**ЭС-21 - ЗАОЧНОЕ**

Контрольная работа по дисциплине **«Общая энергетика»**

(группа ЭС-21- 1бз)

**Расчёт цикла газотурбинной установки**

|  |  |
| --- | --- |
| **Фамилия, Имя, Отчество** | **№ -варианта** |
| Ахметов Артур Анварович | **1** |
| Дмитриев Денис Александрович | **2** |
| Житников Василий Петрович | **3** |
| Зубарев Денис Вениаминович | **4** |
| Кантуганов Айдар Амирович | **5** |
| Кузнецов Артём Константинович | **6** |
| Мерзляков Олег Александрович | **7** |
| Нафиков Наиль Рафикович | **8** |
| Поздеев Максим Владимирович | **9** |
| Смирнова Мария Владимировна | **10** |
| Смольников Сергей Валерьевич | **11** |
| Стариков Артём Андреевич | **12** |
| Сычёв Антон Алексеевич | **13** |
| Токмаков Виталий Михайлович | **14** |
| Шакирьянов Раушан Илнарович | **15** |

**Оформление контрольной работы**

Работа должна содержать: титульный лист, задание на контрольную работу, содержание, исходные данные, теоретическую часть, заключение (выводы), список использованных источников литературы.

Единицы измерения должны быть представлены в системе СИ.

Каждый пункт расчёта должен сопровождаться краткими пояснениями.

Формулы должны начинаться с новой строки с необходимыми пояснениями буквенных обозначений.

Сдача работы осуществляется в установленные учебным планом сроки.

**КРАТКАЯ ТЕОРИЯ**

**Электрическая электростанция предназначена для выработки электрической и тепловой энергий для снабжения ею промышленного, сельскохозяйственного производства, коммунального хозяйства, транспорта и т. д.**

**Тепловая электростанция** —электростанция, вырабатывающая электрическую энергию за счёт преобразования химической энергии топлива в процессе сжигания в тепловую, а затем в механическую энергию вращения вала электрогенератора.

В качестве топлива широко используются различные горючие ископаемые: уголь, природный газ, реже —мазут, ранее —торф и горючие сланцы.

**Требования предъявляемые к тепловым электростанциям**

1. Если станция работает изолированно, вне энергосистемы, то она должна иметь мощность, достаточную для покрытия тепловых и электрических нагрузок присоединённых к ней потребителей. При этом должна иметься возможность расширения станции, то есть увеличения её мощности с установкой новых дополнительных турбоустановок и котлов без нарушения её нормальной работы. Если электростанция работает в энергосистеме, то мощность её и возможность расширения устанавливаются, исходя из потребностей всей системы в целом.

2. Тепловая электростанция должна работать безаварийно, для чего она должна иметь надёжное оборудование, резерв в оборудовании, достаточный для производства ремонта и ревизий, а также обслуживающий персонал необходимой квалификации.

3. Надёжность снабжения потребителей электрической и тепловой энергией в необходимом количестве и требуемого качества является обязательным требованием, которое прежде всех других должно предъявляться к любой электростанции. А качество продукции электростанций — это определённое напряжение и частота электрического тока, давление и температура пара и горячей воды для потребителей.

4. Тепловая электростанция должна иметь высокую тепловую экономичность, то есть малый расход топлива на единицу отпускаемой тепловой (ГКАЛ) и электрической энергии (кВт) и вместе с тем вырабатывать её с возможно меньшей себестоимостью.

Об экономичной работе станции говорит величина, называемая **удельным расходом топлива, то есть отношением расхода топлива в граммах на величину вырабатываемой тепловой и электрической энергии.** С другой стороны, общая сумма расходов по эксплуатации тем меньше, чем дешевле топливо и чем выше КПД станции.

5. Расход электрической и тепловой энергии на собственные нужды станции должен быть минимальным.

Таким образом, электростанция должна проектироваться для работы на дешёвом топливе, по возможности на местном, а не на привозном, а оборудование станции должны работать с высоким КПД.

В основе работы ТЭС, ТЭЦ, газотурбинных установок и котельных лежат физические законы молекулярной физики и термодинамики – **техническая термодинамика.**

**Техническая термодинамика** — наука, изучающая взаимопревращения теплоты и работы и условия, при которых эти превращения совершаются наиболее эффективно. Она устанавливает взаимосвязь между тепловыми и механическими процессами, которые совершаются в тепловых и холодильных машинах, изучает процессы, происходящие в газах и парах, а также свойства этих тел при различных физических условиях.

Теоретическим фундаментом, на котором базируются все выводы технической термодинамики, являются первый и второй законы термодинамики, представляющие собой обобщение опыта познания человеком природы. Основная особенность метода термодинамики — логически последовательное применение аналитических выражений первого и второго законов термодинамики совместно с уравнением состояния рабочего тела, без использования каких-либо гипотез о внутреннем его строении.

Необходимо усвоить определения и физическую суть таких понятий, как равновесный и неравновесный, обратимый и необратимый термодинамические процессы. Понять, что равновесное состояние рабочего тела, так же как равновесный и обратимый процессы, является научной абстракцией, как некоторые идеализированные модели реальных состояний и процессов. Реальные состояния и процессы приближаются к идеализированным при условии очень малых изменений параметров состояния и когда время между последовательными изменениями состояния достаточно велико. Однако именно введение этих идеализированных понятий позволило построить стройный математический аппарат термодинамики, позволяющий получать результаты, достаточно близкие к практике.

Для усвоения последующего материала необходимо уяснить, что теплота и работа представляют собой определённые формы передачи энергии — тепловую и механическую, причём работа может переходить в теплоту, а теплота в работу, т. е. они взаимопревращаемы.

Работа всегда полностью превращается в теплоту, в то время как переход теплоты в работу имеет определённые ограничения даже в идеальном процессе. Взаимное превращение теплоты и работы в тепловой машине осуществляется с помощью рабочего тела, которое благодаря тепловому и механическому воздействию должно обладать способностью значительно изменять свой объём. Поэтому в качестве рабочего тела в тепловых машинах используется газ или пар. Физическое состояние рабочего тела в термодинамике определяется тремя параметрами: абсолютным давлением *р*, удельным объёмом *v* и абсолютной температурой *Т*. Эти три параметра называются основными и связаны между собой уравнением состояния *F (р, v, Т) = 0*. Независимые, т. е. выбираемые произвольно, — два любых параметра, а третий определяют из уравнения состояния. Например, если *р* и *v* — независимые параметры, то *T=* (*р, v*), где  (*р*, *v*) — функция, определяемая при решении уравнения состояния относительно зависимого параметра *Т*.

Для понимания физической сути изучаемых закономерностей термодинамики и принципов работы различных теплотехнических устройств нужно овладеть принципом графического изображения любых процессов, включая круговые (циклы) в термодинамических диаграммах. Необходимо уяснить, что графически можно изобразить только равновесные обратимые процессы и циклы, которые совершаются рабочим телом.

Во всех теплотехнических установках, в которых в качестве рабочего тела используют газ, он считается идеальным (ИГ), т. е. **газом, состоящим из молекул — материальных точек, не имеющих размеров и между которыми отсутствуют силы взаимодействия** (притяжения и отталкивания), кроме упругих соударений. Как известно из физики, такой газ подчиняется уравнению состояния Клапейрона, которое может быть записано для *m* кг газа (*pV = mRT*) и для 1 кг газа (*pv = RT*, где *v = V/m* — удельный объем газа, м3/кг).

Понятие идеального газа является научной абстракцией, моделью реального газа, дающей хорошую сходимость с практикой, когда состояние газа далеко от состояния сжижения. Применение этой модели позволяет построить достаточно простые аналитические зависимости термодинамики, применение которых к тепловым машинам даёт, как правило, приемлемую сходимость с практикой.

Для насыщенного пара, т. е. для состояния, близкого к состоянию сжижения, модель идеального газа неприемлема. В этом случае приходится применять очень сложные модели и уравнения реальных газов, в которых учитывают собственные размеры молекул, а также силы взаимодействии между ними.

**!!!** Важно понять различие между удельной газовой постоянной, принимающей определенное значение для каждого газа, и универсальной газовой постоянной, одинаковой для всех газов и равной R = 8,314 Дж/(моль·К). Запомните связь между этими газовыми постоянными и уясните физический смысл каждой из них.

При изучении газовой смеси необходимо понять, что основным здесь является умение определять газовую постоянную смеси газов, заданной массовым и объёмным составом. Знание газовой постоянной смеси позволяет при исследовании термодинамических процессов пользоваться уравнением Клапейрона так же, как и для отдельного газа.

В этой теме раскрывается необходимый комплекс определений и понятий, на основе которых строится все дальнейшее изложение технической термодинамики.

**Литература:** [1] с. 18—40, [2] с. 5—20, 22—26, 28—32, 54—56.

Энергетические изменения, происходящие в термодинамической системе, определяют по изменению параметров рабочего тела, которое является объектом анализа.

Аналитическое выражение первого закона термодинамики имеет две формы:

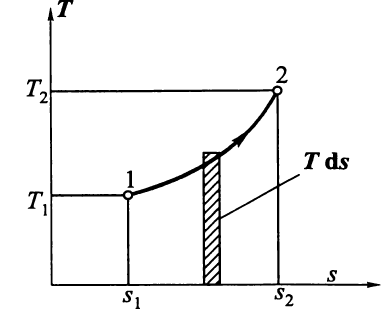
 и .

Следует чётко разобраться в разнице понятий «работа расширения» и «располагаемая работа» и уметь дать (геометрическую интерпретацию их в *pv* – диаграмме.

**!!!** Важно уяснить принципиальную разницу между внутренней энергией, однозначно определяемой данным состоянием рабочего тела, а также работой и теплотой, которые появляются лишь при наличии процесса перехода рабочего тела из одного состоянии в другое и, следовательно, зависят от характера этого процесса. Следует понять разницу между функцией состояния и функцией процесса.

При исследовании функций (параметров) состояния термодинамических систем водятся понятия энтропия и энтольпия.

**Энтропия** (от др.-греч. ἐν «в» + τροπή «обращение; превращение») — введена в рамках термодинамики как функция состояния термодинамической системы, обозначающий меру необратимого рассеивания энергии или бесполезности энергии. Термодинамическая энтропия применяется для описания равновесных (обратимых) процессов.

Этот параметр служит лишь для упрощения термодинамических расчётов, а главное, позволяет графически изобразить теплоту, участвующую в процессе, в *Ts* - анаграмме. Уясните, как из выражения *ds = dq/T* можно установить знак теплоты, участвующей в процессе. Знание этого вопроса поможет при использовании *Тs* – диаграммой, на которой теплота , т. е. площади под кривой процесса. В диаграмме *Ts* эта площадь определяет в масштабе количество теплоты, подведенной к рабочему телу, если *ds>0* или отведенной от него, если *ds<0*.

В термодинамике важную роль играет **энтальпия** - величина, которая является функцией состояния и обозначается Н.

Н = U+pV

**Энтальпия** – это сумма внутренней энергии системы U и произведения давления системы *р* на её объём *V.* Так же, как внутренняя энергия, работа и теплота, она измеряется в джоулях (Дж).

*–* удельная энтальпия,

где h – удельная энтальпия, которая представляет собой энтальпию системы, содержащей 1 кг вещества, и измеряется в Дж/кг.

**!!!** Изменение энтальпии в любом процессе определяется только начальным и конечным состоянием тела и не зависит от характера процесса.

При изобарном процессе (*dp=0*), если давление системы сохраняется неизменным,

*dqp = dh*

*и qp = h2 – h1,*

т. е. теплота, подведённая к системе при постоянном давлении, идёт только на изменение энтальпии данной системы.

**!!!** Это выражение часто используется в расчётах, так как огромное количество процессов подвода теплоты в теплоэнергетике (в паровых котлах, камерах сгорания газовых турбин и реактивных двигателей), а также целый ряд процессов химической технологии и многих других осуществляется при постоянном давлении.

При расчётах практический интерес представляет изменение энтальпии в конечном процессе:

*,*

где *Ср* – теплоёмкость при постоянном давлении.

**Литература:** [1] с. 40—57, [2] с. 45—78.

В термодинамике переход рабочего тела из одного равновесного состояния в другое совершается в обратимом термодинамическом процессе. Задание начального и конечного состояний рабочего тела означает полное знание всех термодинамических параметров состояния начальной и конечной точек процесса. Основная задача исследования термодинамического процесса — определение теплоты (*q1-2*), участвующей в процессе, и работы изменения объёма рабочего тела (*l1-2*). Такие величины, как изменение внутренней энергии (*1*-2), энтальпии (∆*h*1-2) и энтропии (∆*S1-2*) являются вспомогательными, служащими для решения основной задачи.

Общий метод исследования термодинамических процессов называется универсальным, не зависящим от природы рабочего тела. Метод базируется на применении уравнения первого закона термодинамики, записанного в двух равнозначных формах:q*l-2* = ∆*ul-2*­ +  = ∆*hl-2* – .

Различие в применение общего метода исследования к идеальным газам и водяному пару обусловлено отсутствием для пара такого простого уравнения состояния, как уравнение Клапейрона для идеального газа, и сложной зависимостью теплоёмкости пара от температуры и давления. Поэтому решение основной задачи для идеального газа опирается на конечные аналитические зависимости, в то время как для пара применение общего метода требует использования таблиц или диаграммы *Ts* (цикл Ренкина).

Водяной пар является рабочим телом в современных теплосиловых установках, а также находит широкое применение в различных технологических процессах. Необходимо разобраться в процессе парообpaзования и уметь изображать этот процесс в *pv*- и *Ts* диаграммах. Параметры водяного пара можно определить ли таблицам. Для успешного решения различных задач, связанных с водяным паром, научитесь схематично изображать основные процессы (изобарный, изохорный, изотермический и адиабатный) и диаграммы *pv*, *Ts* и *hs*.

**Литература:** [1] с. 63—75, 89—95, [2] с. 33—35, 80—92, 162–178.

**Расчёт газотурбинных установок (ГТУ)**

**Методические указания**

При рассмотрении газотурбинных установок обратите внимание на преимущества их перед поршневыми двигателями внутреннего сгорания. Уясните принцип работы газотурбинных установок, запомните схемы установок и научитесь анализировать их работу, используя *pv-* и *Ts*-диаграммы. Поймите принцип получения уравнения термического к.п.д., обратите внимание на физический смысл этого понятия. Запомните, что при сравнении циклов ГТУ при различных степенях повышения давлений и одинаковых максимальных температурах наибольший к.п.д. имеет цикл с изобарным подводом теплоты. Разберите методы повышения термического к.п.д. и запомните, что регенерация теплоты, ступенчатое сжатие и ступенчатый подвод теплоты значительно повышают к.п.д. газотурбинной установки, а идеальный цикл при этом приближается к обобщенному циклу Карно.

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ**

ТЭЦ включает производство тепловой энер­гии и электрической, её транспортирование и экономное распределение теплоты и электричества между потребителями.

Потребителями теплоты предприятий являются технологическое обо­рудование и технологические процессы, система горячего водоснабже­ния для технологических и хозяйственно-бытовых нужд, системы отопле­ния и вентиляции. Теплоснабжение потребителей обеспечивается, как правило, горячей водой и паром. Горячая вода надежно и экономно обеспечивает теплотой системы отопления, вентиляции, хозяйственно бытовые нужды и некоторые технологические процессы производства. Пар обеспечивает экономное протекание многих технологических процессов. Теплоснабжение предприятий связано со значительными трудо­затратами, которые изменяются в зависимости от схемы теплоснабже­ния. Поэтому необходимо изучить схемы теплоснабжения автотранспортных предприятий при использовании горячей воды и пара в качестве теплоносителей. Обратите внимание на тип установки (паровая котельная, водогрейная котельная или теплоэлектроцентраль) и на параметры теплоснабжения. Нужно уметь определять расход теплоты на технологические нужды, отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение.

Расчётный (максимальный) расход теплоты (Вт) на технологические нужды:

QРтех =278 · 103 ∑ qiPi ,

где qi — удельный расход теплоты на выработку продукции, ГДж/т;

Рi — производительность предприятия, т/ч.

Расчетный (максимальный) расход теплоты (Вт) на отопление:

QPот = q0 · Vн (tвн – tнар) ,

где *qо*—удельная отопительная характеристика здания, Вт/(м2·К);

Vн — объем отопительных зданий по наружному обмеру, м3;

t вн— средняя температура воздуха внутри помещения, °С;

t нар — расчетная наружная температура воздуха, °С.

Расчётный (максимальный) расход теплоты (Вт) на вентиляцию:

QРвен = qв Vн (tвн – tнар),

где *q*в— удельная вентиляционная характеристика здания, Вт/(м2·К).

Расчетный (максимальный) расход теплоты (Вт) на горячее водо­снабжение

QPг.в. = 2Gвсв (tcpг.в. – tх..в.)/ηв,

Gв — расход горячей воды на технологические и хозяйственно-бытовые нужды, кг/с;

св —теплоемкость воды, Дж/(кг · К);

tсрг.в. — средняя температура горячей воды, °С;

t х.в. — температура холодной воды;

ηв=0,94...0,97 — коэффициент полезного использования теплоты в водоподогревателях.

**Литература**: [1] с. 637—655, [2] с. 240—248, 252—254.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Луканин В.Н., Шатров М.Г., Камфер Г.М. Теплотехника. - М.: Высшая школа, 1999.

2. Кузовлев В.А. Техническая термодинамика и основы теплопередачи. - М.: Высшая школа,1983.

3. Нащокин В.В. Техническая термодинамика. – М.: Высшая школа, 1980.

4. Быстрицкий Г. Ф. Общая энергетика (Производство тепловой и электрической энергии): учебник / Г. Ф. Быстрицкий, Г.Г. Гасангаджиев, В.С. Кожиченков. — 2-е изд., стер. — М.: КНОРУС, 2016. — 408 с. — (Бакалавриат). ISBN 978-5-406-04807-8

Содержание контрольной работы и исходные данные по её выполнению

1. Задание на контрольную работу

**!!!** Экономичность современных паросиловых установок можно повысить путём подогрева питательной воды за счёт частично отработавшего пара, отбираемого из турбины. **Этот процесс, называемый регенеративным, позволяет снизить потери тепла с отработавшим паром.**

В задании на контрольную работу указан тип цикла, цикл ГТУ с изобарным подводом (без регенерации и с регенерацией теплоты).

Заданы также некоторые из параметров характерных точек цикла и некоторые величины, характеризующие заданный цикл. Состав рабочего тела задан массовыми долями компонентов, составляющих газовую смесь, или массами компонентов газовой смеси.

* 1. Содержание контрольной работы

1. Представить теоретическое описание цикла:

а) из каких процессов состоит цикл; как изменяются основные термодинамические параметры рабочего тела; как осуществляется подвод или отвод теплоты;

б) описать величины, характеризующие данный цикл.

2. Расчёт характеристик газовой смеси, являющейся рабочим телом:

а) рассчитать молекулярную массу смеси, газовую постоянную смеси;

б) определить удельные изобарные и изохорные теплоёмкости компонентов смеси, на их основе рассчитать удельные изобарные и изохорные теплоёмкости всей смеси;

в) определить показатель адиабаты для смеси.

3. Рассчитать характеристики цикла:

а) определить параметры состояния в характерных точках цикла;

б) определить совершаемую или затрачиваемую работы в каждом процессе цикла, а также цикловую работу ;

в) рассчитать термический КПД  цикла и среднее давление цикла *рt* (для циклов ГТУ – определить оптимальную степень повышения давления ) и дать анализ влияния параметров цикла на величину термического КПД и среднего давления цикла (степени повышения давления);

г) найти изменение в процессах внутренней энергии , энтальпии , энтропии **и количество подведенной и отведенной теплоты в процессах и цикле.

4. Изобразить цикл в *p-v* и *T-s* координатах по расчётным точкам.

1. Теоретические основы расчёта и анализа циклов

**2.1 Определение характеристик газовой смеси**

а) Состав газовой смеси определяется количеством каждого из газов, входящих в смесь, и может быть задан массовыми *gi* или объёмными *ri* долями:

(1)

где *m****i*** — массы отдельных газов;

*m* — масса всей смеси;

vi— приведённые объёмы (объём каждого компонента отнесён к давлению и температуре смеси) компонентов газов, входящих в смесь;

v — общий объём газовой смеси.

Для перевода массовых долей в объемные пользуются формулой:

где *Rсм* - газовая постоянная смеси, Дж/(кг ·К);

*Ri* - газовая постоянная отдельных компонентов, входящих в смесь, Дж/(кг ·К).

Перевод объёмных долей в массовые производится по формуле:

б) Расчёт молекулярной массы смеси по формулам:

 или , (4)

где  - молекулярная масса смеси,  - молекулярная масса *i* –того компонента смеси, *gi –* массовая доля *i* –того компонента смеси, *ri* – объёмная доля *i* –того компонента смеси, *n* – количество компонентов в газовой смеси.

Далее рассчитывается газовая постоянная смеси *Rсм*:

; ; , (5)

где *8314* – универсальная газовая постоянная (постоянная Менделеева).

в) удельную теплоёмкость смеси при постоянном давлении *срсм* определить по уравнению:

, (6)

а удельную теплоёмкость при постоянном объеме с*vсм* - по уравнению:

.

Значения удельных теплоёмкостей каждого из компонентов смеси при постоянном давлении *сpi и* постоянном объёме *сvi* рассчитываются по уравнениям:

; , (7)

где *Ri* – газовая постоянная компонента; *k* – показатель адиабаты.

Уравнение Майера для теплоёмкостей:

г) показатель адиабаты для смеси может быть подсчитан по уравнению:

. (8)

2.2 Определение характеристик цикла

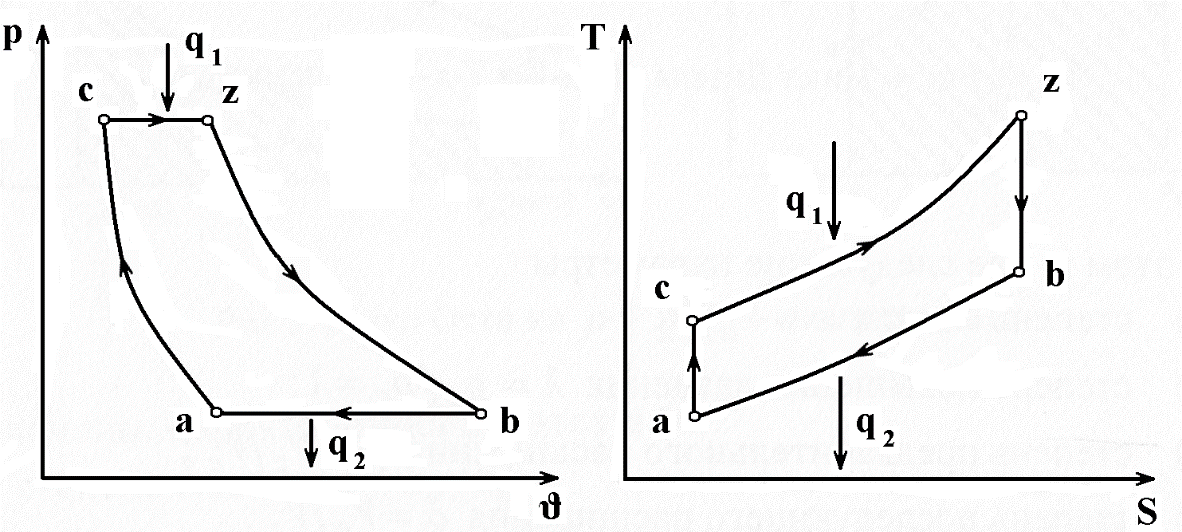
Расчёт ТД-параметров состояния в характерных точках цикла проводится по анализу каждого ТД-процесса. Найденные ТД-параметры состояния характерных точек цикла необходимо внести в таблицу 1.

Таблица 1 - Сводная таблица ТД-параметров

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Обозначение точки | Давление *р*, Па | Удельный объем *v*, м3/кг | Температура *Т*, К |
| *а* |  |  |  |
| *b* |  |  |  |
| *c* |  |  |  |
| ….. |  |  |  |

**2.3 Цикл ГТУ с подводом теплоты при постоянном давлении**

Этот тип ГТУ в настоящее время является основным. Все процессы, протекающие в этом цикле в камере сгорания, а именно: процесс подачи топлива и воздуха, горение топлива, образование рабочей газовой смеси – совершаются непрерывно при постоянном давлении. В итоге поток газовой смеси, протекающий через турбину, получается тоже непрерывным и с установившимися параметрами рабочей смеси.



**Диаграмма** - Цикл ГТУ с изобарным подводом теплоты в *p,v-* и *T*,*s* – диаграммах

Удельное количество подведённой теплоты по изобаре 

.

Удельное количество теплоты, отведенной по изобаре 

.

При этих значениях и  получаем формулу для термического КПД цикла:

. (9)

Введём в расчёт основные характеристики цикла ГТУ с изобарным подводом теплоты:

1) степень повышения давления при адиабатном сжатии (соответствует сжатию воздуха в компрессоре)

;

2) степень предварительного расширения газов при сгорании

.

Выразим температуры , и через температуру .

Из соотношения параметров адиабатного процесса :

; .

Из соотношения параметров изобарного процесса :

;  .

Из соотношения параметров адиабаты :

;

т. к. и, то

.

После подстановки полученных значений температур в уравнение (9) и сокращений, получаем

. (10)

Для циклов ГТУ необходимо подсчитать оптимальную степень повышения давления при адиабатном сжатии *опт*  по формуле

 *опт*= .

**2.4 Определение цикловой работы**

Цикловую работу определяем как разность работ расширения и сжатия процессов, составляющих цикл:

.

Общая формула термического коэффициента полезного действия

,

где - суммарная подводимая теплота в цикле.

После расчётов цикловой работы и термического КПД необходимо дать анализ влияния параметров цикла на значения и , а также проанализировать влияние параметров цикла на значения *рt* или *опт*.

**2.5 Определение изменения в процессах внутренней энергии, энтальпии и энтропии**

Для 1кг рабочего тела изменения в процессах внутренней энергии , энтальпии  и энтропии , произошедшие в процессе , определяем по уравнениям:

;

;



или

.

Для нормальных физических условий (, ) энтропию  условно принимаем равной нулю. Поэтому для начальной точки цикла значение энтропии

,

где

.

После нахождения изменений всех функций, их значения необходимо внести в таблицу 2.

Таблица 2 - Сводная таблица термодинамических функций

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| процессы | *q* | *l* |  |  |  |
| 1-2 |  |  |  |  |  |
| 2-3 |  |  |  |  |  |
| …… |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |

**2.6 Изображение цикла в *p,v-* и *T*,*s* – диаграммах**

Циклы в координатах *p-v* и *T-s* выполняются на миллиметровой бумаге формата А4. Масштабы величин по координатным осям необходимо выбрать так, чтобы максимально использовать формат листа. Для лучшего восприятия рекомендуется высоту диаграммы принимать примерно равной 0,75 её длины.

При изображении цикла в координатах *T-s* необходимо обращать внимание на знак изменения энтропии (подвод теплоты) процесс следует изображать вправо, а при уменьшении энтропии (отвод теплоты) – влево. При построении кривых линий (адиабаты в *p-v* диаграмме и изохоры, изобары в *T-s* диаграмме) необходимо по уравнениям процессов определить положение нескольких промежуточных точек.

1. **Упрощённый пример расчёта газового цикла ГТУ с изобарным подводом теплоты**

**Исходные данные**

Тип цикла: цикл ГТУ с подводом теплоты при .

Параметры в характерных точках цикла:

, , , *Па.*

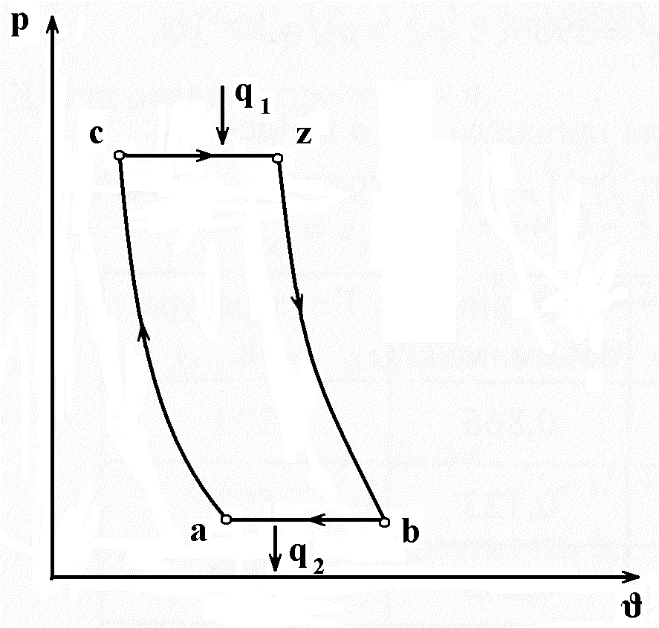
Другие данные:

кДж/(кг⋅К);

кДж/(кг⋅К);

;

Дж/(кг⋅К).



**Диаграмма** - Цикл с изобарным подводом теплоты в *p,v*– диаграмме

**3.1 Цикл состоит из следующих процессов** (см. диаграмму):

- адиабатное сжатие;

- изобарное расширение с подводом теплоты *q1*;

- адиабатное расширение;

- изобарное сжатие c отводом теплоты *q2*.

**3.2 Определяем значение показателя адиабаты для данного рабочего тела**

.

**3.3 Составляем таблицу параметров характерных точек цикла.**

Для точки *a*: К, Па,

м3/кг;

Для точки *с*: К, Па, т. к. , то

Па.

Из соотношения параметров адиабатного процесса найдем объем в т. *с*:

;

м3/кг.

Для точки *z*: К, Па.

Из соотношения параметров изобарного процесса найдем объем в т. *z*:

; м3/кг.

Для точки *b* из соотношения параметров адиабатного процесса :

; ;

, Па,

тогда из соотношения параметров изобарного процесса найдем объем в т. *b*:

; м3/кг.

Данные сведем в таблицу 1.

Таблица 1 – Сводная таблица термодинамических параметров в характерных точках цикла

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Обозначе-  ние точки | Давление *р*, Па | Удельный объем *v*, м3/кг | Температура *Т*, К |
| *a* |  | 0,866 | 300 |
| *c* |  | 0,123 | 593 |
| *z* |  | 0,243 | 1173 |
| *b* |  | 1,71 | 593 |

**3.4 Удельная работа цикла по общей формуле**



Удельную работу цикла для цикла с изобарным подводом теплоты

,

где  - удельная работа сжатия по адиабате , равная

кДж/кг;

 - удельная работа расширения по изобаре :

кДж/кг;

 - удельная работа расширения по адиабате :

кДж/кг;

 - удельная работа сжатия по изобаре :

кДж/кг.

Тогда удельная работа цикла

кДж/кг.

**3.5 Определение теплоты, термического КПД и оптимальной степени повышения давления цикла**

кДж/кг;

кДж/кг.

Для проверки определим работу цикла по формуле

 кДж/кг

Термический КПД цикла по формуле для цикла ГТУ с изобарным подводом теплоты (2.2.5) равен



или по общей формуле

;

.

Расхождение значений должно составлять не более 0,1–0,3%.

Определим погрешность вычислений

%= (0,495–0,495)/0,495=0%.

Определим оптимальную степень повышения давления  *опт*

 *опт*= .

**3.6 Расчёт изменения термодинамических функций рабочего тела**

Определяем изменение энтальпии и внутренней энергии для каждого процесса цикла по общим формулам:

; .

для процесса :

кДж/кг,

кДж/кг;

для процесса :

кДж/кг,

кДж/кг;

для процесса :

кДж/кг,

кДж/кг;

для процесса :

кДж/кг,

кДж/кг.

**3.7 Определение изменения энтропии в процессе цикла**

Энтропия начальной точки для цикла с изобарным подводом теплоты

,

где К; Па,

Дж/(кг⋅К)

для процесса :

, т. к. процесс - адиабатный;

для процесса :

Дж/(кг⋅К);

для процесса :

, т. к. процесс - адиабатный;

для процесса :

Дж/(кг⋅К).

Полученные данные сводятся в сводную таблицу термодинамических функций (табл. 2).

**3.8 Построение рабочей и тепловой диаграмм цикла**

Для изображения адиабатных процессов расширения и сжатия и *p-v* координатах вычислим параметры промежуточных точек *1* и *2* в этих процессах. Выбираем давление в т. *1* и *2* - одинаковое

Па,

тогда

м3/кг;

м3/кг.

Для изображения изобарных процессов и в *T-s* координатах примем промежуточные значения температур этих процессов и вычислим изменение энтропии для промежуточных процессов и :

К, К

Дж/(кг⋅К);

Дж/(кг⋅К).

При этих изменениях энтропии значения энтропии в точках цикла будут определены как:

Дж/(кг⋅К), К;

Дж/(кг⋅К), К;

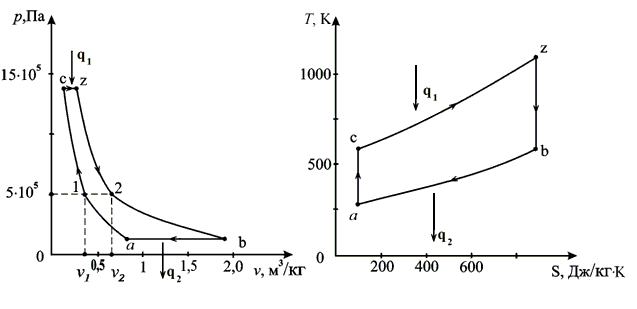
Дж/(кг⋅К), К;

Дж/(кг⋅К), К;

Дж/(кг⋅К), К;

Дж/(кг⋅К), К.

По полученным значениям на двух листах формата А4 в масштабе строятся циклы в *p-v* и *T-s*  - диаграммах (рис. 8).



Цикл ГТУ с изобарным подводом теплоты в *p,v-* и *T*,*s* – диаграммах

**Варианты заданий контрольной работы**

**«Расчёт и анализ газового цикла»**

|  |  |
| --- | --- |
| **№ варианта** | **Название цикла** |
|  | **Цикл ГТУ с изобарным подводом теплоты без регенерации** |
| 1 | pа=90 кПа, tа=270C, pс=0,9 МПа, tz=6000C, mсм=1,4 кг, массовые доли компонентов: N2=0,74; CO2=0,13; H2O=0,08; CO=0,05 |
| 2 | pа=0,08 МПа, tа= - 100C, =5, =3, mсм=1,7 кг, массовые доли компонентов: O2= 0,16: N2=0,72; CO2=0,04; H2O=0,08 |
| 3 | tz=9500C, pа=0,1 МПа, =8, =2,2, mсм=1,6 кг, массовые доли компонентов: O2= 0,2; N2=0,61; CO2=0,1; H2O=0,09 |
| 4 | =9, =2,8, pа=0,8 МПа, tа= -120C, mсм=1,5 кг, массовые доли компонентов: O2= 0,1; N2=0,75; CO2=0,1; H2O=0,01; CO=0,04 |
| 5 | =9, =2,8, pа=0,8 МПа, tа= -120C, mсм=1 кг, массовые доли компонентов: O2= 0,05; N2=0,8; CO2=0,1; H2O=0,01; CO=0,04 |
| 6 | pа=0,15 МПа, pс=0,7 МПа, tа=180C, tz=8300C, массы компонентов: mСO2=1,6 кг; mN2=1,9 кг; mН2O =0,2 кг; mСO=0,7 кг; mO2=0,1 кг |
| 7 | pа=0,1 МПа, pс=0,5 МПа, tа=150C, tz=7500C, массы компонентов: mСO2=1,4 кг; mN2=2,4 кг; mН2O =0,4 кг; mСO=0,2 кг |
| 8 | Tmin=300 К, pmin=0,09 МПа, Tmax=1181 К, =14, массы компонентов: mO2=0,3 кг; mСO2=1,5 кг; mN2=2,6 кг; mН2O =0,5 кг |
| 9 | pа=0,08 МПа, tа= - 100C, =5, =3, mсм=1,4 кг, массовые доли компонентов: O2= 0,06; N2=0,74; CO2=0,14; H2O=0,02; CO=0,04 |
| 10 | tz=9500C, pа=0,1 МПа, =9, =2,2, массы компонентов: mСO2=1,2 кг; mN2=2,2 кг; mН2O =0,2 кг; mСO=0,3 кг; mO2=0,4 кг |
| 11 | =12, =2,7, pа=150 кПа, tа= - 150C, массы компонентов: mСO2=1,6 кг; mN2=2,2 кг; mН2O =0,1 кг; mСO=0,4 кг; mO2=0,4 кг |
| 12 | =8, =2,7, pа=150кПа, tа= - 150C, mсм=1 кг, массовые доли компонентов: O2= 0,2; N2=0,61; CO2=0,1; H2O=0,09 |
| 13 | pа=90 кПа, tа=270C, pс=0,9 МПа, tz=6000C, mсм=1,4 кг, массовые доли компонентов: N2=0,74; CO2=0,13; H2O=0,08; CO=0,05 |
| 14 | pа=0,08 МПа, tа= - 100C, =5, =3, mсм=1,7 кг, массовые доли компонентов: O2= 0,16: N2=0,72; CO2=0,04; H2O=0,08 |
| 15 | tz=9500C, pа=0,1 МПа, =8, =2,2, mсм=1,6 кг, массовые доли компонентов: O2= 0,2; N2=0,61; CO2=0,1; H2O=0,09 |

**ПРИЛОЖЕНИЕ**

Таблица 1 - Средние массовые теплоёмкости газов при постоянном давлении , *кДж/()*

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| C | O | N  (атмос-ферный) | CO | CO | HO | SO | Воздух  (абс. сухой) |
| 0  100  200  300  400  500  600  700  800  900  1000  1100  1200  1300  1400  1500  1600  1700  1800  1900  2000  2100  2200  2300  2400  2500 | 0,9148  0,9232  0,9353  0,9500  0,9651  0,9793  0,9927  1,0048  1,0157  1,0258  1,0350  1,0434  1,0509  1,0580  1,0647  1,0714  1,0773  1,0831  1,0886  1,0940  1,0990  1,1041  1,1087  1,1137  1,1183  1,1229 | 1,0304  1,0316  1,0346  1,0400  1,0475  1,0567  1,0668  1,0777  1,0881  1,0982  1,1078  1,1170  1,1258  1,1342  1,1422  1,1497  1,1564  1,1631  1,1690  1,1748  1,1803  1,1853  1,1903  1,1946  1,1991  1,2029 | 1,0396  1,0417  1,0463  1,0538  1,0634  1,0748  1,0861  1,0978  1,1091  1,1200  1,1304  1,1401  1,1493  1,1577  1,1656  1,1731  1,1798  1,1865  1,1924  1,1983  1,2033  1,2083  1,2129  1,2176  1,2217  1,2259 | 0,8148  0,8658  0,9102  0,9487  0,9826  1,0128  1,0396  1,0639  1,0852  1,1045  1,1225  1,1384  1,1530  1,1660  1,1782  1,1895  1,1995  1,2091  1,2179  1,2259  1,2334  1,2405  1,2468  1,2531  1,2586  1,2636 | 1,8594  1,8728  1,8937  1,9192  1,9477  1,9778  2,0092  2,0419  2,0754  2,1097  2,1436  2,1771  2,2106  2,2429  2,2743  2,3048  2,3346  2,3630  2,3907  2,4166  2,4422  2,4661  2,4895  2,5121  2,5334  2,5544 | 0,607  0,636  0,662  0,687  0,708  0,724  0,737  0,754  0,762  0,775  0,783  0,791  0,795  \_\_  \_\_  \_\_ \_\_  \_\_  \_\_  \_\_  \_\_  \_\_  \_\_  \_\_  \_\_  \_\_ | 1,0038  1,0062  1,0118  1,0191  1,0283  1,0387  1,0454  1,0603  1,0710  1,0815  1,0907  1,0998  1,1072  1,1106  1,1242  1,1313  1,1380  1,1443  1,1501  1,1560  1,1610  1,1664  1,1710  1,1757  1,1803  1,1840 |

**ПРИЛОЖЕНИЕ**

Таблица - Удельные газовые постоянные и молярные массы некоторых газов и водяного пара

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Наименование газа** | **Химическая формула** | **Удельная газовая постоянная *R*, Дж/(кг\*К)** | **Молярная масса** |
| Водород | H2 | 4124,3 | 2,0159 |
| Метан | CH4 | 518,25 | 16,043 |
| Аммиак | NH3 | 488,20 | 17,031 |
| Азот | N2 | 296,8 | 28,013 |
| Воздух | - | 287,10 | 28,970 |
| Кислород | O2 | 259,80 | 31,996 |
| Углекислый газ | CO2 | 188,90 | 44,0079 |
| Окись углерода | CO | 296,80 | 28,011 |
| Водяной пар | H2O | 461,50 | 18,014 |