ФГБОУ ВО «ТВЕРСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «**Гидравлика, теплотехника и гидропривод**»

Методическое указание для расчетно-графической работы

***«Расчёт идеального цикла теплового двигателя».***

Составитель: доцент каф. ГТиГП

к.т.н Щербакова Д.М.

Тверь 2023

Содержание

[Ведение 3](#_Toc18887025)

[1. Условие задания 3](#_Toc18887026)

[2. Алгоритм решения 4](#_Toc18887027)

[3. Расчетные формулы 4](#_Toc18887028)

[Построение графика в T-S координатах. 8](#_Toc18887029)

[Библиографический список 10](#_Toc18887030)

[*Приложение 1* 11](#_Toc18887031)

[*Приложение 2* 14](#_Toc18887032)

[*Приложение 3* 15](#_Toc18887033)

[Примечания 17](#_Toc18887034)

# Ведение

Изменение двух параметров состояния определятся изменение состояния системы, а следовательно, и остальных параметров. Однако немаловажный практический интерес представляют частные термодинамические процесс: изохорный, протекающий при постоянном объеме, изобарный – при постоянном давлении, изотермический – при постоянной температуре, адиабатный, протекающий без теплообмена с окружающее средой. Обобщающим процессом, охватывающим всю совокупность основных термодинамических процессов, является политропным процессом.

Задачей анализа термодинамического процесса – установление закономерностей изменения параметров состояния рабочего тела и особенностей превращения энергии в данном процессе.

# 1. Условие задания

Задан идеальный термодинамический цикл тепловой машины со смешанным подводом тепла (Рис.1).

Рабочим телом является газовая трехкомпонентная смесь. Тело совершает в тепловом двигателе круговой процесс (цикл) по преобразованию теплоты в механическую работу.

В цикле предполагается что процессы:(2—3) и (5—1) — изохорные; (3—4) — изобарный; (1—2) и (4—5) — политропные.

Данные для расчетов представлены в виде 5 вариантов исходных значений с 5 разными вариациями цифровых значений (*Приложение 1*). Каждому студенту индивидуально выдаются исходные данные по шифру, состоящему из двух цифр – вариант и вариация значений.

Расчетно-графическая работа (РГР) предполагает закрепление знаний по темам «Первый закон термодинамики» и «Второй закон термодинамики».

В РГР требуется выполнить:

- для заданного состава смеси газов выбрать характерные для каждого компонента показатели и рассчитать их значения (*Приложение 2*);

- во втором блоке необходимо рассчитать основные параметры состояния в пяти точках заданного цикла;

- в третьем блоке необходимо рассчитать для каждого процесса в цикле изменения внутренней энергии, энтальпии и энтропии;

- в четвертом блоке рассчитывается значения теплоты и работы, а так же определить термический кпд цикла;

- начертить на миллиметровом листе бумаги формата А4 в соответствующем масштабе график цикла в T-S координатам по полученным параметрам 5 точек.

**Работа выполняется в письменном виде**. Расчеты по каждому блоку поясняются в рабочей тетради в клетку формата А5, а расчетные значения предоставляются в отдельной таблице (*Приложение 3*).

# 2. Алгоритм решения

Предлагаемый вариант алгоритма решения:

- проверяем возможность использования уравнений процессов *v=const* и *p=const*;

- если заданы такие параметры процессов, как степень сжатия

$ε=^{V\_{1}}/\_{V\_{2}}$, степень повышения давления $ρ=^{P\_{3}}/\_{P\_{2}}$ и степень предварительного расширения $λ=^{V\_{4}}/\_{V\_{3}}$, применяем их;

– далее используем заданные в исходных данных (если они есть) изменения внутренней энергии и энтальпии;

– далее проверяем для каждой из пяти точек возможность применения уравнения состояния для идеального рабочего тела;

– при условии задания показателей политропы в процессах цикла используем их так же для нахождения недостающих параметров.

 Параметры следующего блока определяем или по исходным данным или по уравнениям

# 3. Расчетные формулы

r – объемная доля газа, µ - молярный вес газа, µС – молярная теплоемкость,

V- удельныйобъем, Р – давление, Т- температура,

k- показатель адиабаты, n – показатель политропы,

R- характеристическая газовая постоянная,

Δu –изменение внутренней энергии, Δh – изменение энтальпии, Δs – изменение энтропии,

q – тепло, qцикла - тепло за цикла,

l – работа, lцикла – работа за цикл,

q1 – тепло, подведенное к рабочему телу,

$η\_{t}$ – термический коэффициент полезного действия,

Тmax – максимальная температура рабочего тела,

Тmin– минимальная температура рабочего тела.

**Первый блок**

1. Доля компонента смеси газов:

$M\_{см}=M\_{1}+M\_{2}+M\_{3}$*,* (1)

где *М1, М2, М3* – масса каждого компонента смеси газов.

Кажущийся молекулярный вес смеси газов:

$μ\_{см}=μ\_{1}∙r\_{1}+μ\_{2}∙r\_{2}+μ\_{3}∙r\_{3}$, (2)

где$μ\_{1}$, $μ\_{2}$, $μ\_{3}$ – молекулярный вес каждого компонента смеси газов.

Массовая доля:

$g\_{n}=\frac{M\_{n}}{M\_{см}}$, (3)

где $g\_{n}$ – массовая доля компонента смеси газов; *Мn*– масса n-го компонента смеси газов.

Для определения объемной доли компонента смеси газов необходимо найти молярный объем *vn* каждого компонента смеси газа и молярный объем смеси газа *vсм*.

$v\_{n}=\frac{g\_{n}}{μ\_{n}}$, (4)

где*μn* – молекулярный вес n-го компонента смеси газа.

Молярный объем смеси газа:

$v\_{см}=\sum\_{}^{}v\_{n}$. (5)

Объемная доля компонента смеси газа:

$r\_{n}=\frac{v\_{n}}{v\_{см}}$, (6)

2. Определение характеристической газовой постоянной:

- дляn-го компонента смеси газов:

$R\_{n}=\frac{8314}{μ\_{n}}$,(7)

- для смеси газов:

$R\_{см}=g\_{1}·R\_{1}+g\_{2}·R\_{2}+g\_{2}·R\_{2}$, (8)

3. Теплоемкость смеси

- при постоянном объеме:

$c\_{v}=\sum\_{}^{}\frac{g\_{n}∙μC\_{v\_{n}}}{μ\_{n}}$, (9)

где $μc\_{v}\_{n}$ – молярная теплоемкость n-го компонента смеси при v = const.

- при постоянном давлении:

$c\_{p}=\sum\_{}^{}\frac{g\_{n}∙μc\_{p\_{n}}}{μ\_{n}}$, (10)

где $μc\_{p}\_{n}$ – молярная теплоемкость n-го компонента смеси при p = const.

Показатель адиабаты:

$k=\frac{c\_{p}}{c\_{v}}$. (11)

**Второй блок**

Для расчета основных параметров точек используется уравнение состояния идеального газа:

$P\_{n}V\_{n}=R\_{см}T\_{n}$, (12)

где $P\_{n}$, $V\_{n}$, $T\_{n}$ – параметры состояния газа в каждой точке цикла.

По известным параметрам состояния в каждой точке находится показатель политропы*n*и теплоемкость смеси *с* для процессов 1-2 и 4-5:

$n\_{1-2}=\frac{ln\left(\frac{P\_{1}}{P\_{2}}\right)}{ln\left(\frac{V\_{2}}{V\_{1}}\right)}$, (13)

аналогично рассчитывается показатель политропы для процесса 4-5 $n\_{4-5}$;

$c\_{1-2}=c\_{v}∙\frac{\left(n\_{1-2}-k\right)}{\left(n\_{1-2}-1\right)}$, (14)

аналогично рассчитывается теплоемкость смеси для процесса 4-5 $c\_{4-5}$

Из уравнения (12) выражается и высчитывается неизвестный параметр точки, однако не в каждом варианте есть возможность применить данное уравнение для каждой точки цикла. Так, например, при заданном показателе политропы$n\_{1-2}$ давление в точке P2 будет рассчитываться следующим образом:

т.к$\frac{P\_{2}}{P\_{1}}=\left(\frac{V\_{1}}{V\_{2}}\right)^{n\_{1-2}}$, (15)

то выражая Р2 получается:

$P\_{2}=P\_{1}∙\left(\frac{V\_{1}}{V\_{2}}\right)^{n\_{1-2}}$ .

Аналогично рассматриваются параметры давлений в точке 5 при заданном показатели политропы $n\_{4-5}$.

**Третий блок**

Изменение внутренней энергии в процессах находится по формуле:

$∆u=c\_{v}∙∆T$*,*(16)

где $∆T$ – разность температур в К, например для процесса 1-2 $∆T=T\_{2}-T\_{1}$.

Изменение энтальпии в процессах находится по формуле:

$∆h=C\_{p}∙∆T$*.*(17)

Изменение энтропии в процессах находится по формулам:

- для политропных процессов 1-2 и 4-5:

$∆S\_{1-2}=c\_{1-2}∙ln\left(\frac{T\_{2}}{T\_{1}}\right)$; $∆S\_{4-5}=c\_{4-5}∙ln\left(\frac{T\_{5}}{T\_{4}}\right)$ (18)

- для изобарного процесса 3-4:

$∆S\_{3-4}=c\_{P}∙ln\left(\frac{T\_{4}}{T\_{5}}\right)$; (19)

- для изохорных процессов 2-3 и 5-1:

$∆S\_{2-3}=c\_{V}∙ln\left(\frac{T\_{3}}{T\_{2}}\right)$; $∆S\_{5-1}=c\_{V}∙ln\left(\frac{T\_{1}}{T\_{5}}\right)$. (20)

**Четвертый блок**

1. Расчет теплоты процессов циклов производится по формулам:

- для политропных процессов 1-2 и 4-5:

$q\_{1-2}=c\_{1-2}∙∆T$; $q\_{4-5}=c\_{4-5}∙∆T$; (21)

- для изобарного процесса 3-4:

$q\_{3-4}=c\_{p}∙∆T$, (22)

- для изохорных процессов 2-3 и 5-1:

$q\_{2-3}=c\_{V}∙∆T$; $q\_{5-1}=c\_{V}∙∆T$. (23)

2. Расчет работы для процессов идеального цикла.

Так как в изохорных процессах *v=const*, то работа в циклах 2-3 и 5-1 будет равна нулю: $l\_{2-3}=0$*;* $l\_{5-1}=0$*.*

В политропных процессах 1-2 и 4-5 работа определяется по формулам:

$l\_{1-2}=0,001∙\frac{\left(R\_{см}∙∆T\right)}{\left(n\_{1-2}-1\right)}$; $l\_{4-5}=0,001∙\frac{\left(R\_{см}∙∆T\right)}{\left(n\_{4-5}-1\right)}$. (24)

Где $∙∆T$ – разность температур К, например, для процесса 1-2 $∆T=T\_{1}-T\_{2}$.

В изохорном процессе 3-4 работа определяется по формуле:

$l\_{3-4}=0,001∙P\_{3}∙∆V$*,* (25)

где $∆V$– разность объемов в м3/кг, например для процесса 4-3 $∆V=V\_{4}-V\_{3}$, $∆Т=Т\_{3}-Т\_{4}$

3. Суммарная теплота цикла определяется как алгебраическая сумма теплоты всех 5 процессов цикла:

$q\_{цикла}=\sum\_{}^{}q\_{n}$, (26)

где $q\_{n}$ – тепло n-го процесса цикла.

4. Суммарная работа цикла определяется как алгебраическая сумма работ всех 5 процессов цикла:

$l\_{цикла}=\sum\_{}^{}l\_{n}$, (27)

где $l\_{n}$ – работа n-го процесса цикла.

5. Тепло, подведенное к рабочему телу, в цикле q1 определяется как сумма всей положительной теплоты циклов:

$q\_{1}=\sum\_{}^{}q\_{n}>0$. (28)

6. Термический коэффициент полезного действия цикла рассчитывается как отношение работы цикла к его теплу подведенного к рабочему телу:

$η\_{t}=\frac{l\_{цикла}}{q\_{1}}$. (29)

Минимальная $T\_{min}$ и максимальная $T\_{max}$температуры рабочего тела в цикле выбирается из рассчитанных параметров точек цикла.

# Построение графика в T-S координатах.

На **миллиметровой бумаге** выбирается масштаб и строится координатная плоскость T-S. На оси *Т* отмечается температура каждой точки. Положительные значения *ΔS* строятся в правую сторону по оси *S*, отрицательные значения в левую.

Пример 1.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № точки цикла | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| T, К | 215 | 882 | 1799 | 2443 | 1911 |
| ΔS | 0.19 | 0.81 | 0.53 | 0.95 | -2.48 |

*Построение первой точки*: на оси*Т* указывается температура первой точки Т1. Так как точка 1 начала цикла и в ней изменения значения энтропии Sне произошло, то на оси S отмечается значение 0. Таким образом координаты первой точки *Т1*=215, *S1*=0

*Построение второй точки*: на оси*Т* указывается температура второй точки Т2. Так как произошло изменение температуры, как следствие изменилось значение энтропии и образовалось значение энтропии в процессе 1-2. *ΔS1-2>0*, то значение энтропии откладывается в правую сторону по оси Sи прибавляется к предыдущему значению энтропии: $S\_{2}=S\_{1}-ΔS\_{1-2}$. Координаты второй точки: *Т2*=882, *S2*=0.19.

*Построение третьей точки*: на оси*Т* указывается температура третьей точки Т3. Так как *ΔS2-3>0*, то значение плюсуется к предыдущему значению энтропии: $S\_{3}=S\_{2}-ΔS\_{2-3}$. Координаты третьей точки: *Т3*=1799, *S3*=1.

*Построение четвертой то*чки: на оси*Т* указывается значение температуры четвертой точки Т4. Так как *ΔS3-4>0*, то значение плюсуется к предыдущему значению энтропии: $S\_{4}=S\_{3}-ΔS\_{3-4}$. Координаты четвертой точки: *Т4*=2443, *S4*=1.53.

*Построение пятой точки*: на оси*Т* указывается значение температуры четвертой точки Т5. Так как *ΔS4-5>0*, то значение плюсуется к предыдущему значению энтропии: $S\_{5}=S\_{4}-ΔS\_{4-5}$. Координаты пятой точки: *Т5*=1911, *S5*=2,48.

*Построение конечной точки*: Так как заданный идеальный цикл замкнутый то на оси Т указывается значение температуры первой точки Т1. Значение *ΔS5-1<0*, то значение отнимаетсяот предыдущего значения энтропии: $S\_{к}=S\_{5}-ΔS\_{5-1}$и должны стать равными значениям первой точки. Координаты конечной точки: *Тк*=215, *Sк*=0.

Если значения изменения энтропий рассчитаны, верно, то сумма всех значений энтропии равна нулю и координаты первоначальной точки 1 и конечной 6 совпадают.

В этом случае расчет идеального цикла произведен, верно.

**1**

**5-1**

**4-5**

**3-4**

**2-3**

**1-2**

**5**

**4**

**3**

**2**

Рис. 2 График идеального цикла в Т-S координатах

# Библиографический список

1 .Теплотехника. Учебник для вузов, под редакцией д.т.н. А.М.Архарова, д.т.н. В.Н.Афанасьева. М., изд. МГТУ им. Баумана, 2004 г. - 711 с.

2. Теплотехника: Учебник для вузов / А.П.Баскаков, Б.В.Берг, О.К.Витт и др.; под ред. А.П.Баскакова - М.: Энергоиздат, 1982 - 264 с :ил.

3.Бальян СВ. Техническая термодинамика и тепловые двигатели. Учебное пособие для студентов неэнергетических специальностей втузов.Изд. 2-е, перераб. и доп.Л.,«Машиностроение»,1973.304 с.

# *Приложение 1*

Вариант 1

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **УСЛОВИЕ ЗАДАНИЯ** | **Единицы измерения** | Выбор варианта |
| **1** | **2** | **3** | **4** | **5** |
| Масса первого компонента смеси, M1:  | кг | N2O | 2,3 | H2S | 0,7 | HCl | 1,1 | O2 | 2,1 | N2 | 0,3 |
| Масса второго компонента смеси, M2:  | кг | H2 | 1,7 | C4H10O | 1 | Ar | 1,2 | He | 0,9 | SO2 | 1,7 |
| Масса третьего компонента смеси, M3:  | кг | C4H1OO | 3,4 | Cl2 | 0,5 | H2 | 0,9 | Cl2 | 1,1 | Kr | 0,9 |
| Температура в точке 1 | К | T1 | 294,6 | T1 | 292,8 | T1 | 290,2 | T1 | 271,5 | T1 | 280 |
| Степень сжатия в процессе 1 -2 | - | ε | 20 | ε | 20 | ε | 17 | ε | 22 | ε | 16 |
| Степень повышения давления в процессе 2 -3 | - | ρ | 1,9 | ρ | 2,3 | ρ | 1,6 | ρ | 1,9 | ρ | 1,4 |
| Температура в точке 3 | К | T3 | 776,4 | T3 | 933,5 | T3 | 650,5 | T3 | 720,2 | T3 | 648,3 |
| Давление в точке 4 | бар | P4 | 38,37 | P4 | 64,4 | P4 | 39,25 | P4 | 51,4 | P4 | 32,7 |
| Удельный объем в точке 4 | м3/кг | V4 | 0,274 | V4 | 0,052 | V4 | 0,439 | V4 | 0,591 | V4 | 0,019 |
| Давление в точке 5 | бар | P5 | 3,95 | P5 | 2,65 | P5 | 3,25 | P5 | 2,97 | P5 | 3,15 |

Вариант 2

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **УСЛОВИЕ ЗАДАНИЯ** | **Единицы измерения** | **Выбор варианта** |
| **1** | **2** | **3** | **4** | **5** |
| Массовая доля первого компонента смеси газов, g1 | – | O2 | 0,565 | C2H6 | 0,85 | CO | 0,457 | C5H12 | 0,123 | F2 | 0,151 |
| Массовая доля второго компонента смеси газов, g2 | – | Hg | 0,304 | H2O | 0,1 | He | 0,286 | Xe | 0,478 | O2 | 0,589 |
| Массовая доля третьего компонента смеси газов, g3 | – | CO | 0,13 | NH3 | 0,05 | SO2 | 0,257 | Воздух | 0,399 | HCl | 0,26 |
| Степень сжатия в процессе 1 -2 | – | ε | 12 | ε | 16 | ε | 17 | ε | 10 | ε | 15 |
| Показатель политропы в процессе 1 - 2 | – | n1-2 | 1,112 | n1-2 | 1,129 | n1-2 | 1,119 | n1-2 | 1,119 | n1-2 | 1,245 |
| Температура в точке 2 | К | T2 | 382,3 | T2 | 429,1 | T2 | 421,8 | T2 | 398,7 | T2 | 418,19 |
| Удельный объем в точке 3 | м3/кг | V3 | 0,045 | V3 | 0,052 | V3 | 0,122 | V3 | 0,287 | V3 | 0,387 |
| Степень предварительного расширения в процессе 3 - 4 | – | λ | 1,5 | λ | 2,5 | λ | 2 | λ | 3 | λ | 2,1 |
| Давление в точке 4 | бар | P4 | 40,32 | P4 | 30,48 | P4 | 42,29 | P4 | 41,28 | P4 | 39,54 |
| Показатель политропы в процессе 4 - 5 | – | n 4-5 | 1,104 | n 4-5 | 0,967 | n 4-5 | 0,993 | n 4-5 | 0,937 | n 4-5 | 1,018 |

Вариант 3

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **УСЛОВИЕ ЗАДАНИЯ** | **Единицы измерения** | **Выбор варианта** |
| **1** | **2** | **3** | **4** | **5** |
| Массовая доля первого компонента смеси газов, g1 | - | CO | 0,165 | Xe | 0,389 | H2S | 0,278 | C6H14 | 0,194 | HCl | 0,269 |
| Массовая доля второго компонента смеси газов, g2 | - | He | 0,794 | Kr | 0,306 | C4H1OO | 0,222 | H2S | 0,4 | Ar | 0,491 |
| Массовая доля третьего компонента смеси газов, g3 | - | SO2 | 0,041 | O2 | 0,306 | Cl2 | 0,5 | SO2 | 0,406 | Kr | 0,24 |
| Показатель политропы в процессе 1 - 2 | - | n1-2 | 1,119 | n1-2 | 1,215 | n1-2 | 1,119 | n1-2 | 1,131 | n1-2 | 1,111 |
| Степень сжатия в процессе 1 -2 | - | ε | 17 | ε | 21 | ε | 17 | ε | 22 | ε | 19 |
| Давление в точке 1 | - | P1 | 1,05 | P1 | 1,05 | P1 | 1,05 | P1 | 1,09 | P1 | 1,12 |
| Давление в точке 3 | бар | P3 | 40,01 | P3 | 63,65 | P3 | 40,01 | P3 | 61,97 | P3 | 37,17 |
| Степень предварительного расширения в процессе 3 - 4 | - | λ | 2 | λ | 1,6 | λ | 2 | λ | 2,7 | λ | 1,9 |
| Удельный объем в точке 4 | м3/кг | V4 | 0,261 | V4 | 0,028 | V4 | 0,049 | V4 | 0,057 | V4 | 0,314 |
| Показатель политропы в процессе 4 - 5 | - | n 4-5 | 1,217 | n 4-5 | 1,192 | n 4-5 | 1,217 | n 4-5 | 1,297 | n 4-5 | 1,213 |

Вариант 4

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **УСЛОВИЕ ЗАДАНИЯ** | **Единицы измерения** | **Выбор варианта** |
| **1** | **2** | **3** | **4** | **5** |
| Масса первого компонента смеси, M1:  | - | CO | 1,5 | NH3 | 0,5 | Hg | 0,9 | Xe | 1,5 | HCl | 1,3 |
| Масса второго компонента смеси, M2:  | - | He | 1,2 | C2H6 | 0,5 | HCl | 1,2 | C4H10 | 0,2 | C6H14 | 0,7 |
| Масса третьего компонента смеси, M3:  | - | SO2 | 1,1 | H2S | 1,1 | F2 | 0,7 | Воздух | 0,93 | O2 | 1,9 |
| Удельный объем в точке 1 | м3/кг | V1 | 2,353 | V1 | 0,878 | V1 | 0,458 | V1 | 0,391 | V1 | 1,382 |
| Показатель политропы в процессе 1 - 2 | - | n1-2 | 1,215 | n1-2 | 1,215 | n1-2 | 1,2 | n1-2 | 1,119 | n1-2 | 1,2 |
| Степень сжатия в процессе 1 -2 | - | ε | 21 | ε | 21 | ε | 18 | ε | 20 | ε | 21 |
| Температура в точке 2 | К | T2 | 563,4 | T2 | 569,03 | T2 | 518,49 | T2 | 571,16 | T2 | 611,32 |
| Изменение энтальпии в процессе 2-3 | кДж/кг | Δh2-3 | 632,66 | Δh2-3 | 408,93 | Δh2-3 | 244,923 | Δh2-3 | 239,17 | Δh2-3 | 517,18 |
| Удельный объем в точке 4 | м3/кг | V4 | 0,179 | V4 | 0,0672 | V4 | 0.148 | V4 | 2,814 | V4 | 0,087 |
| Показатель политропы в процессе 4 - 5 | - | n4-5 | 1,22 | n4-5 | 1,075 | n4-5 | 1,7 | n4-5 | 1,039 | n4-5 | 1,005 |

Вариант 5

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **УСЛОВИЕ ЗАДАНИЯ** | **Единицы измерения** | **Выбор варианта** |
| **1** | **2** | **3** | **4** | **5** |
| Масса первого компонента смеси, M1:  | - | Cl2 | 0,8 | HCl | 1,2 | CO | 1,5 | N2O | 0,9 | Kr | 1,5 |
| Масса второго компонента смеси, M2:  | - | N2 | 1,3 | Ae | 1,7 | He | 0,9 | Cl2 | 1,1 | Xe | 0,7 |
| Масса третьего компонента смеси, M3:  | - | He | 0,7 | H2 | 0,7 | SO2 | 1,1 | Ae | 2,9 | Cl2 | 1,12 |
| Удельный объем в точке 1 | м3/кг | V1 | 1,957 | V1 | 1,03 | V1 | 2,09 | V1 | 2,01 | V1 | 1,08 |
| Показатель политропы в процессе 1 - 2 | - | n 1-2 | 1,201 | n 1-2 | 1,201 | n 1-2 | 1,4 | n 1-2 | 1,201 | n 1-2 | 1,201 |
| Давление в точке 2 | бар | P2 | 33,47 | P2 | 33,15 | P2 | 22 | P2 | 33,84 | P2 | 33,19 |
| Степень повышения давления в процессе 2-3 | - | ρ | 1,8 | ρ | 1,8 | ρ | 2,04 | ρ | 1,9 | ρ | 1,7 |
| Изменение энтальпии в процессе 3-4 | кДж/кг | Δh 3-4 | 1460,48 | Δh3-4 | 2507,55 | Δh3-4 | 1119,24 | Δh3-4 | 2498,1 | Δh3-4 | 1480,47 |
| Давление в точке 5 | бар | P5 | 3,95 | P5 | 3,25 | P5 | 4,55 | P5 | 3,51 | P5 | 3,75 |
| Изменение внутренней энергии в процессе 5-1 | кДж/кг | u 4-5 | -703,08 | u 4-5 | -1763,12 | u 4-5 | -604 | u 4-5 | -1740,18 | u 4-5 | -690,4 |

# *Приложение 2*

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Газ | Условное обозначение | μ,кг / кмоль | μCv,кДж /кмоль·К | μCp,кДж /кмоль·К |
| Азот | N2 | 28 | 20,7 | 29,04 |
| Фтор | F2 | 38 | 22,99 | 31,3 |
| Водород | H2 | 2 | 20,24 | 28,58 |
| Двуокись углерода | CO2 | 44 | 28,11 | 36,66 |
| Окись углерода | CO | 28 | 20,66 | 29,04 |
| Гексан | C6H14 | 86,2 | 121,93 | 131,57 |
| Воздух | Воздух | 29 | 20,84 | 29,15 |
| Аргон | Ar | 39,9 | 12,61 | 20,95 |
| Сероводород | H2S | 34,1 | 27,36 | 36,12 |
| Аммиак | NH3 | 17 | 27,21 | 35,5 |
| Хлор | Cl2 | 70,9 | 25,14 | 34,11 |
| Пары ртути | Hg | 200,6 | 12,55 | 20,86 |
| Окись азота | NO | 30 | 21,41 | 29,72 |
| Кислород | O2 | 32 | 20,78 | 29,12 |
| Хлористый водород | HCl | 36,5 | 20,99 | 29,62 |
| Гелий | He | 4 | 12,57 | 20,91 |
| Этан | C2H6 | 30,1 | 39,85 | 48,56 |
| Метан | C2H4 | 16 | 33,48 | 42,11 |
| Ксенон | Xe | 131,3 | 12,48 | 20,79 |
| Окись углерода | CO | 28 | 20,66 | 29,04 |
| Неон | Ne | 20,2 | 12,46 | 20,81 |
| Водяной пар | H2O | 18 | 26,43 | 34,74 |
| Закись азота | N2O | 44 | 28,32 | 36,91 |
| Этиловый эфир | C4H10O | 74 | 183,12 | 191,44 |
| Бутан | С4H10 | 58 | 154,67 | 162,98 |
| Сернистый газ | SO2 | 64,1 | 31,51 | 40,64 |
| Пентан | С5Н12 | 72 | 192,57 | 200,88 |
| Криптон | Kr | 83,7 | 12,48 | 20,84 |

# *Приложение 3*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **РАСЧЕТ ИДЕАЛЬНОГО ЦИКЛА** | **Вариант** | **Шифр** |
|  |  |
| **ФИО** | **Группа** | **Вуз (кратко)** | **Дата выдачи** |  |
|  |  |  | **Дата сдачи** |  |
| **УСЛОВИЕ ЗАДАНИЯ** | **Условные обозначения** | **Единицы измерения** | **Значения из варианта** |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
| **ПЕРВЫЙ БЛОК** | **Условные обозначения** | **Единицы измерения** | **Расчетные значения** |
| Молекулярный вес первого компонента: | μ1 | кг/кмоль |  |
| Молекулярный вес второго компонента: | μ2 | кг/кмоль |  |
| Молекулярный вес третьего компонента: | μ3 | кг/кмоль |  |
| Молярная теплоемкость 1-го компонента смеси при v = const | μCv1 | кДж/кмоль·К |  |
| Молярная теплоемкость 2-го компонента смеси при v = const | μCv2 | кДж/кмоль·К |  |
| Молярная теплоемкость 3-го компонента смеси при v = const | μCv3 | кДж/кмоль·К |  |
| Молярная теплоемкость 1-го компонента смеси при P = const | μCp1 | кДж/кмоль·К |  |
| Молярная теплоемкость 2-го компонента смеси при P = const | μCp2 | кДж/кмоль·К |  |
| Молярная теплоемкость 3-го компонента смеси при P = const | μCp3 | кДж/кмоль·К |  |
| Характеристическая газовая постоянная 1-го компонента смеси газов | R1 | Дж/(кг·К) |  |
| Характеристическая газовая постоянная 2-го компонента смеси газов | R2 | Дж/(кг·К) |  |
| Характеристическая газовая постоянная 3-го компонента смеси газов | R3 | Дж/(кг·К) |  |
| Кажущийся молекулярный вес смеси газов | μсм | кг/кмоль |  |
| Характеристическая газовая постоянная смеси газов | RСМ | Дж/(кг·К) |  |
| Теплоемкость смеси при постоянном объеме | CV | кДж/кг |  |
| Теплоемкость смеси при постоянном давлении | CP | кДж/кг |  |
| Показатель адиабаты | k | ― |  |
| **ВТОРОЙ БЛОК** | **Условные обозначения** | **Единицы измерения** | **Расчетные значения** |
| Давление в точке 1 | P1 | бар |  |
| Удельный объем в точке 1 | V1 | м3/кг |  |
| Температура в точке 1 | T1 | К |  |
| Давление в точке 2 | P2 | бар |  |
| Удельный объем в точке 2 | V2 | м3/кг |  |
| Температура в точке 2 | T2 | К |  |
| Давление в точке 3 | P3 | бар |  |
| Удельный объем в точке 3 | V3 | м3/кг |  |
| Температура в точке 3 | T3 | К |  |
| Давление в точке 4 | P4 | бар |  |
| Удельный объем в точке 4 | V4 | м3/кг |  |
| Температура в точке 4 | T4 | К |  |
| Давление в точке 5 | P5 | бар |  |
| Удельный объем в точке 5 | V5 | м3/кг |  |
| Температура в точке 5 | T5 | К |  |
| Показатель политропы в процессе 1 - 2 | n1-2 | – |  |
| Показатель политропы в процессе 4 - 5 | n4-5 | – |  |
| Теплоемкость смеси в процессе 1 - 2 | с1-2 | кДж/(кг·К) |  |
| Теплоемкость смеси в процессе 4 - 5 | с4-5 | кДж/(кг·К) |  |
| **ТРЕТИЙ БЛОК** | **Условные обозначения** | **Единицы измерения** | **Расчетные значения** |
| Изменение внутренней энергии в процессе 1-2 | Δ u1-2 | кДж/кг |  |
| Изменение внутренней энергии в процессе 2-3 | Δ u2-3 | кДж/кг |  |
| Изменение внутренней энергии в процессе 3-4 | Δ u3-4 | кДж/кг |  |
| Изменение внутренней энергии в процессе 4-5 | Δ u4-5 | кДж/кг |  |
| Изменение внутренней энергии в процессе 5-1 | Δ u5-1 | кДж/кг |  |
| Изменение энтальпии в процессе 1-2 | Δ h1-2 | кДж/кг |  |
| Изменение энтальпии в процессе 2-3 | Δ h2-3 | кДж/кг |  |
| Изменение энтальпии в процессе 3-4 | Δ h3-4 | кДж/кг |  |
| Изменение энтальпии в процессе 4-5 | Δ h4-5 | кДж/кг |  |
| Изменение энтальпии в процессе 5-1 | Δ h5-1 | кДж/кг |  |
| Изменение энтропии в процессах цикла | Δ s1-2 | кДж/(кг·К) |  |
| Изменение энтропии в процессах цикла | Δ s2-3 | кДж/(кг·К) |  |
| Изменение энтропии в процессах цикла | Δ s3-4 | кДж/(кг·К) |  |
| Изменение энтропии в процессах цикла | Δ s4-5 | кДж/(кг·К) |  |
| Изменение энтропии в процессах цикла | Δ s5-1 | кДж/(кг·К) |  |
| **ЧЕТВЕРТЫЙ БЛОК** | **Условные обозначения** | **Единицы измерения** | **Расчетные значения** |
| Тепло в процессе 1-2 | q 1-2 | кДж/кг |  |
| Тепло в процессе 2-3 | q 2-3 | кДж/кг |  |
| Тепло в процессе 3-4 | q 3-4 | кДж/кг |  |
| Тепло в процессе 4-5 | q 4-5 | кДж/кг |  |
| Тепло в процессе 5-1 | q 5-1 | кДж/кг |  |
| Работа в процессе 1-2 | l 1-2 | кДж/кг |  |
| Работа в процессе 2-3 | l 2-3 | кДж/кг |  |
| Работа в процессе 3-4 | l 3-4 | кДж/кг |  |
| Работа в процессе 4-5 | l 4-5 | кДж/кг |  |
| Работа в процессе 5-1 | l 5-1 | кДж/кг |  |
| Тепло за цикл, кДж/кг | q цикла | кДж/кг |  |
| Работа за цикл, кДж/кг | l цикла | кДж/кг |  |
| Тепло, пдведенное к рабочему телу, в цикле, кДж/кг | q 1 | кДж/кг |  |
| Термический коэффициент полезного действия цикла | η t | – |  |
| Максимальная температура рабочего тела в цикле, К | T max | К |  |
| Минимальная температура рабочего тела в цикле, К | T min | К |  |

### ПРИМЕЧАНИЕ