: изохорного, изобарного, изотермического, адиабатного, как частных случаев политропного процесса; замкнутого кругового процесса – цикла.

2.2. Законы термодинамики

Теплота и работа как функции процесса. Термическое и механическое взаимодействие термомеханической системы. Первый закон термодинамики – закон сохранения энергии. Второй закон термодинамики. Аналитическое выражение первого и второго закона термодинамики. Интеграл Клаузиуса. Аналитическое выражение второго закона термодинамики для обратимых и необратимых процессов. Цикл и теорема Карно. Термодинамическая шкала температур. Изменение энтропии изолированной системы при необратимых процессах. Статистическое толкование второго закона термодинамики. Уравнение Больцмана. Энтропия и термодинамическая вероятность. Дифференциальные соотношения термодинамики. Уравнения Максвелла.

Методические указания. Первый закон термодинамики – закон сохранения энергии, применяемый к изучаемой термодинамической системе. Сущность закона сохранения энергии состоит в эквивалентности и преобразовании различных форм движения. Необходимо обратить внимание на принципиальное различие между внутренней энергией как функцией состояния и теплотой и работой как функциями процесса. Проанализировать графическое изображение работы и теплоты в p, v - и T, S -координатах. Показать, что работа и теплота зависят от характера пути перехода системы из одного состояния в другое, являются функциями процесса.

Особое внимание обратить на выражение первого закона термодинамики для циклов. Одна из формулировок первого закона: вечный двигатель первого рода невозможен. Это означает, что нельзя создать двигатель, производящий большее количество полезной работы, чем количество теплоты, полученной рабочим телом за цикл. Такой двигатель получил название вечного двигателя первого рода.

Необходимо уметь рассчитывать различные термодинамические процессы и изображать в p, v - и T, S -координатах.

Если первый закон дает количественную оценку преобразования энергии при взаимодействии тел природы, то второй закон характеризует процессы с качественной стороны, устанавливает возможность осуществления термодинамических процессов. Существуют различные формулировки второго закона, с разных сторон раскрывающие его физический смысл. Наиболее общая принадлежит **Клаузиусу**: теплота не может переходить сама собой от более холодного тела к более теплomu, т.е. все реальные самопроизвольные процессы всегда протекают в направлении от более высокого потенциала к более низкому. Из формулировки **Томсона** следует, что не вся теплота, полученная от горячего источника, может перейти в работу, а только некоторая ее часть. Другая часть теплоты должна перейти в холодильник. Нельзя построить тепловой двигатель при наличии одного только источника теплоты. Двигатель, который способен целиком превращать в работу всю теплоту, полученную только от одного источника, был назван вечным двигателем второго рода.

Изучение циклов позволяет определить методы повышения их эффективности. Необходимо рассмотреть применение законов термодинамики к циклам. Особое внимание уделить теореме и анализу цикла **Карно**.

2.3. Термодинамика идеального газа

Основные законы идеальных газов. Уравнение состояния идеального газа. Универсальная газовая постоянная. Теплоемкость идеальных газов и их смесей. Уравнение Р. Майера. Кинетическая теория теплоемкости. Элементы квантовой теплоемкости. Внутренняя энергия и энтальпия идеальных газов. Основные термодинамические процессы изменения состояния идеальных газов. Области возможных политропных процессов.

Методические указания. При изучении темы «Смеси идеальных газов» студент должен уметь определять среднюю молярную массу и газовую постоянную смеси, заданную массовым или объемным составом. При изучении понятия теплоемкости необходимо обратить внимание на зависимость теплоемкости идеального газа от температуры, определять количество теплоты, используя изобарную и изохорную теплоемкости. При этом необходимо пользоваться таблицами средних теплоемкостей для различных газов с учетом зависимости теплоемкости от температуры. При изучении основных термодинамических процессов следует обратить внимание на их характерные особенности. Необходимо объяснить на основании анализа уравнения Бойля–Мариотта и уравнения Пуассона ход изотермических и адиабатных кривых в p, v -диаграмме. При изучении политропных процессов следует проанализировать область возможных политропных процессов на p, v - и T, S -диаграммах. Уметь определять численное значение показателя политропы n для анализа различных термодинамических процессов.

2.4. Реальные газы и пары

Термодинамическая диаграмма фазовых состояний и переходов (p, T -диаграмма). Уравнение Ван-дер-Ваальса. Правило фаз Гиббса. Парообразование и конденсация. Теплота фазового перехода. Тройная точка. Уравнение Клапейрона–Клаузиуса. Критические параметры веществ. Сверхкритическая область состояний пара. Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара. p, v -, T, S -, h, S -диаграммы для паров. Уравнения состояния реальных газов. Теория ассоциации молекул и уравнение состояния водяного пара. Метод определения калорических функций газов по уравнению состояния. Равновесие фаз при криволинейной поверхности раздела. Влажный воздух. Диаграмма Мольера. Термодинамические характеристики влажного возду-

ха. Термодинамические процессы во влажном воздухе на h,d -диаграмме. Абсолютная и относительная влажность воздуха.

Методические указания. Чем больше плотность газа (чем ниже температура и чем больше давление), тем сильнее отклоняются свойства реального газа от свойств идеального. Примерами реального газа являются водяной пар и воздух, которые служат в качестве рабочих тел в тепловых двигателях и теплоэнергетических установках. Уравнения состояния реальных газов отличаются от уравнения Менделеева-Клапейрона, описывающего состояние идеального газа. Математическая запись этих уравнений усложнена, поэтому расчет свойств и анализ термодинамических процессов в реальных газах проводится по таблицам и диаграммам. Наиболее используемые h,s -диаграммы для водяного пара и h,d - для влажного воздуха. При изучении уравнений состояний реального газа необходимо провести анализ уравнения Ван-дер-Ваальса, в котором учитываются силы межмолекулярного взаимодействия и собственный объем молекул. Необходимо учитывать, что уравнение Ван-дер-Ваальса достаточно хорошо описывает поведение реального газа с качественной стороны и не может быть рекомендовано для количественной оценки состояния газа. Следует обратить внимание на уравнение состояния реальных газов других авторов, особенно на уравнение Вукаловича–Новикова, в котором дополнительно учтена силовая ассоциация молекул в отдельные комплексы. Необходимо хорошо усвоить такие понятия как фазовое состояние, фазовый переход, пограничные кривые, критическая точка, кривые и теплота фазового перехода, являющиеся характерными понятиями для реальных газов, паров и жидкостей. Следует научиться определять газовую постоянную влажного воздуха и его энтальпию, а также приобрести навыки в пользовании психрометрическими таблицами и h,d -диаграммой влажного воздуха.

2.5. Термодинамика потока

Течение и дросселирование газов. Основные понятия и уравнения термогазодинамики. Уравнение первого закона термодинамики для потока. Уравнение неразрывности потока. Адиабатное течение. Связь между параметрами и функциями состояния в потоке. Критический режим течения. Влияние профиля канала на скорость потока. Сопла и диффузоры. Истечение газа из суживающегося сопла. Максимальный расход, критическая скорость и скорость звука. Комбинированное сопло Лавалья. Расчетный и нерасчетный режимы работы сопла. Расчет скорости истечения водяного пара по изменению энтальпии. Смешение потоков газа. Течение с трением. Дросселирование газов и паров. Эффект Джоуля–Томсона. Кривая инверсии. Использование процесса дросселирования для сжижения газов и в криогенной технике.

Методические указания. В современной технике используются машины и аппараты, в которых газообразное рабочее тело находится в движении. К ним относятся газотурбинные установки (ГТУ), реактивные и ракетные двигатели, турбокомпрессоры и другие устройства. Течение газа может происходить как внутри каналов различного сечения, так и на поверхности. В термодинамике потока соответственно различают внутреннюю и внешнюю задачи. При выводе уравнения первого закона термодинамики для потока (уравнение энергии) принимается ряд допущений. Необходимо обратить на них внимание. Ясно представлять различие между соплами и диффузорами. Проанализировать адиабатный процесс истечения газа. Разобраться в понятиях: критическая скорость, критические параметры газа. Уметь рассчитать комбинированное сопло *Лавалья* для идеального газа. Процесс адиабатного истечения пара рассчитывается с помощью таблиц или h,s -диаграмм. Нужно уметь изображать адиабатный процесс истечения без трения и с трением в h,s - и T,s -диаграммах. Про-

анализировать уравнение неразрывности и график изменения параметров по длине комбинированного сопла Лаваля.

Следует уяснить физический смысл процесса дросселирования, проанализировать его уравнение, показать и объяснить, как изменяются параметры и функции состояния при дросселировании. Необходимо понять смысл температуры инверсии и инверсионной кривой, чтобы объяснить возможность сжижения газов в процессе дросселирования.

2.6. Рабочие процессы в компрессорах

Принцип действия компрессора. Работа, затрачиваемая на привод одно- и многоступенчатого компрессора. Оптимальное распределение давления по ступеням. Изображение в p, v - и T, S -диаграммах термодинамических процессов, протекающих в компрессоре. Расчет отводимого количества теплоты при охлаждении многоступенчатого компрессора. Работа, затрачиваемая на сжатие газов в реальном компрессоре.

Методические указания. Компрессоры предназначены для сжатия газообразных тел. Они не являются устройствами по преобразованию энергии, поэтому рассматриваются не циклы, а рабочие процессы, изменение состояния газа в процессах всасывания, сжатия и нагнетания. Определяется работа, затрачиваемая на привод компрессора, оценивается производительность реального компрессора. Следует проанализировать работу многоступенчатого компрессора с помощью p, v - и T, S -диаграмм. Уметь рассчитывать отводимую теплоту при охлаждении многоступенчатого компрессора. Расчет центробежного компрессора.

2.7. Термодинамика газовых циклов

Теоретические циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания. Индикаторная диаграмма и индикаторная работа двигателя. Цикл с подводом теплоты при постоянном объеме и его КПД. Цикл с подводом теплоты при постоянном давлении и его КПД. Цикл с последовательным подводом КПД при

постоянном объеме и давлении – обобщенный цикл ДВС и его КПД. Сравнительный анализ циклов ДВС на p, v - и T, S -диаграммах. Цикл ДВС с турбонаддувом, продолженным расширением и переменным давлением газов перед турбиной и его КПД. Цикл ДВС с турбонаддувом, продолженным расширением и постоянным давлением газов перед турбиной и его КПД. Удельный расход теплоты и топлива.

Циклы ГТУ. Принципиальная схема и цикл ГТУ с подводом теплоты в изобарном процессе, термический КПД цикла. Методы повышения КПД циклов ГТУ. Применение регенерации, ступенчатого сжатия воздуха в компрессоре и ступенчатого сжигания топлива. Замкнутая схема ГТУ. Циклы ГТУ с подводом теплоты в изобарном процессе.

Циклы реактивных двигателей. Схемы, циклы и термический КПД турбореактивного двигателя, ракетного двигателя и двигателей для летательных аппаратов на твердом топливе.

Методические указания. Двигатель внутреннего сгорания осуществляет преобразование теплоты, полученной при сгорании топлива, в механическую работу. В основу анализа действительных циклов поршневых ДВС положены следующие три теоретических цикла: цикл с подводом теплоты при постоянном объеме ($v = \text{const}$) – близок по характеру протекания процессов к рабочему циклу карбюраторного двигателя; цикл с подводом теплоты при постоянном давлении ($p = \text{const}$) – близок к циклам в компрессорных дизелях; цикл с подводом теплоты при постоянных объеме и давлении ($v = \text{const}$ и $p = \text{const}$) – обобщенный цикл по подводу теплоты, близок к циклам бескомпрессорных дизелей. Во всех трех циклах отвод теплоты осуществляется при постоянном объеме. Следует обратить особое внимание, что в данных циклах отвод теплоты осуществляется в изохорном процессе. При этом параметры газа в конце процесса расширения значительно превышают параметры окружающей среды. Термодинамический цикл с продолженным расширением может быть осуществлен в комплексной установке двигателя и турбонагне-

тателя, состоящего из газовой турбины и компрессора (рис. 1, 2). В газовой турбине происходит дальнейшее расширение газов, а полученная при этом энергия расходуется на привод нагнетателя для наддува двигателя. Циклы установки с продолженным расширением, переменным и постоянным давлением газов перед турбиной представлены соответственно на рис. 1 и на рис. 2. Термический КПД цикла соответственно:

$$\eta_1 = 1 - \frac{1}{\varepsilon_0^{\kappa-1}} \cdot \frac{\rho \lambda^{\frac{1}{\kappa}} - 1}{\lambda - 1 + \kappa \lambda (\rho - 1)};$$

$$\eta_2 = 1 - \frac{1}{\varepsilon_0^{\kappa-1}} \cdot \frac{\lambda \rho^{\kappa} - 1}{\lambda - 1 + \kappa \lambda (\rho - 1)};$$

где ε_0 – общая степень сжатия.

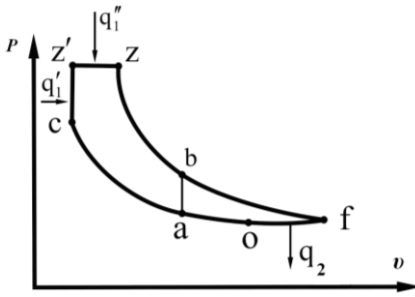


Рис. 1. Цикл ДВС с турбонаддувом и переменным давлением газов перед турбиной

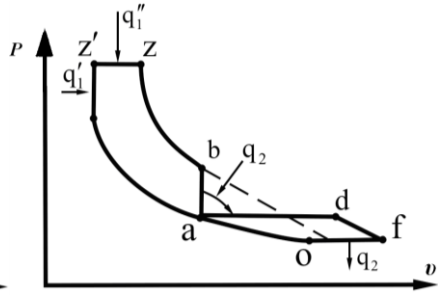


Рис. 2. Цикл ДВС с турбонаддувом и постоянным давлением газов перед турбиной

На рисунках bf – продолженное расширение газа на лопатках турбины; $f0$ – отвод теплоты при $p = \text{const}$; $0a$ – адиабатное сжатие воздуха в нагнетателе.

Из сравнения выражений для КПД обобщенного цикла и цикла с продолженным расширением газов видно, что КПД последнего выше. Это относится также к циклу с продолженным расширением, когда давление перед турбиной поддержи-

валяется постоянным, и кинетическая энергия отработавших газов не используется на лопатках турбины (см. рис.2).

Принципиальное отличие циклов ГТУ от теоретических циклов поршневых двигателей заключается лишь в процессе отвода теплоты. В ГТУ (и реактивных двигателях) осуществляется полное расширение газов до давления окружающей среды и поэтому процесс отвода теплоты принимается изобарным. В поршневых двигателях газы выбрасываются из цилиндра с давлением, большим атмосферного и, следовательно, с большей скоростью. Поэтому процесс отвода теплоты принимается изохорным (циклах ДВС с турбонаддувом отвод теплоты осуществляется в изобарном процессе).

Следует уделить внимание изучению циклов ГТУ при $p = \text{const}$ и $v = \text{const}$, проанализировать выражение для термического КПД и уяснить методы его повышения. Для увеличения КПД ГТУ применяют регенерацию теплоты, многоступенчатое сжатие воздуха в компрессоре, многоступенчатое сгорание и т.д.

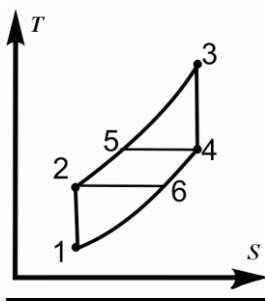


Рис. 3 Цикл ГТУ с предельной регенерацией

1-2 – адиабатное сжатие воздуха в компрессоре; 2-5 – изобарный процесс подвода теплоты в регенераторе; 5-3 – подвод теплоты при постоянном давлении в камере сгорания; 3-4 – адиабатное расширение продуктов сгорания в соплах турбины; 4-6 – изобарный отвод теплоты от газов в регенераторе; 6-1 – изобарный процесс отвода теплоты от газов на выходе из регенератора

Следует оценить величину повышения КПД ГТУ с предельной регенерацией (рис. 3) по отношению к термическому КПД идеального цикла.

Необходимо уметь проводить анализ циклов реактивных двигателей, работающих на жидком и твердом топливе, а также воздушно-реактивных и турбореактивных двигателей.

2.8. Термодинамика паровых циклов

Циклы паротурбинных установок (ПТУ). Цикл ПТУ (цикл Ренкина) в p,v - и T,s -диаграммах. Принципиальная схема паротурбинной установки. Работа турбины и привода питательного насоса. Термический КПД цикла паротурбинной установки. Расчет термического КПД цикла по h,s -диаграмме и по таблицам водяного пара. Методы повышения термического КПД цикла ПТУ. Влияние начальных и конечных параметров пара на термический КПД цикла. Применение пара высоких параметров. Действительный цикл с необратимым адиабатным расширением пара. КПД паротурбинной установки. Удельные расходы пара и топлива.

Вторичный перегрев пара. Цикл с вторичным перегревом пара в T,s - и h,s -диаграммах. Принципиальная схема ПТУ с вторичным перегревом пара. ПТУ при сверхкритических параметрах пара.

Регенеративные циклы. Регенеративный подогрев питательной воды. Идеальный и теоретический регенеративные циклы. Схема регенеративного подогрева с отбором пара. Изображение регенеративного цикла в T,s -диаграмме. Термический КПД регенеративного цикла. Оптимальная температура питательной воды и максимальный КПД регенеративного цикла.

Комбинированные циклы. Комбинированные парогазовые циклы. Термический КПД парогазовых циклов. Термодинамические циклы атомных электростанций (АЭС). Термодинамические основы теплофикации. Энергетический и тепловой балансы паротурбинных установок. Когенерационные установки на базе ГПА. Циклы ЯЭУ.

Циклы холодильных установок (ХУ). Схемы и принцип работы ХУ. Циклы паровых компрессионных холодильных машин

в T,s -; $\ln p,h$ -диаграммах. Термодинамические характеристики и свойства холодильных агентов (хладагентов). Пароэжекторные, абсорбционные и воздушные холодильные установки. Анализ холодильных коэффициентов циклов холодильных машин. Цикл теплового насоса. Термодинамическое сравнение эффективности теплового насоса и теплофикации.

Методические указания. Необходимо обратить внимание на пути увеличения КПД паротурбинных установок: применение пара высоких параметров, регенерация теплоты, применение комбинированных циклов парогазовая установка (ПГУ), а также методы применения перспективных схем преобразования энергии ТЭР в электрическую энергию.

Основным назначением холодильных машин является выработка искусственного холода или отвод теплоты от охлаждаемого тела в окружающую среду, имеющую более высокую температуру. При помощи холодильных установок можно понижать температуру различных объектов или в ограниченных объемах поддерживать более низкую температуру по сравнению с окружающей средой.

При изучении циклов холодильных установок обратить внимание на то, что эталоном для оценки эффективности их работы служит обратный термодинамический цикл Карно. Необходимо понять различие между паровыми компрессорными установками и воздушными, почему холодильный коэффициент паровых компрессорных установок значительно больше, чем воздушных. Особое внимание уделить свойствам холодильных агентов (хладоагентов) и изменению их состояния в цикле холодильной машины. Проанализировать циклы с помощью T,s ; $\ln p,h$ -диаграмм. Холодильные установки промышленного назначения можно разделить на три группы: компрессионные, пароэжекторные и абсорбционные.

В компрессионных холодильных машинах для производства холода затрачивается механическая энергия, сообщаемая извне. Пароэжекторные и абсорбционные ХУ потребляют

тепловую энергию и для осуществления обратного цикла затрачивается незначительная часть механической энергии.

Для построения теоретического цикла паровой холодильной компрессионной машины используются термодинамические диаграммы. В практических расчетах используются T, s - и p, h -диаграммы, которые построены для наиболее широко применяемых хладагентов. На рис. 4 и 5 осуществлено построение теоретических рабочих циклов паровой холодильной компрессионной машины. Циклы включают следующие термодинамические процессы: 1-2 – адиабатное сжатие хладагента в компрессоре (в области перегретого пара); 2-2' – изобарный процесс охлаждения перегретого пара при выходе из компрессора до температуры конденсации $T_{\text{кон}}$; 2'-3' – изобарно-изотермический процесс конденсации хладагента в конденсаторе; 3'-3 – переохлаждение хладагента по отношению к температуре конденсации $T_{\text{кон}}$; 3-4 – изохорный процесс дросселирования, протекающий без отдачи работы во внешнюю среду; 4-1 – изобарно-изотермический процесс испарения (кипения) хладагента в испарителе холодильной машины. Обратит внимание на отличительную особенность p, h -диаграммы, на которой основные расчетные величины измеряются отрезками прямых (Δh) на оси абсцисс (h).

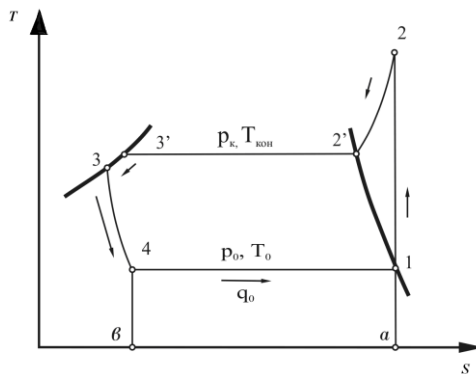


Рис. 4. Теоретический цикл паровой холодильной компрессионной машины в T, s -координатах

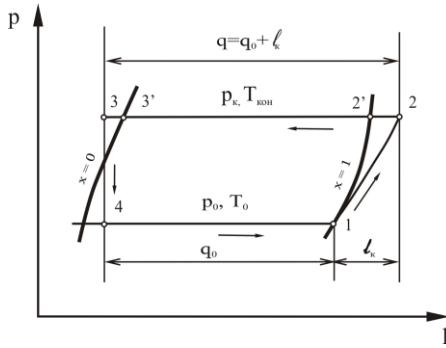


Рис. 5. Теоретический цикл паровой холодильной компрессионной машины в p, h -координатах

Рассмотрим особенности расчета компрессоров холодильных машин.

Теоретическая мощность компрессора

$$N_k = \ell_k \cdot m, \text{ кВт.}$$

Индикаторная мощность

$$N_j = \frac{N_k}{\eta_j}, \text{ кВт,}$$

где η_j – индикаторный КПД, равный $\eta_j = \lambda_\omega + v \cdot t_0$,

$\lambda_\omega = T_0 / T_k$ – коэффициент подогрева;

$$T_0 = (t_0 + 273,15) \text{ К};$$

$$T_k = (t_k + 273,15) \text{ К};$$

$v = 0,001$ – для аммиачных вертикальных простого действия;

$v = 0,0025$ – для фреоновых вертикальных простого действия.

Эффективная мощность

$$N_e = \frac{N_j}{\eta_{\text{мех}}}, \text{ кВт,}$$

где $\eta_{\text{мех}}$ – механический КПД, $\eta_{\text{мех}} = 0,8 \dots 0,9$.

Мощность электродвигателя для привода компрессора

$$N_3 = \frac{N_e}{\eta_3}, \text{ кВт},$$

где η_3 – электрический КПД, $\eta_3 = 0,9$.

Теоретический холодильный коэффициент

$$\varepsilon_{\text{теор}} = \frac{q_0}{l_k}.$$

Действительный холодильный коэффициент

$$\varepsilon_d = \varepsilon_{\text{теор}} \cdot \eta_j \cdot \eta_{\text{max}}.$$

Для подбора компрессора необходимо заданную холодопроизводительность пересчитать на стандартную.

Для стандартных условий

$$t_0 = -15^{\circ}\text{C}; t_k = 30^{\circ}\text{C}; t_n = 25^{\circ}\text{C}.$$

$$Q_{\text{СТ}} = Q_0 \frac{q_{\text{кт}} \cdot \lambda_{\text{СТ}}}{q_V \cdot \lambda}, \text{ кВт},$$

где λ – коэффициент подачи, равный, $\lambda = \lambda_V \cdot \lambda_{\omega} \cdot \lambda_H$

λ_V – объемный коэффициент компрессора, равный

$$\lambda_V = 1 - C \left(\frac{P_k}{P_0} - 1 \right),$$

$C = V_c / V_d$ – отношение объема вредного пространства к действительному объему, в расчете принять $C = 5 \%$,

λ_H – коэффициент неплотности, принять $\lambda_H = 0,95 \dots 0,98$.

По полученной холодопроизводительности для стандартных условий из таблиц подбирают тип компрессора.

Следует изучить особенности теоретических циклов ядерных энергетических установок (ЯЭУ). Современные ЯЭУ включают реактор, являющийся источником теплоты, паров или газотурбинную установку, где теплота преобразуется в механическую работу или в дальнейшем в электрическую энергию в схемах АЭС. В связи с этим теоретические циклы ЯЭУ подобны циклам ПТУ и ГТУ. Однако существуют и некоторые особенности:

- возможность широко изменять тепловую мощность реактора;
- ограниченность максимальной величины мощности термостойкостью оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛОВ);
- небольшая доля топливной составляющей в балансе стоимости вырабатываемой энергии.

Основными теплоносителями в ЯЭУ служат: вода под давлением, кипящая вода, газы, жидкие металлы, органические вещества. Соответственно различают водо-водяные энергетические реакторы (ВВЭР), кипящие водяные энергетические реакторы (ВВЭРК), газоохлаждаемые, жидкометаллические и др. Наибольшее распространение получили паротурбинные ЯЭУ. Первоначально следует проанализировать цикл одноконтурной паротурбинной установки с реактором кипящего типа, определить методы повышения тепловой экономичности, сокращения удельного расхода пара и расхода воды на конденсацию пара. Необходимо исследовать циклы двухконтурных паротурбинных ЯЭУ с реакторами, охлаждаемыми водой под давлением и трехконтурных, охлаждаемых жидкометаллическими теплоносителями. Обратить особое внимание на экологическую и радиационную безопасность функционирования АЭС.

2.9. Вопросы по дисциплине «Техническая термодинамика»

1. Современное состояние энергетики Республики Беларусь и пути ее развития. Предмет и метод термодинамики.
2. Влажный воздух. Основные определения влажного воздуха (влагосодержание, влажность воздуха, точка росы) i, d -диаграмма влажного воздуха.
3. Термодинамические параметры состояния. Термодинамическая система. Термодинамическая поверхность.
4. Уравнение первого закона термодинамики для потока. Располагаемая работа.
5. Первый закон термодинамики.
6. Адиабатное течение газа в канале. Уравнение неразрывности потока. Число Маха.
7. Идеальный газ. Основные законы идеального газа (Гей-Люссака, Шарля, Бойля–Мариотта). Уравнение состояния идеального газа.
8. Истечение газов и паров через комбинированные сопла. Сопло Лавалья.
9. Теплоемкость (молярная, массовая, объемная, средняя, истинная). Теплоемкость идеального газа. Связь между c_p и c_v .
10. Истечение газов и паров.
11. Смеси идеальных газов.
12. Дросселирование газов и паров. Дифференциальный дроссель-эффект.
13. Изобарный, изохорный, изотермический процессы изменения состояния идеального газа.
14. Компрессор. Процессы сжатия в компрессоре. Работа, затраченная на привод компрессора.
15. Адиабатный и политропный процессы изменения состояния идеального газа.
16. Многоступенчатое сжатие в компрессоре.
17. p, v - и T, S -диаграммы политропных процессов.

18. ДВС со сгоранием топлива при $v = \text{const}$. Цикл Отто.
19. Второй закон термодинамики и его значение. Основные формулировки.
20. ДВС со сгоранием топлива при $p = \text{const}$. Цикл Дизеля.
21. Прямой обратимый цикл Карно. Термический КПД цикла Карно.
22. Сравнение эффективности двигателей внутреннего сгорания.
23. Энтропия. Изменение энтропии в необратимых процессах. Энтропия и термодинамическая вероятность.
24. Цикл газотурбинной установки со сгоранием топлива при $p = \text{const}$.
25. Регенерация теплоты в циклах газотурбинных установок.
26. Термические коэффициенты.
27. Циклы прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД).
28. Характеристические функции (внутренняя энергия, энтальпия, свободная энергия, термодинамический потенциал).
29. Циклы турбореактивных двигателей (ТРД).
30. Термодинамическое равновесие. Условия равновесия термодинамических систем.
31. Цикл Ренкина.
32. Фазовые переходы. Фазовая p, T -диаграмма.
33. Цикл паротурбинной установки (ПТУ). Мощность и КПД паротурбинной установки.
34. Уравнение Клапейрона–Клаузиуса.
35. Влияние параметров пара на термический КПД цикла Ренкина.
36. Уравнение состояния реальных газов уравнения Ван-дер-Ваальса.
37. Цикл паротурбинной установки с промежуточным перегревом пара.

38. Регенеративный цикл паротурбинной установки. Теплофикация.
39. Процесс парообразования. Соотношение между параметрами во влажном паре.
40. Бинарные циклы паротурбинных установок.
41. Фазовые p, v - и T, s -диаграммы водяного пара.
42. Методы прямого преобразования энергии.
43. h, s -диаграмма водяного пара. Таблицы водяного пара.
44. Обратный цикл Карно. Холодильный коэффициент.
45. Двигатель со сгоранием топлива при $v = \text{const}$ и $p = \text{const}$. Цикл Тринклера.
46. Цикл воздушной холодильной машины.
47. Изотермический и адиабатный процессы изменения состояния водяного пара.
48. Цикл паровой компрессионной холодильной машины.
49. Термодинамические параметры состояния. Термодинамическая система. Термодинамическая поверхность.
50. Цикл пароконпрессиионной холодильной машины.
51. Уравнение первого закона термодинамики.
52. Теплоемкость смеси идеальных газов.
53. Схема когенерационной установки на базе ГПА.
54. Схема и цикл парогазовой установки (ПГУ).
55. Схема и цикл АЭС.

3. ЗАДАНИЯ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЦИКЛОВ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН И УСТАНОВОК

3.1. Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания

Исходные данные:

Рассчитать цикл поршневого двигателя внутреннего сгорания, если начальное давление – P_1 , начальная температура – T_1 , степень сжатия – ε , степень повышения давления – λ , степень предварительного расширения – ρ .

А. Цикл ДВС с подводом теплоты при $p = \text{const}$.

Б. Цикл ДВС с подводом теплоты при $v = \text{const}$.

В. Цикл ДВС со смешанным подводом теплоты.

Г. Цикл ДВС с турбонаддувом и продолженным расширением газов.

Рабочее тело – смесь газов (воздух); начальные параметры: $p_1 = 0,1$ МПа; $T_1 = 300$ К; степень сжатия $\varepsilon = 10 \dots 20$; степень повышения давления $\lambda = 1,5 \dots 5,0$; степень предварительного расширения $\rho = 1,5 \dots 2,5$.

Определить:

– параметры состояния (p, v, T) рабочего тела в характерных точках цикла;

– удельную работу расширения, сжатия, работу цикла;

– удельное количество подведенной и отведенной теплоты;

– изменение внутренней энергии (u), энтальпии (h) и энтропии (s) в процессах, входящих в цикл;

– среднее индикаторное давление в цикле (p_i);

– термический КПД цикла;

– термический КПД цикла Карно по условию задачи.

Построить графически:

– цикл ДВС в p, v и T, s -координатах;

- удельную работу расширения, сжатия, работу цикла;
- среднеинтегральные температуры подвода и отвода теплоты;
- среднее индикаторное давление в цикле.

Примечание. Расширение и сжатие рабочего тела осуществляется в политропных процессах с показателем политропы n_1 и n_2 соответственно. Теплоемкость рабочего тела принять постоянной.

Сравнить величины термического КПД данного цикла и термического КПД цикла Карно.

Данные для решения задачи выбрать в соответствии с шифром зачетной книжки из табл. 1.

Таблица 1

Последняя цифра шифра	Начальные параметры цикла		Показатели политропы		Предпоследняя цифра шифра	Характеристики цикла		
	T_1, K	$p_1 \cdot 10^{-5}, Pa$	сжатие n_1	расшир. n_2		ϵ	λ	ρ
0	260	0,8	1,41	1,35	0	14	1,3	2,2
1	270	0,9	1,32	1,40	1	15	1,4	2,1
2	280	1,0	1,37	1,42	2	16	1,5	2,0
3	290	1,1	1,38	1,30	3	16	1,6	1,9
4	300	1,15	1,34	1,36	4	17	1,7	1,8
5	310	1,2	1,35	1,41	5	17	1,8	1,7
6	320	1,25	1,30	1,39	6	18	1,6	1,6
7	330	1,3	1,37	1,37	7	18	1,5	1,5
8	340	1,35	1,39	1,38	8	20	1,3	1,4
9	350	1,4	1,41	1,31	9	22	1,2	1,3

3.2. Циклы газотурбинных установок

Исходные данные:

- А. Цикл ГТУ с подводом теплоты при $p = const$.
- Б. Цикл ГТУ с подводом теплоты при $v = const$.
- В. Цикл ГТУ с предельной регенерацией теплоты.

Рабочее тело – (воздух); начальные параметры рабочего тела: $p_1 = 0,1$ МПа; $T_1 = 300$ К; степень увеличения давления в компрессоре при адиабатном процессе сжатия $\beta = p_2 / p_1 = 10$; показатель адиабаты $\kappa = 1,4$. Температура газов перед соплами турбины в точке 3 не должна превышать 1000 К.

Определить:

- параметры всех характерных точек цикла (p, T, v);
- удельную работу расширения, сжатия, работу цикла;
- удельное количество подведенной и отведенной теплоты;
- термический КПД цикла ГТУ;
- термический КПД цикла Карно по условиям задачи.

Построить графически:

- цикл ГТУ в $p-v$ - и T,s -координатах;
- удельную работу расширения, сжатия, работу цикла;
- удельное количество подведенной и отведенной теплоты, теплоты, полученной системой за цикл;
- среднеинтегральные температуры подвода и отвода теплоты.

Данные для решения задачи выбрать в соответствии с шифром зачетной книжки из табл. 2.

Таблица 2

Последняя цифра шифра	Начальные параметры цикла		Показатели политропы		Предпоследняя цифра шифра	Характеристики цикла	
	T_1, K	$p_1 \cdot 10^{-5}, \text{Па}$	сжатие, n_1	расширение, n_2		λ	β
0	260	0,8	1,35	1,20	0	1,50	5
1	270	0,9	1,38	1,26	1	1,60	7
2	280	1,0	1,40	1,40	2	1,70	9
3	290	1,1	1,32	1,34	3	1,80	10
4	300	1,2	1,37	1,28	4	1,90	12
5	310	1,3	1,36	1,32	5	1,25	14
6	320	1,4	1,30	1,35	6	1,40	16
7	330	1,25	1,39	1,40	7	1,35	18
8	340	1,05	1,35	1,25	8	1,45	20
9	350	0,95	1,20	1,50	9	1,55	15

3.3. Циклы паросиловых установок

Исходные данные:

В паросиловой установке, работающей при начальных параметрах p_1 , t_1 и p_2 , введен вторичный перегрев пара при p' до начальной температуры $t' = t_1$.

Определить:

- термический КПД цикла со вторичным перегревом.
- термический КПД установки при отсутствии вторичного перегрева;
- оценить влияние вторичного перегрева на термический КПД цикла.

Данные для решения задачи выбрать в соответствии с шифром зачетной книжки из табл. 3.

Таблица 3

Последняя цифра шифра	p_1 , МПа	t_1 , °С	p_2 , МПа	Предпоследняя цифра шифра	p' , МПа
0	8	450	0,001	0	2,0
1	9	500	0,002	1	2,5
2	10	550	0,003	2	3,0
3	11	600	0,004	3	3,5
4	12	650	0,005	4	4,0
5	13	700	0,006	5	4,5
6	14	750	0,007	6	5,0
7	15	800	0,008	7	5,5
8	16	850	0,009	8	6,0
9	17	900	0,010	9	6,5

Примечание. При решении задачи использовать h,s -диаграмму или данные из табл. ПЗ.

Построить графически:

- цикл в T,s - и h,s -координатах;
- термодинамические процессы водяного пара.

3.4. Циклы холодильных машин

Исходные данные:

Рассчитать компрессионную холодильную установку при следующих данных:

- хладагент;
- холодопроизводительность установки Q_0 , кВт;
- температура испарения хладагента t_k , °С;
- переохлаждение конденсата Δt_n , °С.

При расчете принять: удельную теплоемкость воды = 4,19 кДж/(кг·К), рассола $c_p = 5,0$ кДж/(кг·К), перепад температур воды на входе и выходе из конденсатора $\Delta t_b = 10$ °С, рассола на входе и выходе из испарителя $\Delta t_p = 5$ °С.

Определить:

- параметры хладагента (ρ , t , h) в характерных точках цикла;
- удельный объем пара, всасываемого компрессором;
- удельную массовую и объемную холодопроизводительность q_0 , q_v ;
- удельную работу сжатия в компрессоре ℓ_k ;
- теоретическую, индикаторную и эффективную мощности компрессора N_k , N_i , N_e ;
- теоретический и действительный холодильный коэффициенты $\varepsilon_{\text{теор}}$, $\varepsilon_{\text{д}}$.

По полученной холодопроизводительности при стандартных условиях из таблиц подобрать тип компрессора.

Данные для решения задачи выбрать в соответствии с шифром зачетной книжки из табл. 4

Таблица 4

Последняя цифра номера	Хладагент	$Q_0, \text{кВт}$	Предпоследняя цифра номера	$t_0, ^\circ\text{C}$	$t_k, ^\circ\text{C}$	$t_n, ^\circ\text{C}$
0	аммиак	500	0	-30	20	10
1	хладон R-12	50	1	-15	30	5
2	аммиак	400	2	-25	25	5
3	хладон R-12	150	3	-20	30	15
4	аммиак	600	4	-25	25	10
5	хладон R-12	100	5	-30	20	10
6	аммиак	300	6	-25	25	5
7	хладон R-12	75	7	-20	20	5
8	аммиак	550	8	-30	30	10
9	хладон R-12	80	9	-15	20	5

Построить графически:

– термодинамический цикл компрессионной холодильной установки в T, S , p, h -координатах.

Примечание. При решении задачи использовать T, S -диаграмму и таблицу для выбора компрессора П4.

3.5. Процессы в компрессорных машинах

Исходные данные:

Рассчитать одноступенчатый поршневой компрессор при следующих данных:

- рабочее тепло – воздух;
- начальные параметры $P_1 = 0,1 \text{ МПа}$, $T_1 = 300 \text{ К}$;
- давление в конце процесса сжатия P_2 .

Определить:

- начальные и конечные параметры газа;
- работу в процессе сжатия;
- изменение внутренней энергии, энтальпии, энтропии;
- теоретическую мощность двигателя для привода компрессора;

- расход охлаждающей воды, если ее температура при охлаждении цилиндра компрессора повысилась на Δt ;
- во сколько раз изменится мощность двигателя и расход охлаждающей воды при переходе от изотермического сжатия к политропному;
- на сколько процентов уменьшится затрата работы при переходе от одноступенчатого на трехступенчатое сжатие газа;
- теоретическую мощность двигателя для привода трехступенчатого компрессора.

Данные для решения задачи выбрать в соответствии с шифром зачетной книжки из табл. 5.

Таблица 5

Последняя цифра шифра	Газ	V , м ³ /с	p_2 , МПа	Предпоследняя цифра шифра	Δt , °С	n
0	O ₂	0,03	0,5	0	9	1,22
1	N ₂	0,05	0,7	1	10	1,31
2	воздух	0,07	0,9	2	11	1,25
3	CO ₂	0,08	1,1	3	12	1,34
4	H ₂ O	0,09	1,2	4	13	1,28
5	O ₂	0,10	1,4	5	14	1,37
6	воздух	0,12	1,5	6	15	1,20
7	CO	0,15	1,7	7	16	1,24
8	CO ₂	0,20	1,8	8	17	1,30
9	воздух	0,25	2,0	9	18	1,38

Построить графически:

– термодинамические процессы и техническую работу одноступенчатого поршневого компрессора в p, v -, T, S -координатах.

– термодинамические процессы и работу, затраченную на привод трехступенчатого компрессора в p, v -, T, S -координатах.

П р и м е ч а н и е. При расчетах не учитывать трение и вредное пространство.

3.6. Термогазодинамические процессы в соплах

Исходные данные:

Воздух вытекает из резервуара через сопло в атмосферу:

- диаметр горловины сопла D ;
- температура воздуха в резервуаре T ;
- избыточное давление p_m ;
- атмосферное давление $p_0 = 0,1$ МПа.

Определить:

- скорость истечения;
- массовый расход;
- параметры воздуха на срезе сопла.

Данные для решения задачи выбрать в соответствии с шифром зачетной книжки из табл. 6.

Определить диаметр выходного сечения сопла Лаваля, имеющего диаметр горловины D , при расчетном режиме истечения, скорость и параметры воздуха на выходе.

Таблица 6

Последняя цифра шифра	D , мм	Предпоследняя цифра шифра	p_m , МПа	T , К
0	5	0	5,0	290
1	20	1	0,5	280
2	10	2	1,8	275
3	15	3	2,4	300
4	20	4	3,0	295
5	5	5	4,5	275
6	10	6	0,8	280
7	15	7	1,6	310
8	25	8	4,0	280
9	5	9	2,0	270

Построить графически:

- схему сопла Лавалья;
- термодинамические процессы истечения воздуха из сопел в атмосферу.

П р и м е ч а н и е. При расчетах использовать уравнения и формулы термогазодинамики потока (одномерные течения идеальной жидкости). Обратить внимание на применение в расчетах газодинамических функций [6,7].

Литература

Основная

1. Кириллин, В.А. Техническая термодинамика: учебник для теплоэнергетических специальностей вузов / В.А. Кириллин, В.В. Сычев, А.Е. Шейндлин. – 4-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 416 с.: ил.
2. Хрусталеv, Б.М. Техническая термодинамика: учебник для строительных и энергетических специальностей вузов: в 2 ч. / Б.М. Хрусталеv, А.П. Несенчук, В.Н. Романюк. – Минск: Технопринт, 2004. – Ч.1. – 2004. – 486 с.: ил.
3. Есьман, Р.И. Термодинамика, теплопередача и двигатели внутреннего сгорания / Р.И. Есьман [и др.]. – Минск: Вышэйшая школа, 1985. – 271 с.: ил.

Дополнительная

4. Сборник задач по технической термодинамике: учебное пособие для теплоэнергетических специальностей вузов / Т.Н. Андрианова [и др.]. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: МЭИ, 2006. – 356 с.: ил.
5. Есьман, Р.И. Термодинамика и теплопередача: методическое пособие / Р.И. Есьман, Н.Е. Волкова. – Минск: БПИ, 1980. – 47 с.
6. Дейч, М.Е. Гидрогазодинамика: учебное пособие / М.Е. Дейч, А.Е. Зарянкин. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 348 с.
7. Повх, И.Л. Техническая гидромеханика / И.Л. Повх. – М.: Машиностроение, 1976. – 501 с.
8. Андрущенко, А.И. Основы термодинамики циклов теплоэнергетических установок: учебное пособие для теплоэнергетических специальностей вузов / А.И. Андрущенко. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1985. – 319 с.: ил.
9. Есьман, Р.И. Термодинамика и теплопередача: методические указания и контрольные задания / Р.И. Есьман, Н.Е. Волкова. – Минск: БПИ, 1985. – 34 с.

10. Есьман, Р.И. Техническая термодинамика / Р.И. Есьман, Ю.П. Ярмольчик, М.А. Ярмольчик. – Минск: БНТУ, 2008. – 24 с.
11. Ривкин, С.Л. Термодинамические свойства воды и водяного пара: справочник / С.Л. Ривкин, А.А. Александров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 80 с.: ил.; прил.
12. Ривкин, С.Л. Термодинамические свойства воздуха и продуктов сгорания топлива: справочник / С.Л. Ривкин. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 105 с.: ил.; прил.
13. Термодинамика. Терминология. – Вып. 103. – М.: Наука, 1984. – 39 с.
14. Сборник задач по технической термодинамике и теплопередаче / Е.В. Дрыжаков [и др.]; под ред. Б.Н. Юдаева. – М.: Высшая школа, 1968.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Т а б л и ц а П1

Физические параметры воды на линии насыщения

t , °C	$p \cdot 10^{-5}$, Па	C_p , кДж/(кг К)	λ , Вт/(м К)	$a \cdot 10^6$, м ² /с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
0	1,01	4,212	0,551	0,131	1,789	13,67
10	1,01	4,191	0,575	0,137	1,306	9,52
20	1,01	4,183	0,599	0,143	1,006	7,02
30	1,01	4,174	0,618	0,149	0,805	5,42
40	1,01	4,174	0,634	0,153	0,659	4,31
50	1,01	4,174	0,648	0,157	0,556	3,54
60	1,01	4,178	0,659	0,161	0,478	2,98
70	1,01	4,187	0,668	0,163	0,415	2,55
80	1,01	4,195	0,675	0,166	0,365	2,21
90	1,01	4,208	0,680	0,167	0,326	1,95
100	1,01	4,220	0,688	0,169	0,295	1,75
110	1,43	4,233	0,685	0,170	0,272	1,60

Т а б л и ц а П2

Физические параметры некоторых газов

Газы	Химическая формула	Молекулярный вес	R , Дж/(кг К)	ρ , кг/м ³	$t_{кр}$, °C	$P_{кр} \cdot 10^{-5}$, Па	C_p , кДж/(кг К) при $t = 25^\circ\text{C}$
Азот	N ₂	28	297	1,25	-147,1	32,8	1,038
Водород	H ₂	2	4124	0,09	-239,9	12,6	14,190
Водяной пар	H ₂ O	18	462	0,80	+374,2	221,4	1,860
Воздух	---	29	287	1,293	-140,8	36,5	1,004
Гелий	He	4	2078	0,179	-267,9	2,26	5,192
Кислород	O ₂	32	260	1,43	-118,8	48,7	0,917
Окись углерода	CO	28	297	1,25	-138,7	33,9	1,038
Углекислота	CO ₂	44	189	1,98	+31,0	71,5	0,829

Т а б л и ц а ПЗ

Вода и перегретый водяной пар (зависимость $h-S$)

- Числа слева от ступенчатой линии относятся к воде.
- Значения всех физических величин даны в единицах системы СИ

$P, \text{МПа}$	$t, ^\circ\text{C}$	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
0,004	<i>i</i>	83,7	2574	2612	2650	2688	2726	2764	2803	2841	2880
	<i>S</i>	0,30	8,54	8,65	8,76	8,87	8,97	9,06	9,15	9,24	9,32
0,008	<i>i</i>	83,7	167,5	2612	2650	2688	2726	2764	2802	2841	2880
	<i>S</i>	0,30	0,57	8,23	8,34	8,44	8,54	8,64	8,73	8,81	8,90
0,010	<i>i</i>	83,7	167,5	2611	2649	2688	2726	2764	2802	2841	2879
	<i>S</i>	0,30	0,57	8,23	8,34	8,44	8,54	8,64	8,73	8,81	8,90
0,012	<i>i</i>	83,7	167,5	2611	2649	2687	2725	2764	2802	2841	2879
	<i>S</i>	0,30	0,57	8,14	8,25	8,36	8,46	8,55	8,64	8,73	8,81
0,014	<i>i</i>	83,7	167,5	2611	2649	2687	2725	2763	2802	2840	2879
	<i>S</i>	0,30	0,57	8,07	8,18	8,29	8,39	8,48	8,57	8,66	8,74
0,016	<i>i</i>	83,7	167,5	2610	2649	2687	2725	2763	2802	2840	2879
	<i>S</i>	0,30	0,57	8,01	8,12	8,23	8,32	8,42	8,51	8,60	8,68
0,020	<i>i</i>	83,7	167,5	251,1	2648	2687	2725	2763	2801	2840	2879
	<i>S</i>	0,30	0,57	0,83	8,02	8,12	8,22	8,32	8,41	8,49	8,58
0,030	<i>i</i>	83,7	167,5	251,1	2646	2685	2724	2762	2801	2839	2878
	<i>S</i>	0,30	0,57	0,83	7,83	7,93	8,03	8,13	8,22	8,30	8,39
0,10	<i>i</i>	83,9	167,5	251,1	334,9	2676	2717	2757	2796	2835	2875
	<i>S</i>	0,30	0,57	0,83	1,07	7,36	7,47	7,56	7,65	7,74	7,83
0,12	<i>i</i>	83,9	167,5	251,1	334,9	419,0	2715	2755	2795	2834	2874
	<i>S</i>	0,30	0,57	0,83	1,07	1,31	7,38	7,48	7,67	7,66	7,74
0,60	<i>i</i>	84,3	167,9	251,5	335,2	419,1	503,1	589,1	2759	2805	2849
	<i>S</i>	0,30	0,75	0,83	1,07	1,31	1,53	1,74	6,77	6,87	6,96
0,80	<i>i</i>	84,5	168,1	251,7	335,3	419,2	503,8	589,1	675,3	2792	2839
	<i>S</i>	0,30	0,57	0,83	1,07	1,31	1,53	1,74	1,94	6,72	6,81
1,0	<i>i</i>	84,7	168,3	251,8	335,4	419,3	503,9	589,2	675,4	2778	2827
	<i>S</i>	0,30	0,57	0,83	1,07	1,31	1,53	1,74	1,94	6,59	6,69
1,2	<i>i</i>	84,9	168,5	251,9	335,5	419,4	504,0	589,3	675,5	2790	2816
	<i>S</i>	0,30	0,57	0,83	1,07	1,31	1,53	1,74	1,94	6,53	6,59
1,4	<i>i</i>	85,1	168,7	252,1	335,7	419,6	504,2	589,5	675,7	763,2	2803
	<i>S</i>	0,30	0,57	0,83	1,07	1,31	1,53	1,74	1,94	2,14	6,50
1,6	<i>i</i>	85,3	168,8	252,2	335,8	419,7	504,3	589,6	675,7	763,2	852,4
	<i>S</i>	0,30	0,57	0,83	1,07	1,31	1,53	1,74	1,94	2,14	2,33
2	<i>i</i>	85,7	169,2	252,6	336,2	420,1	504,7	589,9	675,9	763,2	852,4
	<i>S</i>	0,30	0,57	0,83	1,07	1,30	1,53	1,74	1,94	2,14	2,33
10	<i>i</i>	93,2	176,9	259,6	342,9	426,5	510,5	595,3	681,0	768,0	856,0
	<i>S</i>	0,30	0,57	0,82	1,07	1,30	1,52	1,73	1,93	2,12	2,31
30	<i>i</i>	112,0	194,1	276,5	359,1	441,9	525,1	609,0	693,6	779,1	865,4
	<i>S</i>	0,29	0,56	0,81	1,05	1,28	1,50	1,71	1,91	2,10	2,29

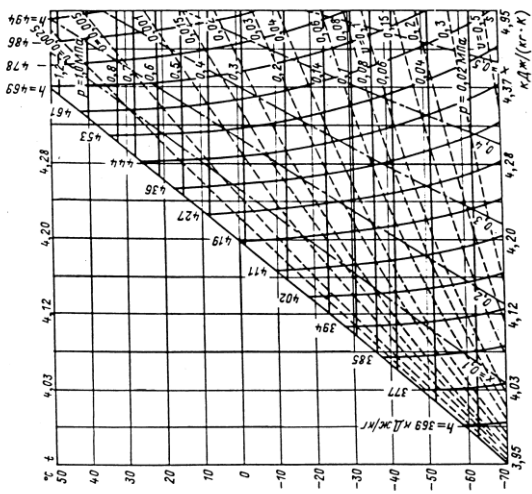
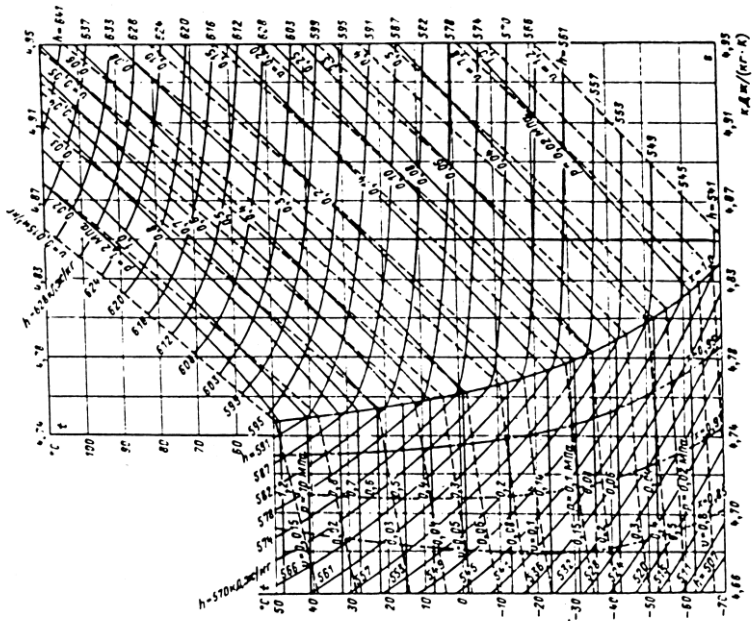
Окончание табл. П3

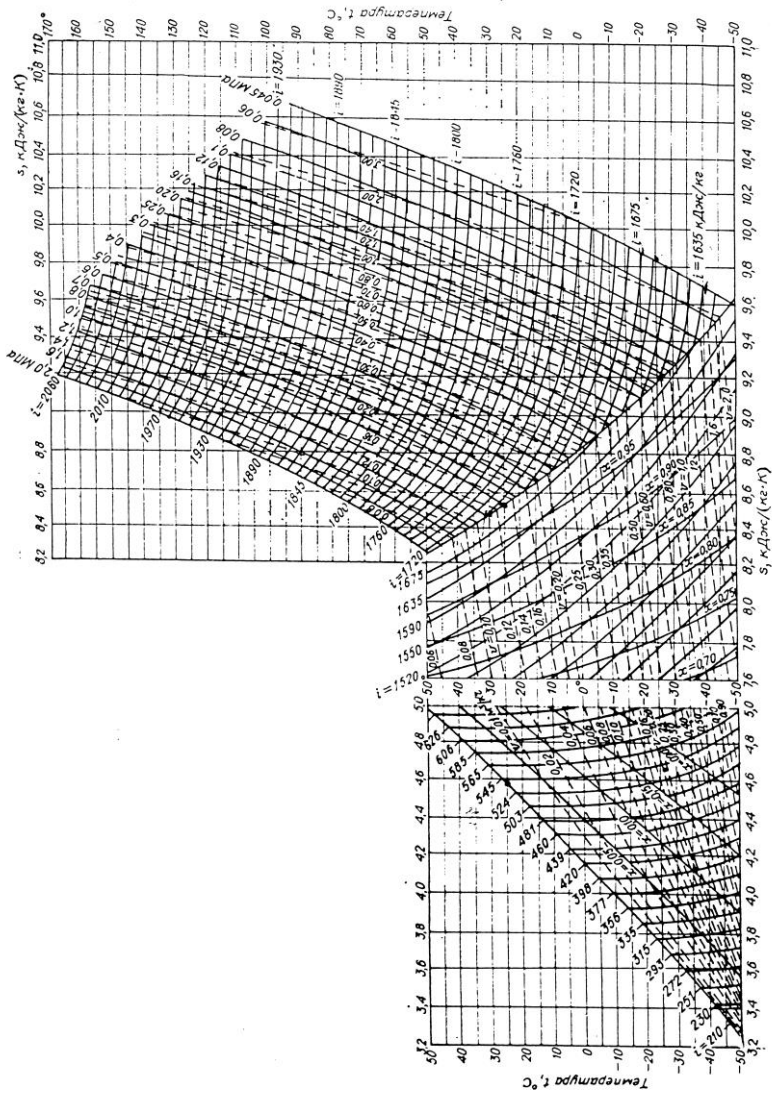
$P, \text{МПа}$	$t, ^\circ\text{C}$	220	240	260	280	300	350	400	450	500	600
0,004	<i>i</i>	2918	2958	2997	3037	3077	3177	3280	3384	3490	3707
	<i>S</i>	9,40	9,48	9,55	9,63	9,70	9,87	10,02	10,17	10,32	10,59
0,008	<i>i</i>	2918	2957	2997	3037	3077	3177	3280	3384	3490	3707
	<i>S</i>	9,08	9,16	9,23	9,31	9,38	9,55	9,70	9,85	10,00	10,27
0,012	<i>i</i>	2918	2957	2996	3036	3077	3177	3280	3384	3490	3707
	<i>S</i>	8,89	8,97	9,05	9,12	9,19	9,36	9,52	9,67	9,81	10,08
0,02	<i>i</i>	2918	2957	2996	3036	3077	3177	3280	3384	3490	3707
	<i>S</i>	8,66	8,74	8,81	8,88	8,95	9,12	9,28	9,43	9,58	9,84
0,1	<i>i</i>	2914	2954	2993	3033	3074	3175	3278	3382	3488	3706
	<i>S</i>	7,91	7,99	8,06	8,14	8,21	8,38	8,54	8,69	8,83	9,10
0,6	<i>i</i>	2891	2933	2975	3017	3059	3164	3270	3376	3483	3701
	<i>S</i>	7,05	7,14	7,22	7,29	7,37	7,54	7,70	7,86	8,00	8,27
1,0	<i>i</i>	2874	2918	2962	3005	3048	3156	3263	3370	3479	3698
	<i>S</i>	6,79	6,88	6,96	7,04	7,12	7,30	7,46	7,62	7,76	8,03
2,0	<i>i</i>	2821	2875	2924	2972	3019	3134	3246	3357	3468	3690
	<i>S</i>	6,39	6,49	6,59	6,67	6,76	6,05	7,12	7,28	7,43	7,70
3,0	<i>i</i>	943,5	2823	2882	2937	2988	3111	3229	3343	3456	3682
	<i>S</i>	2,51	6,23	6,34	6,44	6,53	6,74	6,92	7,08	7,23	7,51
10	<i>i</i>	945,8	1038,3	1134,1	1234,5	1342,2	2920	3093	3239	3372	3621
	<i>S</i>	2,50	2,68	2,87	3,05	3,24	5,94	6,21	6,42	6,60	6,90
12	<i>i</i>	946,6	1038,7	1133,9	1233,7	1340,0	2844	3049	3206	3347	3603
	<i>S</i>	2,50	2,68	2,86	3,05	3,24	5,76	6,07	6,30	6,49	6,80
14	<i>i</i>	947,3	1039,1	1133,8	1232,9	1338,0	2750	3000	3172	3321	3585
	<i>S</i>	2,49	2,68	2,86	3,04	3,32	5,55	5,94	6,19	6,39	6,72
16	<i>i</i>	948,0	1039,5	1133,7	1232,2	1336,2	2612	2945	3137	3294	3567
	<i>S</i>	2,49	2,67	2,85	3,04	3,22	5,30	5,82	6,09	6,30	6,64
24	<i>i</i>	950,9	1041,3	1134,0	1230,3	1331,2	1625	2638	2971	3174	3493
	<i>S</i>	2,48	2,66	2,84	3,01	3,19	3,68	5,24	5,72	6,06	6,39
30	<i>i</i>	953,3	1042,9	1134,7	1229,0	1329,0	1608	2155	2816	3073	3434
	<i>S</i>	2,47	2,65	2,82	3,00	3,17	3,64	4,48	5,45	5,80	6,24

Т а б л и ц а П4

Компрессоры холодильных машин

Марка компрессора (в скобках указано старое обозначение)	Тип	Число цилиндров	Ход поршня s в мм	Диаметр цилиндра D в мм	Скорость вращения коленчатого вала n в об. мин.	Объем описываемый поршнями V_h в м ³ /ч	Холодопроизводительность при стандартном режиме Q ₀		Потребляемая мощность N _e в кВт	Мощность электродвигателя в кВт	Габаритные размеры в мм
							в Вт.	в кал ч			
AB22	A	2	70	80	960 1440	40,5 60,8	19 000 27 000	16 500 23 500	5,25 7,9	-	810X1130X760
AУ45	A	4	70	80	960 1440	81,0 121,5	38 000 54 000	33 000 47 000	10 14,9	-	660X625X710
AУУ90	A	8	70	80	960 1440	162 243	75 000 110 000	65 000 95 000	19,2 29	-	1100X910X820
AB100	A	2	130	150	720 960	198 264	87 000 116 000	75 000 100 000	25 34	- 40	1050X760X1190
AУ200	A	4	130	150	720 960	396 528	174 000 232 000	150 000 200 000	48 67	- 75	1370X1315X1100
AУУ400	A	8	130	150	720 960	792 1056	348 000 465 000	300 000 400 000	100 139	- 160	1660X1560X1320
AO600	AO	2 8	220	280	500	1585	665 000	575 000	190	320	3310X4150X17550
AO1200	AO		220	280	500	3170	1300 000	1150 000	390	630	4500X4420X1800





ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.	3
1. Общие указания.	4
2. Методические указания к изучению разделов дисциплины «Техническая термодинамика»	5
2.1. Основные понятия и определения.	5
2.2. Законы термодинамики.	7
2.3. Термодинамика идеального газа.	8
2.4. Реальные газы и пары.	9
2.5. Термодинамика потока.	11
2.6. Рабочие процессы в компрессорах.	12
2.7. Термодинамика газовых циклов.	12
2.8. Термодинамика паровых циклов.	16
2.9. Вопросы по дисциплине «техническая термодинамика»	22
3. Задания по курсовой работе.	25
3.1. Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания.	25
3.2. Циклы газотурбинных установок.	26
3.3. Циклы паросиловых установок.	28
3.4. Циклы холодильных машин.	29
3.5. Процессы в компрессорных машинах.	30
3.6. Термогазодинамические процессы в соплах.	32
Литература.	34
Приложение.	36

Учебное издание

ЕСЬМАН Руслан Иосифович
ЯРМОЛЬЧИК Юрий Петрович

ТЕХНИЧЕСКОЕ ТЕРМОДИНАМИКА

Методическое пособие и задания
для студентов специальностей

1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика»,

1-43 01 04 «Тепловые электрические станции»,

1-43 01 08 «Паротурбинные установки АЭС»,

1-53 01 04 «Автоматизация и управления энергетическими процессами»

Редактор Е.О. Коржуева

Компьютерная верстка С.В. Бондаренко

Подписано в печать 30.03.2010.

Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 3,58. Уч.-изд. л. 1,91. Тираж 100. Заказ 109.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.