

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Государственное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования «САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П.  
КОРОЛЕВА (национальный исследовательский университет)»**

**ТЕПЛОТЕХНИКА**

САМАРА 2012

**Теплотехника:** Метод, указания / Самар. гос. аэрокосм. ун-т; Сост. В.Н. Белозерцев, А.П. Толстоногов. Самара, 2012. 40 с.

Изложены основные вопросы для самостоятельной работы по программе курсов по термодинамике, теплопередаче, изложены методические аспекты рассмотренных тем, контрольные вопросы, материалы для курсовой работы для самостоятельного изучения, методика выполнения контрольных работ.

Методические указания рекомендуются для студентов, обучающихся по специальности 160301.65 «Авиационные двигатели и энергетические установки», а также направлений подготовки в рамках Федерального государственного образовательного стандарта третьего поколения - 160700.65 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей», 141100.62 «Энергетическое машиностроение», 151900.62 "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств", 151000.62 "Технологические машины и оборудование", 162300.62 «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей», 190700.62 «Технология транспортных процессов».

Печатается по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П.Королева

Рецензент: д.т.н. проф. В.Н. М а т в е е в

## Содержание

1. Теоретические основы теплотехники .....	5
2. Теория теплообмена .....	10
3. Источники энергии и теплоэнергетическое оборудование авиапредприятий .....	13
4. Контрольная работа для всех специализаций .....	20
Задание № 1 по курсу теплообмена .....	21
Задание № 2 Курсовая по термодинамике.....	22
Список основной литературы.....	36
Список дополнительной литературы .....	36
Список использованных источников .....	36
Приложения .....	37

\*\*\*

Специалисту, организатору воздушных перевозок авиапредприятия, часто приходится решать проблемы, связанные с требованиями и условиями хранения, перевозки и даже эксплуатации объектов авиатранспортирования.

Это могут быть крупные изделия, их блоки, тепловые двигатели, теплоэнергетические установки и системы различного назначения, комплексы пневматических и гидравлических систем различных технических устройств.

Одной из многочисленных задач служб воздушных перевозок может быть обеспечение требуемых условий наземного хранения объектов перевозок перед отправкой адресату. В этом случае специалисту потребуются знания систем теплофикации сооружений, холодильных и нагревательных установок, систем кондиционирования. Могут возникнуть, наконец, вопросы выбора топлива, применения нетрадиционных источников энергии и энергосбережения.

Цель курса "Теплотехника" - дать выпускникам знания, умения и навыки, достаточные для понимания реализуемых процессов и особенностей работы энергетических систем, устройств, агрегатов; систематизировать и довести эти знания до инженерного уровня. Курс, имея общеэнергетическую направленность, позволит будущим специалистам проводить энергосберегающую политику на предприятии.

Программа курса состоит из трех разделов, включающих в себя 12 тем. Наряду с теоретическими вопросами в ней представлен большой набор вопросов для самопроверки, а также содержатся методические указания по изучению предмета и выполнению контрольных работ, которые предъявляются на лабораторно-экзаменационной сессии в университете для защиты. Для самостоятельного выполнения контрольной работы студенту необходимо использовать рекомендуемую основную и дополнительную литературу и материалы, имеющиеся на авиапредприятии по месту работы студента.

По каждой теме всех разделов даются рекомендации для самостоятельного изучения, указан материал, которому следует уделить особое внимание, и приведены контрольные вопросы для самостоятельной проверки качества усвоения темы. Особое внимание в содержании курса уделяется раскрытию физической сущности рассматриваемых явлений, увязке их с особенностями надежности и экономичности при их использовании.

В период сессии студенты слушают обзорные лекции по основным вопросам курса, выполняют и защищают лабораторные работы, контрольную работу, предлагаемую в конце методических указаний, и затем сдают экзамены или зачет.

## 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ

Цели и задачи курса. Краткий обзор энергетических установок и энергетических систем авиапредприятия. Источники энергии.

### Тема 1. Основные понятия технической термодинамики

Техническая термодинамика и ее основные понятия: рабочее тело, термодинамическая система и процесс. Параметры состояния. Законы идеальных газов. Объединенный закон Бойля-Мариотта и Гей-Люссака. Уравнение состояния идеального газа. Теплота, работа, внутренняя энергия, теплоемкость. Первое начало термодинамики. Энтальпия.  $P$ - $V$ -диаграмма и ее свойства. Обратимые и необратимые процессы. Политропные процессы. Частные случаи политропных процессов: изохорный, изобарный, изотермический, адиабатный. Графический анализ политропных процессов. Второе начало термодинамики. Понятие о круговых термодинамических процессах - циклах. Прямые и обратные циклы. Коэффициенты преобразования энергии в циклах: термический КПД, холодильный коэффициент, отопительный коэффициент. Цикл Карно. Теорема Карно. Интеграл Клаузиуса для обратимых и необратимых процессов. Энтропия.  $T$ - $S$ -диаграмма и ее свойства. Термодинамическое тождество. Эксергия, ее виды и составляющие. Эксергия вещества в замкнутом объеме. Теорема Гюи-Стодолы. Эксергия вещества в потоке. Анергия. Эксергетический КПД технических систем. Коэффициенты преобразования и эксергетический КПД.

### Методические рекомендации

Материал этой темы содержит необходимый комплекс понятий, на базе которых излагаются последующие темы.

Необходимо четко представить, что взаимопревращения одних форм энергии (теплоты, внутренней энергии, работы) термодинамической системы (ТДС) в другие сопровождаются изменением ее параметров состояния. Непрерывное изменение параметров состояния ТДС называют термодинамическим процессом. Изучение процессов следует начать с политропного процесса как обобщающего все процессы, а затем его частных случаев. Теплота и работа служат мерой количества переданной энергии. Количественное соотношение во взаимных превращениях и преобразованиях одних форм энергии в другие устанавливает первое начало термодинамики, а условия, при которых эти преобразования возможны, - второе начало. Кроме того, второе начало устанавливает необходимые условия для реализации циклов периодически действующих тепловых машин. Рекомендуется написать уравнение первого начала термодинамики для всех частных случаев политропных процессов. При рассмотрении цикла Карно выясните, почему он является идеальным для цикла любого двигателя и холодильной машины. На примере свойств энтропии и термодинамического тождества продемонстрируйте направление прохождения термодинамических процессов.

Студент должен уяснить, что эксергия это свойство термодинамической системы или потока энергии, определяемое количеством работы, которое может быть получено внешним приемником энергии при обратимом его взаимодействии с окружающей средой до установления полного равновесия. Однако студент должен понимать, что работа - конечный и необходимый результат действия теплосиловых установок. Для современных условий цели технических систем преобразования вещества и энергии чрезвычайно разнообразны и кроме получения работы состоят в преобразовании и получении вещества, теплоты, холода, излучения нужных параметров и т.д. Поэтому термин "Эксергия" следует понимать как энергия, не характеризующаяся энтропией. Работа, представляющая собой такую энергию в переходе, используется как мера этой энергии, но не как конечная цель энергетических превращений.

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что понимается под термодинамической системой и термодинамическим процессом?
2. Как определить абсолютное давление рабочего тела, если известны показания барометра и манометра (барометра и вакуумметра)?
3. Напишите размерности термодинамических параметров и калорических величин, встречающихся в этом разделе.
4. Перечислите функции состояния, упомянутые в этом разделе. Сформулируйте их свойства.
5. Дайте определение идеального газа.
6. Какой процесс называется политропным? Перечислите основные признаки политропного процесса.
7. Перечислите частные случаи политропных процессов. Изобразите их в  $P$ - $V$ - и  $T$ - $S$ - координатах.
8. Может ли теплоемкость быть отрицательной в политропном процессе с подводом теплоты? Пояснить.
9. Каков физический смысл газовой постоянной?
10. Запишите первое начало термодинамики для изотермического процесса.
11. Какие термодинамические процессы наиболее выгодны с точки зрения получения максимальной работы процесса?
12. Перечислите характерные свойства  $P$ - $V$ - и  $T$ - $S$ - диаграммы. Приведите примеры.
13. Дайте определение круговых процессов-циклов. Опишите внешние признаки прямых и обратных циклов. Какие коэффициенты применяются для оценки их эффективности?
14. Напишите выражение термического КПД цикла Карно.
15. С помощью  $T$ - $S$ -диаграммы докажите, что цикл Карно, реализованный при одинаковых максимальной и минимальной температурах любого реального цикла, имеет большее значение термического КПД.

16. С помощью второго начала термодинамики докажите, что изотерма и адиабата могут пересечься только в одной точке.
17. Что такое эксергия, анергия? Может ли эксергия быть равной нулю?
18. Что такое эксергетический КПД?
19. Приведите примеры, каким образом можно использовать эксергетический баланс для оценки возможности осуществления того или иного термодинамического процесса.

## **Тема 2. Тепловые двигатели внутреннего сгорания и двигатели внешнего подвода теплоты**

Классификация поршневых, двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Теоретические циклы поршневых ДВС с изохорным, изобарным и смешанным подводом теплоты. Термический КПД цикла и его зависимость от параметров рабочего процесса.

Основные индикаторные и эффективные показатели поршневых ДВС. Способы повышения их мощности и экономичности.

Сравнение циклов ДВС по их эффективности при  $\varepsilon_{max}=idem$ ,  $T_{cu}=idem$ ,  $T_{cu}=idem$ . Сравнение двигателей по экономичности, нагрузкам, массам и габаритам. Назначение и основные устройства систем авиационных поршневых двигателей. Энергетический анализ эффективности двигательной силовой установки. Анализ мер энергосбережения в работе систем авиационных поршневых двигателей.

Двигатели внешнего подвода теплоты. Регенеративный цикл Стирлинга. Регенерация тепла как пример энергосбережения и условие повышения эффективности цикла. Использование нетрадиционных и вторичных источников энергии для работы цикла.

### **Методические рекомендации**

Усвоение данного материала следует начинать с анализа идеальных циклов поршневых ДВС, являющихся аналогами соответствующих реальных циклов. Необходимо изобразить указанные циклы в  $P$ - $V$ - диаграмме, выяснить назначение и особенности прохождения каждого процесса и закончить сравнением термического КПД между ними и циклом Карно при равных максимальных температурах, степенях сжатия, среднеинтегральных температурах.

Сравнивая циклы двигателей легкого (карбюраторных) и тяжелого топлива (дизелей) видно, что основное различие заключено на участках сжатия и подвода теплоты. Невысокая степень сжатия из-за детонационных свойств бензина является причиной более низкой топливной эффективности карбюраторных двигателей.

После рассмотрения основных показателей ДВС обратите внимание на величину полезно используемой энергии топлива и составляющие потерь.

На основе анализа формулы мощности ДВС укажите способы повышения мощности, обратив внимание на основной широко применяемый способ наддува, при котором в цилиндр поступает большее количество воздуха и с большим начальным давлением. Запомните размерности и порядок основных величин, характеризующих эффективность ДВС легкого и тяжелого топлива (двигателя Отто и Дизеля).

Говоря о конструктивном исполнении ДВС, следует указать на разнообразие конструктивных схем у наземных ДВС и их однотипность (со звездообразным расположением цилиндров) у авиационных ДВС.

На примере двигателя Стерлинга продемонстрировать аспекты энергосбережения при осуществлении рабочих процессов внутреннего и внешнего контуров, а также возможность использования нетрадиционных и вторичных источников энергии.

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Укажите основные конструктивные узлы ДВС.
2. С ростом какого параметра увеличивается термический КПД любого цикла?
3. Что такое степень сжатия?
4. Что такое такт, литраж поршневого двигателя, рабочий и полный объем цилиндра?
5. Почему и до каких пределов ограничена степень сжатия в двигателях Отто и Дизеля?
6. В чем различие между эффективной и индикаторной мощностью?
7. Как обеспечивается высокое качество распыления топлива в современных дизелях?
8. Укажите, какие топлива используются в карбюраторных двигателях и дизелях?
9. Какие функции выполняют системы охлаждения, смазки, топливная и пусковая?
10. Приведите численные значения эффективного КПД и удельного расхода топлива современных поршневых двигателей.

### Тема 3. Термодинамика газовых потоков и гидравлика

Понятие жидкости в широком смысле. Основные физические и механические свойства жидкости. Уравнение неразрывности для жидкости и газа, уравнение Эйлера, уравнение Бернулли. Уравнение момента количества движения. Первое начало термодинамики для газовых потоков (уравнение энергии). Давление и температура заторможенного потока. Режимы течения. Число Рейнольдса. Сопло, диффузор и их геометрическая форма. Скорость истечения и расход из сопла. Критический режим течения, критические параметры. Закон обращения воздействия.

## Методические рекомендации

Приступая к изучению этой темы необходимо рассмотреть различие и общность между капельной жидкостью и газом как несжимаемой и сжимаемой жидкостью. Различать свойства вязкой и невязкой жидкости.

При рассмотрении уравнения Эйлера и Бернулли следует обратить внимание на особенности их записи для различных типов жидкостей. Следует обратить внимание на то, что напор в этом уравнении выражается в метрах столба той жидкости, которая движется через данное сечение. Необходимо разобраться на основе анализа уравнения Бернулли, почему по мере движения в канале жидкости или газа механическая энергия ее уменьшается.

Изучая движение газа по каналам, установите, почему в зависимости от значения числа Маха на входе канал одной и той же геометрической формы может быть соплом или диффузором. Необходимо знать, какое геометрическое воздействие следует оказать на дозвуковой поток, чтобы разогнать его до звуковой или сверхзвуковой скорости. Обратите внимание, что скорость истечения из сопла не зависит от площади его выходного сечения. Рассмотрите на графике три режима истечения: докритический, критический и сверхкритический.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какое движение воды на рабочем участке считается установившимся?
2. Почему расход жидкости в трубе переменного сечения правомочно определять по любому сечению?
3. Как будут соотноситься между собой уровни жидкости в двух открытых сообщающихся внизу сосудах различного диаметра? Объясните причину.
4. Напишите уравнение неразрывности потока для газа и жидкости.
5. Почему в движущейся воде давление торможения больше статического давления в этой же точке?

## Тема 4. Реальные газы

Уравнения реального газа: уравнение Ван-дер-Ваальса, Вукалови-ча-Новикова, коэффициент сжимаемости. Изотерма реального газа. Понятие сухого, влажного насыщенного, перегретого пара. Линия насыщения. Критическая температура. Теплота парообразования (скрытая теплота конденсации). Степень сухости. Влагосодержание. *T-S*- и *H-S*- диаграммы воды и водяного пара. Влажный воздух. Насыщенный и ненасыщенный влажный воздух. Перегретый воздух. Точка росы. Абсолютная и относительная влажность. Влагосодержание воздуха, *H-d*- диаграмма влажного воздуха.

## Методические рекомендации

Изучая этот материал нужно помнить, что уравнение идеального газа непригодно в большинстве случаев для анализа рабочих тел, находящихся при условиях фазового перехода (газ-жидкость). Связь между параметрами более сложная. Кривые одноименных процессов в  $P$ - $V$ -и  $T$ - $S$ -диаграммах для идеального газа и пара различаются. Для расчетов циклов с водяным паром и воздухом его параметры берутся по  $H$ - $S$ - и  $H$ - $d$ - диаграммам.

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какую температуру называют критической?
2. Что характеризуют собой коэффициенты  $a$  и  $b$  в уравнении Ван-дер-Ваальса?
3. Что называют тройной точкой реального газа?
4. Что означают собой объемы  $v_i$  и  $b_v$  в таблицах термодинамических свойств веществ?
5. Какой пар называется насыщенным?
6. Чем отличаются понятия температура кипения и температура насыщения?
7. Что называется теплотой парообразования?
8. В чем различие внутренней и внешней теплоты парообразования?
9. Можно ли перегретый пар при температуре больше  $T_{кр}$  перевести в жидкое состояние?
10. В чем принципиальное различие в изохорном нагреве реального газа, когда его объем соотносится с критическим объемом:  $V > V_{кр}$ ;  $V < V_{кр}$ ;  $V = V_{кр}$ . Пояснить с помощью  $P$ - $T$ -диаграммы.

## 2. ТЕОРИЯ ТЕПЛООБМЕНА

### Тема 5. Основные виды теплообмена

Основные виды теплообмена. Основные понятия и определения: температурное поле, температурный градиент, тепловой поток, плотность теплового потока. Теплопроводность. Гипотеза Фурье. Дифференциальное уравнение теплопроводности. Условия однозначности. Теплопроводность плоской, цилиндрической и сферической стенки. Контактный теплообмен. Конвективный теплообмен. Закон Ньютона-Рихмана. Коэффициент теплоотдачи. Связь конвективного теплообмена с картиной гидродинамического течения теплоносителя. Основы теории подобия. Теоремы подобия. Критериальные уравнения. Лучистый теплообмен. Основные определения. Законы излучения абсолютно черного тела: Планка, Вина, Кирхгофа, Стефана-Больцмана. Теплообмен излучением тел различной формы. Теплопередача как вид теплообмена. Коэффициент теплопередачи. Теплопередача через плоскую и цилиндрическую стенки. Способы интенсификации теплопередачи.

Теплообменные аппараты, классификация, тепловой и гидравлический расчеты теплообменных аппаратов.

### Методические рекомендации

При изучении этого материала студент должен усвоить, что процесс переноса теплоты в пространстве возможен при наличии разности температур. Студент должен представлять механизм переноса теплоты в основных видах теплообмена, записать их законы, объяснить физический смысл коэффициентов пропорциональности и их размерность. Следует обратить внимание на влияние ряда факторов на коэффициенты пропорциональности. При рассмотрении процесса теплопроводности - учитывать зависимость теплопроводности от температуры и наличия посторонних примесей в теле, от наличия контактных термических сопротивлений.

При изучении темы конвективного теплообмена - учитывать влияние на коэффициент теплоотдачи теплофизических параметров теплоносителя, гидродинамической картины течения, формы, размеров тела и т.д. Студент должен различать понятия локального и осредненного по поверхности коэффициента теплоотдачи, а также уметь пользоваться критериальными соотношениями для его нахождения и, опираясь на теорию подобия, обобщать результаты эксперимента в критериальном виде.

При рассмотрении лучистого теплообмена необходимо различать тела по их реакции на падающее извне излучение, знать определение эффективного и результирующего излучения. Студент должен знать основные законы излучения для абсолютно черного тела, уметь решать задачу интенсификации лучистого теплообмена тел различной формы.

При рассмотрении процесса теплопередачи студент должен владеть понятием лимитирующего звена процесса, знать как оно влияет на уровень теплопередачи для плоской и цилиндрической стенки при решении задач интенсификации теплопередачи и тепловой защиты. Уметь выбирать материал изоляции, пользуясь понятием ее критического диаметра.

При выборе типа теплообменных аппаратов следует помнить, что противоточные теплообменники имеют меньшие массогабаритные характеристики по сравнению с прямоточными, а пластинчатые более компактны, чем трубчатые при большей теплопередающей поверхности.

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Поясните механизм переноса теплоты посредством теплопроводности, конвективного теплообмена, излучения.
2. Дайте определение и напишите размерность теплового потока, плотности теплового потока, температурного градиента.
3. Почему в выражении гипотезы Фурье стоит знак минус?
4. Сформулируйте физический смысл коэффициента теплопроводности.

5. Изобразите распределение температурного поля цилиндрической стенки при различном направлении теплового потока.
6. Каков механизм теплопереноса в зоне стыка? Дайте определение контактного термического сопротивления.
7. Как выглядит распределение температурного поля в многослойной стенке с идеальным и реальным контактом?
8. Напишите выражение закона Ньютона-Рихмана. Сформулируйте физический смысл и напишите размерность коэффициента теплоотдачи.
9. Поясните характер влияния режима течения теплоносителя на уровень теплоотдачи.
10. Что такое естественная теплоотдача? Поясните механизм образования.
11. Основные критерии подобия:  $Nu$ ,  $Re$ ,  $Pr$ ,  $Gr$ . Их физический смысл, определяющие и определяемые критерии.
12. Запишите критериальные уравнения для вынужденной и естественной конвекции. Что такое определяющая температура и характерный размер?
13. Поясните, как обобщить результаты эксперимента в критериальной форме. Приведите пример.
14. Что такое абсолютно черное тело? Приведите примеры реальных тел, близких по свойству с абсолютно черным телом.
15. Что такое плотность потока монохроматического излучения, поверхностная плотность излучения, поглощательная, отражательная, пропускательная способность?
16. Что такое степень черноты?
17. Напишите закон Стефана-Больцмана.
18. Как можно сократить нагрев изделия в печи излучения?
19. Что такое теплопередача? Напишите формулу расчета теплового потока при теплопередаче.
20. Что такое коэффициент теплопередачи, размерность? Понятие о лимитирующем звене процесса.
21. Сформулируйте основные правила целесообразности обребрения стенки.
22. Что называется критическим диаметром тепловой изоляции цилиндрической стенки? Приведите пример выбора материала тепловой изоляции цилиндрической стенки по величине критического диаметра.
23. Нарисуйте эпюру распределения температурного поля в противоточном и прямоточном теплообменнике.
24. Что такое среднерасходная теплоемкость?
25. Какой параметр определяет картину теплопередачи и величину гидропотерь?
26. Что такое регенеративный теплообменник? Приведите примеры использования регенераторов в технике.

### **3. ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ АВИАПРЕДПРИЯТИЙ**

#### **Тема 6. Виды и формы произведенной и потребляемой энергии в технике и на предприятиях воздушных перевозок**

Анализ использования топливных ресурсов и нетрадиционных источников энергии в технике и технологии воздушных перевозок: невозобновляемые и возобновляемые источники энергии. Перспективы энергопотребления. Теплоты сгорания топлив. Стехиометрическое соотношение окислителя и горючего; коэффициент избытка воздуха. Физико-химические и эксплуатационные свойства твердых, жидких и газообразных топлив. Горение и способы сжигания. Продукты сгорания топлив. Теплота и холод природных источников как полезная энергия.

#### **Методические рекомендации**

При изучении этой темы рассматриваются основные ресурсы энергии и проблемы их использования. Анализируется использование невозобновляемых источников энергии, в основном органического происхождения, жидкого и газообразного в гражданской авиации, а также твердого топлива в технологических нуждах комплекса предприятий, обеспечивающих воздушные перевозки. Основной энергетической характеристикой топлив служит их теплота сгорания. В реальных условиях эксплуатации большинства тепловых машин продукты сгорания выбрасываются в окружающую среду при температуре 120-400°C, более высокой, чем температура конденсации паров воды. Поэтому при расчете рабочего процесса таких машин следует брать низшую теплоту сгорания.

При рассмотрении характеристик топлива следует обратить внимание на роль каждого элемента, входящего в топливо, распределение различных видов топлив по их энергетической ценности.

#### **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ**

1. Что понимается под теплотой сгорания топлив?
2. Что такое стехиометрическое соотношение компонентов?
3. Как связан коэффициент избытка воздуха с качеством смесеобразования?
4. От каких факторов зависит скорость и полнота сгорания углеводородного топлива?
5. Понятие об условном топливе.
6. Перечислите эксплуатационные свойства жидкого топлива.

## Тема 7. Газотурбинные двигатели и силовые установки

Классификация газотурбинных установок и двигателей ГА. Схема устройства, принцип работы: цикл ГТУ с подводом теплоты при  $p=const$ , цикл ГТУ с подводом теплоты при  $v=const$ , цикл ПВРД, цикл ПуВРД, циклы ГТД: ТВД, ТРД, ТРДД.

Термический КПД. Параметры и показатели эффективности действительного цикла ГТД. Влияние параметров цикла на эффективную работу и эффективный КПД.

Основные показатели авиационных ГТД: тяга и удельная тяга, мощность и удельная мощность, КПД и удельный расход топлива. Эффективный и полный КПД. Цикл ГТД с регенерацией тепла как мера энергосбережения и повышения эффективности цикла.

Внутренние и внешние показатели эффективности. Основные характеристики работы двигателей: детонационные, скоростные, нагрузочные, регулировочные, винтовые. Эксплуатационные характеристики.

### Методические рекомендации

Приступая к изучению материала, рассмотрите вначале назначение основных узлов каждого типа ГТУ и двигателей. Изучение двигательных установок следует начать с наиболее простого ПВРД и ПуВРД. В чистом виде они в гражданской авиации (ГА) не применяются, но анализ их работы позволяет обосновать необходимость турбокомпрессорного узла как для обеспечения стартовой тяги, так и для повышения работы и эффективности цикла авиационного двигателя.

Необходимо усвоить основные внутренние показатели: коэффициент наполнения, степень сжатия, степень повышения давления, степень подогрева, степень предварительного расширения, степень повышения давления в компрессоре, степень расширения в сопле. Внешние показатели эффективности: экономичность, удельный расход топлива, коэффициенты полезного действия: (термический, относительный, внутренний, абсолютный, внутренний, механический, эффективный), индикаторная мощность, эффективная мощность. Сила тяги, удельный импульс.

При анализе идеального и реального циклов обратите внимание на зависимости КПД и работы цикла от степени повышения давления и степени повышения температуры (степени подогрева газа), на характер изменения работы и КПД реального цикла, а также на наличие двух оптимальных степеней повышения давления в реальном цикле.

Заканчивая рассмотрение циклов, необходимо установить, что степень повышения давления и максимальная температура в цикле выбираются не произвольно: каждому значению максимальной температуры, зависящему от механических свойств применяемых материалов и ресурса двигателя, соответствует свое оптимальное значение степени повышения давления.

Необходимо четко представлять, на что расходуется эффективная работа цикла у различных типов ГТД, в чем заключается различие между двигателем и движителем, эффективным, тяговым и полным КПД, в чем смысл применения удельных параметров и чем вызвано применение различных типов ГТД в ГА.

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Изобразите цикл Брайтона в  $P$ - $V$ -диаграмме. Укажите все его процессы и узлы, в которых они протекают.
2. Что такое степень подогрева газа?
3. Чем обусловлено различие между идеальным и реальным циклом ГТД?
4. У какого из двигателей (ГТД или дизеля) будет выше термический КПД при одинаковых максимальных температурах и давлениях цикла? Какое влияние оказывают на него существующие ограничения по температуре в цикле ГТД?
5. Что характеризует эффективный, тяговый и полный КПД ГТД?
6. Напишите уравнения для определения тяги и удельной тяги. Укажите размерности всех величин.
7. Что такое удельная тяга (мощность), удельный расход топлива и удельный вес ГТД? Укажите размерности и численные значения этих величин для современных ГТД.
8. Нарисуйте схемы ТРД, ТВД и ТРДД и объясните принцип работы двигателей.
9. Какие характеристики ГТД называются внутренними? Какие внешними?
10. Как влияет состав смеси на регулировочную характеристику ГТД?
11. Дайте определение скоростной характеристики ГТД.
12. Дайте определение дроссельной характеристики. Опишите методику снятия характеристики.
13. Как влияют на эффективность работы ГТД основные внутренние параметры:  $\varepsilon, \rho, \lambda, \pi_K$ ?

### Тема 8. Термодинамические основы работы компрессоров и детандеров

Основные принципы компримирования газов. Компрессоры: объемные, лопаточные, струйные. Работа одноступенчатого компрессора. Многоступенчатое сжатие. Распределение давления между ступенями. Типы компрессоров ГТД. Детандерные устройства, классификация, назначение. Турбодетандеры.  $h$ - $S$ -диаграмма и ее свойства.

### Методические рекомендации

Рассматривая процессы, необходимо четко представлять энергетические преобразования, происходящие в компрессоре и детандере. Нужно помнить, что при конструктивном разнообразии компрессоров термодинамические основы их работы одинаковы и выражение для работы подводимой извне будет иметь одинаковый для всех вид. Необходимо четко понять и обосновать необходимость в многоступенчатом сжатии и многоступенчатом расширении.

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какой процесс сжатия является наиболее эффективным?
2. Почему выражение для работы, подводимой к компрессору, имеет одинаковый вид для объемных и лопаточных компрессоров?
3. Поясните с помощью  $P$ - $V$ - или  $T$ - $S$ - диаграмм преимущество многоступенчатого сжатия в компрессоре.
4. Почему лопатки компрессоров ступеней высокого давления имеют меньшие размеры по сравнению с лопатками ступеней низкого давления?
5. Поясните принцип действия турбодетандера. Почему снижается температура газа на выходе из турбины?
6. Изобразите процесс расширения на турбине в  $P$ - $V$ - и  $h$ - $S$ -координатах.
7. Чем отличается работа идеального процесса расширения от работы расширения реального процесса?

### Тема 9. Конструкция и работа камеры сгорания (КС) авиационных двигателей

Назначение и особенности конструкции камеры сгорания. Организация рабочего процесса в КС. Основные параметрические показатели КС.

### Методические рекомендации

Изучая эту тему, студент должен иметь представление об особенностях трубчатых, секционных, кольцевых, угловых КС и почему в них требуются высокие значения коэффициентов избытков воздуха. Он должен понимать, чем принципиально отличаются КС печей и котлов от камер сгорания ГТД, ГТУ. Студент должен объяснять, с какой целью воздух, поступающий в КС, делится на три потока и какими средствами достигается полнота сгорания топлива, уменьшение выбросов вредных компонентов?

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие требования предъявляются к КС ГТД?
2. С какой целью КС разделена на зоны горения и смешения?
3. Чем объяснить повышенные по сравнению со стехиометрическим соотношением значения коэффициента избытка воздуха?
4. Перечислите основные параметрические требования к КС.
5. Что называется коэффициентом полноты сгорания топлива?
6. Перечислите температурные диапазоны образования вредных выбросов в  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{NO}_x$ .

### **Тема 10. Установки теплоснабжения авиапредприятий. Принципы и схемы систем теплоснабжения**

Теплогенераторы систем теплоснабжения: химические, электрические, солнечные, гидравлические, тепловые насосы. Тепловой и энергетический баланс теплогенераторов.

Теплотрассы, устройство и эксплуатация тепловых сетей. Основы расчета теплотрасс. Горячее водоснабжение, классификация, теплоносители, оборудование. Назначение и основы расчета отопительно-вентиляционных установок. Системы отопления: классификация, основные устройства. Классификация и устройство вентиляционных систем. Системы кондиционирования: классификация, принципиальные схемы, анализ процессов.

### **Методические рекомендации**

Рекомендуется изобразить схему пункта теплоснабжения, последовательно разобрать, какие основные устройства и системы входят в него, их назначение, взаимодействие между собой, путь движения топлива, теплоносителя и продуктов сгорания (если таковые имеются). Следует усвоить, как определяется КПД всего комплекса теплоснабжения, какое влияние на него оказывают расход теплоносителя и условия эксплуатации. Следует знать, в чем заключается преимущество и недостатки различного типа теплоносителей.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Изобразите принципиальную схему системы теплоснабжения (контурную).
2. Перечислите основные элементы системы теплоснабжения.
3. Поясните их назначение.
4. Что такое КПД установки теплоснабжения?

5. Чем вызваны высокие требования к качеству теплоносителей отопительных систем? Почему очень важно возвращать конденсат от потребителей?
6. Как определяют производительность вентиляторов отопительно-вентиляционных систем?
7. Какие процессы с воздухом осуществляются в кондиционерах. Принцип кондиционирования.
8. Поясните принцип кондиционирования на примере теплового насоса.
9. Опишите принцип работы вихревого гидравлического теплогенератора. Приведите выражение коэффициента эффективности.

## **Тема 11. Холодильные установки**

### **Классификация холодильных установок**

Схема, устройство и принцип работы: дроссельных, вихревых, воздушных турбодетандерных, термоэлектрических, парокомпрессионных газовых холодильных машин (цикл Стирлинга, Джиффорда-Мак-Магона).

### **Методические рекомендации**

При изучении этой темы необходимо помнить 2-е начало термодинамики, свойства реальных газов, знать определение холодопроизводительности и холодильного коэффициента, понимать физическую картину процессов, происходящих в рабочих узлах холодильных установок. Студент должен знать интервалы оптимальных достижимых уровней температур термостатирования и холодопроизводительностей для различного типа установок.

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ**

1. Какие параметры характеризуют эффективность холодильной установки?
2. Рабочие тела, используемые в холодильных установках, их характеристики.
3. Какими специфическими свойствами хладагента обладают рабочие тела парокомпрессионных и абсорбционных холодильных машин?
4. Напишите уравнение теплового баланса для рассмотренных холодильных установок.

## **Тема 12. Методы учета и контроля расхода энергии применительно к технике и технологиям предприятий ГА**

Технико-экономические показатели силовых установок авиационных транспортных средств и технологических установок при выборе и

комплектации высокоэффективным энергопотребляющим оборудованием предприятий ГА. Тенденции энергосбережения в процессе разработки и эксплуатации перспективных двигателей. Методы и средства контроля функционирования систем двигателей: определение эффективности воздушных перевозок методом эквивалентных масс. Технично-экономические критерии эффективности источников и преобразователей энергии и энергоносителей, а также средств их транспортировки в наземном оборудовании и технологических системах. Приборы контроля учета и регулирования: счетчики воды и газов, расходомеры, теплосчетчики.

Энергосберегающее оборудование в централизованных и децентрализованных источниках энергии: ГТУ, теплонасосные установки (ТНУ), дизель-генераторные установки, возобновляемые источники энергии, экологические вопросы энергетики. Энергосберегающие эксплуатационные технологии в теплосетях; современные методы диагностики функционирования теплотрасс, бесканальная прокладка трубопроводов, перспективные теплоизоляционные материалы.

Методы проведения энергетических обследований и аудитов технических средств и энергетических комплексов предприятий ГА. Энергосберегающие технологии и экологическая обстановка.

### **Методические рекомендации**

Изучая эту тему, студент должен осознавать основную цель учета и контроля энергии и энергоносителей энергосбережения как комплекса мероприятий, направленных на повышение эффективности как отдельных элементов, так и всего предприятия ГА.

Энергопотребление предприятий, обеспечивающих организацию воздушных перевозок, складывается из суммарного потребления энергии и энергоносителей авиационными транспортными средствами и наземным технологическим оборудованием. Студент должен понимать, что энергосбережение должно осуществляться по всей технологической цепочке: от топливно-энергетических запасов до источников энергии транспортных средств и наземного оборудования к средствам транспортировки энергии и энергоносителей и далее к средствам преобразования энергии и потребления. Студент должен знать, как должны размещаться средства учета и контроля энергии и энергоносителей, а также иметь представление об основных тенденциях энергосбережения, методах оценки энергосберегающих мероприятий.

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ**

1. Какие основные технико-экономические показатели характеризуют энергосберегающее оборудование транспортных средств ГА?
2. Перечислите основные направления совершенствования современных ГГД.

3. Приведите примеры систем и устройств передачи и транспортировки энергии.
4. Объясните принцип работы теплосчетчика.
5. В чем преимущество децентрализованных теплосетей по сравнению с централизованными?
6. Приведите примеры использования возобновляемых источников энергии как перспективного направления энергосберегающих технологий.
7. Каким образом энергосбережение влияет на экологическую обстановку? Приведите примеры.
8. Каким образом оценивается технико-экономическая эффективность от внедрения энергосбережения?

#### **4. КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА ДЛЯ ВСЕХ СПЕЦИАЛИЗАЦИЙ** **Методические указания к выполнению контрольной работы**

К решению заданий контрольной работы следует приступать при наличии литературных источников, указанных в каждом задании. Это позволит лучше разобраться в задании и сократит затраты времени за счет правильного выполнения работы с первого предъявления.

Контрольная работа включает в себя два задания. Вариант задания выбирается из таблиц в соответствии с порядковым номером в списке группы, рабочее тело выбирается по порядковому номеру группы. Работы, выполненные не по своему варианту или не из своего задания, не рассматриваются. Если при проверке работа была не зачтена, то исправленной работе следует обязательно приложить незачтенную.

Контрольная работа выполняется в тетради школьного образца с пронумерованными страницами и полями 25-30 мм для замечаний преподавателя.

При выполнении задач необходимо соблюдать следующие условия:

а) выписывать условия задачи и соответствующие варианту исходные данные;

б) решение сопровождать кратким пояснительным текстом, в котором указывается, какая величина определяется и по какой формуле (в случае преобразований указать, из какой исходной формулы она получена);

в) приводить численные значения всех величин, подставляемых в формулу. Указать размерность конечного результата, например:

$$P = \frac{RT}{V} = \frac{300 \cdot 300}{0.9} = 10 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

г) вычисления проводить только в Международной системе единиц (СИ). Соблюдение этого обязательного условия применительно к каждой используемой в задаче величине позволит значительно сократить количество ошибок. В прил. 1 приведены единицы измерения в системе СИ основных величин, встречающихся при выполнении контрольной работы, и таблица приставок к ним;

д) все справочные величины, необходимые для расчетов, приведены в конце методических указаний в прил. 2.

### ЗАДАНИЕ №1 ПО КУРСУ ТЕПЛООБМЕНА

Рассчитать температурное поле (исходные данные в табл. 1) в 3-слойной стенке и определить тепловой поток (стационарная задача, граничные условия 3-го рода). Расчеты оформить в пояснительной записке.

В записку отдельным пунктом включить:

1. Уравнение температурного поля для каждого слоя (в общем виде и численном).
2. График температурного поля по толщине, составной стенки (на миллиметровой бумаге).

Масштабы: а) толщина 1: 1; б) температура 1 мм — 2°C.

Условные обозначения:

$t_{f1}, t_{f2},$  °C- температуры горячей и холодной среды;

$\alpha_1, \alpha_2,$  Вт/(м<sup>2</sup>\*К) - коэффициенты теплоотдачи на горячей и холодной стороне;

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3,$  Вт/(м\*К) - коэффициенты теплопроводности материала слоев;

$t_{w1}, t_{w2}, t_{w3}, t_{wb},$  °C- температуры поверхностей слоев.

Для криволинейных стенок  $t_{w1}, \lambda_1, R_1$  относятся к внутренней поверхности. По толщине каждого слоя рассчитать две промежуточные точки.

#### Указание к заданию 1

При решении задачи сначала рассчитывается коэффициент теплопередачи многослойной стенки, затем величина теплового потока. По найденной величине теплового потока определите распределение температурного поля в каждом слое.

Таблица 1

Исходные данные к заданию № 1 по курсу теплообмена

№	Форма стенки	Толщина слоев, мм			Вт/(м*К)			°С		Вт/(м*К)		R, мм
		$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$t_{wI}$	$t_{wII}$	$\alpha_I$	$\alpha_{II}$	
1	пло- ская	100	80	30	0,5	2	1	600	100	100	20	-
2		10	100	30	2	4	0,5	750	250	100	100	-
3		30	50	50	2	5	1	500	100	50	50	-
4		115	45	40	1	10	2	600	100	20	200	-
5		25	120	75	0,5	10	2	100	500	1000	20	-
6		100	50	50	5	9	1	700	200	20	20	-
7		50	100	50	1	5	0,2	800	300	500	50	-
8		60	50	100	0,5	0,2	ОД	900	400	100	150	-
9		50	50	100	10	1	20	950	450	20	100	-
10		100	50	30	2	0,5	0,1	850	350	50	20	-
11	цилинд- риче- ская	135	25	50	15	1	0,5	500	0	200	80	25
12		125	50	50	20	5	1	100	600	100	500	80
13		50	50	50	10	15	10	700	200	1000	100	60
14		50	50	30	1	2	3	300	800	100	100	100
15		50	50	50	1	3	2	900	400	200	200	125
16		120	70	30	4	0,8	0,1	500	1000	1000	50	130
17		115	65	35	3	10	0,7	600	100	700	100	100
18		125	80	40	5	2	0,15	50	530	150	50	120
19		50	40	30	2	5	1	650	150	100	20	110
20		120	80	50	3	1	3	250	750	500	10	130
21	сфери- ческая	120	130	50	5	10	1	850	330	100	50	200
22		50	50	50	2	5	1	450	950	50	300	150
23		120	80	70	5	4	0,5	150	550	200	20	130
24		130	70	60	20	3	0,2	125	625	250	30	150
25		120	75	75	15	5	0,5	725	225	100	30	170
26		50	30	20	0,2	3	0,5	325	825	20	150	160
27		60	60	70	1	5	2	925	425	30	30	190
28		100	80	20	2	3	4	525	1025	30	150	200
29		130	100	70	5	0,2	0,1	600	100	20	20	210
30		120	80	20	0,2	1 0,5	0,25	200	700	50	500	220

## ЗАДАНИЕ №2 КУРСОВАЯ РАБОТА ПО ТЕРМОДИНАМИКЕ

Рассчитать идеальный цикл ГТД тягой  $R_{при}$  при полете с числом  $M$  за время  $t$  (час) по заданной высоте  $H$  при температуре  $T_3$  газа перед турбиной. Исходные данные приведены в табл. 4, 5, 6. Общими для всех вариантов заданий являются:

- масса воздуха  $G = 1$  кг;
- расчетная схема ГТД (рис. 1 и 2);
- топливо — керосин различных марок (выбирается по номеру и группы) с начальной температурой  $T_T = 300$  К (см. табл. 6).

Цель контрольной работы: научить студента методике расчета и основам исследования цикла теплового двигателя. В ходе выполнения работы проводится определение параметров состояния рабочего тела в термодинамических процессах идеального цикла газотурбинного двигателя (ГТД), его энергетических показателей, графическое построение цикла. Результаты расчетов характеристик цикла идеального цикла ГТД, представленные в графической форме, позволяют произвести их сравнительный анализ.

### 1. Исходные данные к расчету

В прил. 1 приведены варианты заданий (исходных данных) для расчета идеального цикла ГТД с тягой  $R$  при полете с числом  $M$  за время  $t$  (час) на заданной высоте  $H$  при температуре  $T_3$  газа перед турбиной.

В прил. 2 дана стандартная международная атмосфера (МСА), по которой определяются исходные  $p_0$ ,  $\rho$ ,  $T_0$  и состав воздуха (табл. III, П2).

Общими для всех вариантов заданий являются:

- масса воздуха  $G = 1$  кг;
- расчетная схема ГТД (рис. 1, 3);
- топливо - керосин различных марок (назначается консультантом) с начальной температурой  $T_T = 300$  К (см. прил. 2, табл. П3).

### 2. Постановка задачи

В ходе расчета идеального цикла ГТД следует определить для поступающего в диффузор двигателя воздуха и продуктов сгорания:

- мольные доли, массовые доли, изохорные теплоемкости, газовые постоянные, показатели адиабаты;
- оптимальное значение степени повышения давления воздуха в компрессоре двигателя;
- потребный коэффициент избытка в камере сгорания;
- параметры рабочего тела в узловых точках цикла 1,2,3,4,5;
- изменение внутренней энергии, энтальпии, энтропии в процессах за цикл;
- теплоту процессов и преобразованное тепло, работу и термический КПД цикла;
- основные параметры рабочего тела в двух промежуточных точках процессов 1-2 и 3-5;
- по результатам расчетов построить в  $P$ - $V$ - и  $T$ - $S$ -координатах идеальный цикл ГТД;
- энергетические характеристики двигателя.

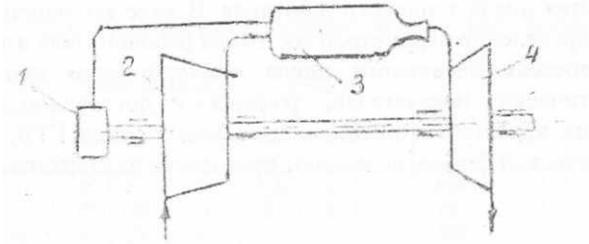


Рис. 1. Принципиальная схема ГТД с подводом тепла при  $p = const$ :  
1-топливный насос; 2-компрессор; 3-камера сгорания; 4-газовая турбина

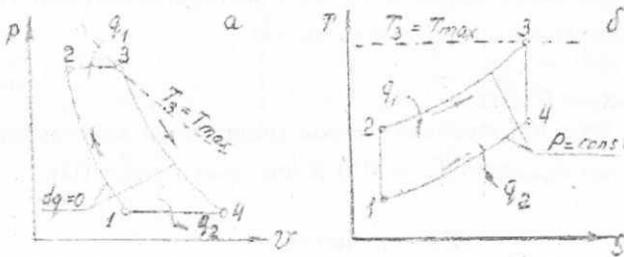


Рис. 2. Идеальный цикл ГТД при  $p = const$ .  
а-в координатах  $P-V$ ; б-в координатах  $T-S$

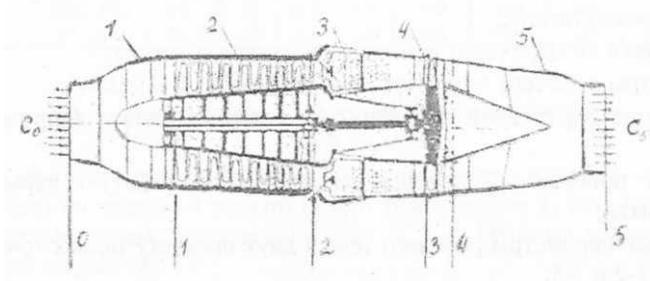


Рис. 3. Конструктивная схема ВРД с турбокомпрессором:  
1 - диффузор; 2 - центробежный компрессор; 3 - камера сгорания;  
4 - газовая турбина; 5 — сопло

### 3. Методические указания по выполнению расчетов

#### 3.1. Расчет состава рабочего тела

Расчет массовых и мольных (объемных) долей компонентов для воздуха и продуктов сгорания, молекулярной массы, их теплоемкости (см. [3], с. 336) проводится по соотношениям ([1], см. с.18, 33 и 38, [2,3]) для каждого компонента:

$$c_{p_i} - c_{v_i} = R_i; \quad R_i = 8314,3 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}; \quad R_i = \frac{R_{\mu}}{\mu}; \quad g_i = \frac{G_i}{G};$$
$$M_i = \frac{G_i}{\mu_i}; \quad r_i = \frac{M_i}{\sum M_i},$$

для газовой смеси:

$$c_p = \sum g_i \cdot c_{p_i}; \quad c_v = \sum g_i \cdot c_{v_i}; \quad G = \sum G_i; \quad k = \frac{c_p}{c_v}; \quad \rho = \frac{P}{RT};$$
$$v = \frac{1}{\rho}.$$

По таблице МСА (см. прил. 2) для заданной высоты полета принимаются  $P_0; \rho; T_0$  для воздуха и его состав. Результаты расчетов по п. 3.1 сводятся в табл. 2 и 3.

Расчетные соотношения для продуктов сгорания (реальные циклы) приведены в п. 3.4 и тоже сводятся в табл. 2 и 3.

#### 3.2. Расчет оптимального значения степени повышения давления в компрессоре ГТД

##### 3.3.

Для заданного числа  $M$  полета оптимальное значение можно получить аналитически из условия, что при его значении полезная работа цикла ГТД - наибольшая. Обычно решение сводится к отысканию максимума

функции  $L = f(\pi_k)_{opt}$ .

Этот максимум в идеальном цикле достигается при значении

$$\text{равном } (\pi_k)_{opt} = \left[ \frac{T_3}{T_0 \left( 1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right)^2} \right]^{\frac{k}{2(k-1)}}$$

Полученное значение используется в дальнейших расчетах параметров цикла.

### 3.3. Определение коэффициента избытка воздуха

Основано на обеспечении заданной температуры перед турбиной. Для расчета примем соотношение  $y'$  для заданного вида топлива (см. прил. 2, табл. ПЗ)  $C_n H_m$ :

$$j = \frac{n}{m} \quad \text{и} \quad f = (1 + 4 \cdot j).$$

Определяется коэффициент избытка воздуха по формуле [7]

$$\alpha = \frac{G_{O_2} \cdot H_u - F(T_3 - T_T)}{c_p G \left[ T_3 - T_1 \left( \pi_k \right)_{opt}^{\frac{k-1}{k}} \right]}$$

Здесь  $F$ ,  $T_x$  промежуточные расчетные зависимости:

$$F = G_{O_2} \left( \frac{11j \cdot c_{pCO_2}}{2f} + \frac{9c_{pH_2O}}{8f} - c_{pO_2} \right);$$

$$T_1 = T_0 \left( 1 + \frac{k-1}{2} \cdot M^2 \right).$$

### 3.4. Расчет состава продуктов сгорания и рабочей смеси

Проводится по указанию консультанта. Здесь определяются:

- массы компонентов:

$$m''_{N_2} = m'_{N_2}; \quad m''_{O_2} = (\alpha - 1) \cdot m'_{O_2} / \alpha;$$

$$m''_{CO_2} = m'_{CO_2} + m'_{O_2} \cdot 11h / 2\alpha f; \quad m''_{H_2O} = m'_{H_2O} + m'_{O_2} \cdot 9j / 8\alpha f;$$

- моли компонентов:

$$M''_{N_2} = M'_{N_2}; \quad M''_{O_2} = (\alpha - 1) \cdot M'_{O_2} / \alpha;$$

$$M''_{H_2O} = M'_{H_2O} + 2M'_{O_2} / 8\alpha f; \quad M''_{CO_2} = M'_{CO_2} + 4h \cdot M'_{O_2} / \alpha f;$$

- мольные (объемные) доли компонентов:

$$r_i'' = \frac{M_i''}{M''}; \quad M'' = \sum M_i'';$$

- массовые доли компонентов:

$$g_i'' = \frac{m_i''}{m''}; \quad m'' = \sum m_i''; \gg$$

количество топлива, сгорающего в 1 кг воздуха, находится по формуле

$$m_T = m'_{O_2} (12h + 1) / \alpha 8 f ;$$

массасса рабочей смеси (воздух и топливо)  $m_{PC} = m' + m_T ;$

- массовые доли рабочей смеси:  $g_{PC} = \frac{m'_j}{m_{PC}} ; m_{PC} = \sum m'_i ;$
- теплоемкость рабочей смеси:  $c_p'' = \sum g_i'' \cdot c_{p_i}' ; c_v'' = \sum g_i'' \cdot c_{v_i}' ;$
- газовая постоянная:  $R'' = c_p'' - c_v'' ; k'' = \frac{c_p''}{c_v''} .$

### Указание к заданию

При термодинамическом исследовании циклов полагают:

- что циклы замкнуты (в действительности же продукты сгорания удаляются в атмосферу, а на их место поступает новое рабочее тело);
- рабочее тело в цикле - идеальный газ с постоянной теплоемкостью;
- процесс сгорания, связанный с химическими изменениями состава рабочего тела, - обратимый процесс подвода тепла  $q_1$  извне;
- процесс уноса теплоты, содержащейся в продуктах сгорания, обратимый процесс отвода теплоты  $q_2$  от рабочего тела;
- механические потери на трение и потери теплоты в окружающую среду отсутствуют.

При таких предпосылках считают, что тепловые двигатели работают по обратимым термодинамическим циклам с постоянным составом и характеристиками рабочего тела. Поэтому в дальнейшем, приступая к расчетам по пп. 4 и 5 во всех соотношениях, описывающих процессы цикла, принимаются характеристики для воздуха  $k' ; R' ; c_p' ; c_v' .$  Состав продуктов сгорания учитывается при расчетах реальных (действительных) циклов тепловых машин.

Таблица 2

Состав рабочего тела цикла ГТД

Характеристики		Компоненты			
		$N_2$	$O_2$	$CO_2$	$H_2O$
$R_i, \frac{Дж}{кг \cdot К}$					
$c_{pi}, \frac{Дж}{кг \cdot К}$					
$c_{vi}, \frac{Дж}{кг \cdot К}$					
$\mu_i, \frac{кг}{кмоль}$					
$m_i, кг$	Воздух				
	Прод. сг				
$M_i, кмоль$	Воздух				
	Прод. сг				
$g_i$	Воздух				
	Прод. сг				
$r_i$	Воздух				
	Прод. сг				

Таблица 3

Характеристики рабочего тела в цикле ГТД

Рабочее тело	Характеристики				
	$c_p, \frac{Дж}{кг \cdot К}$	$c_v, \frac{Дж}{кг \cdot К}$	$R_i, \frac{Дж}{кг \cdot К}$	$k = \frac{c^p}{c^v}$	$m, кг$
Воздух					
Продукты сгорания					

#### 4. Расчет основных параметров состояния рабочего тела в узловых точках цикла ГТД

Расчет параметров состояния проводится с учетом схем, представленных на рис. 3, 4, 5.

**Точка 1.** Процесс 0-1 - адиабатное сжатие воздуха в диффузоре:

$$T_1 = T_0 \cdot \left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot M^2\right); p_1 = p_0 \cdot \left(\frac{T_1}{T_0}\right)^{\frac{k}{k-1}}; v_1 = v_0 \cdot \left(\frac{p_0}{p_1}\right)^{\frac{1}{k}}$$

**Точка 2.** Процесс 1-2 - адиабатное сжатие в компрессоре:

$$T_2 = T_1 \cdot (\pi_k)_{opt}^{\frac{k-1}{k}}; p_2 = p_1 \cdot (\pi_k)_{opt}; v_2 = \frac{RT_2}{p_2}$$

**Точка 3.** Процесс 2-3 - изобарный подвод тепла в камере сгорания,

$T_3$  - задано;  $\rho = \frac{T_3}{T_2}$  - степень повышения температуры:

$$p_3 = p_2; v_3 = \frac{RT_3}{p_3}$$

**Точка 4.** Процесс 3-4 - адиабатное расширение продуктов сгорания в турбине:

$$T_4 = T_3 - T_2 + T_1; p_4 = p_3 \cdot \left(\frac{T_4}{T_3}\right)^{\frac{k}{k-1}}; v_4 = \frac{RT_4}{p_4}$$

**Точка 5.** Процесс 4-5 - адиабатное расширение в реактивном сопле двигателя до давления окружающей среды  $p_0 = p_5$

$$T_5 = T_3 \cdot \left(\frac{p_3}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}; v_5 = \frac{RT_5}{p_0}$$

#### 5. Расчет calorических величин цикла ГТД

5.1. Изменение calorических величин в процессах цикла определяется по соотношениям:

- внутренняя энергия в процессе

$$\Delta u_i = c_v (T_{i+1} - T_i);$$

- энтальпия

$$\Delta h_i = c_p (T_{i+1} - T_i);$$

- энтропия

$$\Delta S_i = c_p \ln \frac{T_{i+1}}{T_i} - R \cdot \ln \frac{p_{i+1}}{p_i}$$

5.2. Расчет теплоты процессов и тепла за цикл делается по формулам:

$$q_{0-1} = q_{1-2} = 0; \quad q_{2-3} = q_1 = c_p (T_3 - T_2); \quad q_{3-4} = q_{4-5} = 0;$$

$$q_{5-0} = q_2 = c_p (T_5 - T_0).$$

Преобразованное тепло  $q_{ц} = q_1 - |q_2|$ .

5.3. Расчет работы процессов и за цикл проводится по равенствам:

$$-l_{0-1} = \Delta h_{0-1} - \text{работа сжатия газа в диффузоре};$$

$$-l_{1-2} = \Delta h_{1-2} - \text{работа сжатия газа в компрессоре};$$

$$l_{3-4} = \Delta h_{3-4} - \text{работа газа в турбине};$$

$$l_{4-5} = \Delta h_{4-5} - \text{работа реактивного сопла};$$

$$l_{ц} = \sum l_i - \text{работа цикла}.$$

Таблица 4

Значения основных параметров состояния рабочего тела в узловых точках цикла, изменение калорических параметров в процессах и за весь цикл идеального ГТД

Значения	Точки						Для цикла
	0	1	2	3	4	5	
$p_i, \text{Па}$							-
$v_i, \text{м}^3/\text{кг}$							-
$T_i, \text{К}$							-
Значения	Процесс						Для цикла
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-0	
$\Delta l, \text{Дж/кг}$							
$\Delta h, \text{Дж/кг}$							
$\Delta s, \text{Дж/кг}$							

Окончание табл. 4

$q_{\text{в}}, \text{Дж/кг}$							
$L_{\text{в}}, \text{Дж/кг}$							

Таблица 5

*Параметры состояния рабочего тела в промежуточных точках процессов и изменение энтропии*

Значения	Точки			
	a	b	c	d
$p, \text{Па}$				
$v, \text{м}^3/\text{кг}$				
$T, \text{К}$				
Значения	Процесс			
	2-a <sup>1</sup>	2-b <sup>1</sup>	2-c <sup>1</sup>	2-d <sup>1</sup>
$\Delta s$				

Таблица 6

*Энергетические характеристики идеального ГТД*

$\pi_k$	$v_3 = \frac{RT_3}{P_3}$	$l_{\text{ц}}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	$R_{\text{уд}}, \frac{\text{м}}{\text{с}}$	$G_{\text{возд}}, \frac{\text{кг}}{\text{с}}$	$G_{\text{движ}}, \text{кг}$	$G_T^{\text{сум}}, \text{кг}$	$\eta, \%$

## 6. Расчет параметров состояния рабочего тела в промежуточных точках процессов сжатия и расширения

### 6.1. Расчет для процессов, изображаемых в $p$ - $v$ -координатах

Определение значений параметров  $p$ - $v$  промежуточных точках процессов 1-2, 3-4 и 4-5 позволит построить достаточно точные графики. Рассмотрим цикл в  $p$ - $v$ - координатах на рис. 4. Поскольку процессы 1-2 и 3-4-5 адиабатные, то для любой пары точек на них справедливы соотношения:

$$\frac{P_a}{P_1} = \left(\frac{v_1}{v_a}\right)^k; \quad \frac{P_b}{P_1} = \left(\frac{v_1}{v_b}\right)^k; \quad \frac{P_c}{P_4} = \left(\frac{v_4}{v_c}\right)^k; \quad \frac{P_d}{P_5} = \left(\frac{v_5}{v_d}\right)^k.$$

Задавая значения параметров  $P_a, P_b, P_c, P_d$  либо значениями  $v_a, v_b, v_c, v_d$  и используя известные величины  $P_1, P_4, P_5$  или  $v_1, v_4, v_5$ , можем определить неизвестные, например:  $v_a = v_1 \sqrt[k]{\frac{P_a}{P_1}}$  или

$$P_a = P_1 \left(\frac{v_1}{v_a}\right)^k \quad \text{и т.п.}$$

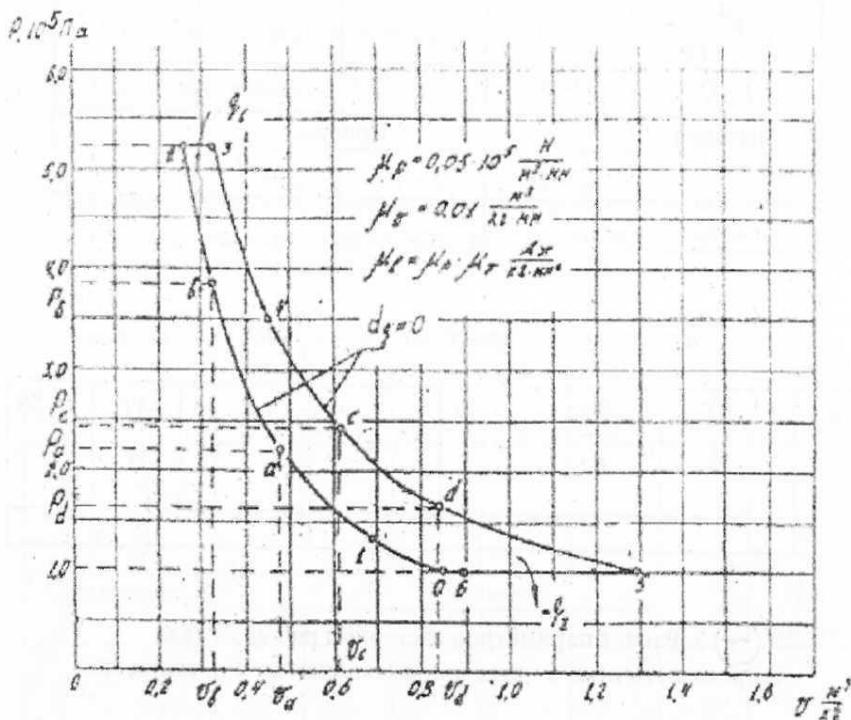


Рис. 4. Рабочая диаграмма цикла ГТД в  $p$ - $v$  координатах

Подбор значений  $v_a, v_b, \dots$  или  $P_a, P_b, \dots$  производится в пределах полученных значений  $v_1, v_2, \dots$  или  $P_1, P_2, \dots$ . Расчетные значения

промежуточных точек процессов откладывают на графике  $p$ -ви через них проводится кривая процесса. Значения точек сводятся в табл. 5.

6.2. Расчет процессов, изображаемых в  $T$ - $S$ -координатах Для построения цикла в  $T$ - $S$ -координатах необходимо интервалы изменения температур от  $T_2$  до  $T_3$  и от  $T_5$  до  $T_0$  разбить на три примерно равные части (рис. 5). Для значений температур процессов  $T_{2-a^1}$ ,  $T_{2-b^1}$  вычисляем соответствующие изменения энтропии рабочего тела в процессах 2-3 и 5-0 по соотношениям  $\Delta S_{2-a^1} = c_p \ln \frac{T_{a^1}}{T_2}$ ;  $\Delta S_{2-b^1} = c_p \ln \frac{T_{b^1}}{T_2}$ ;

$$\Delta S_{0-c^1} = c_p \ln \frac{T_{c^1}}{T_2}; \Delta S_{0-d^1} = c_p \ln \frac{T_{d^1}}{T_2}.$$

Полученные изменения энтропии откладывают в принятом масштабе на  $T$ - $S$ -диаграмме и по выбранным значениям  $T_0$  определяют координаты промежуточных точек процесса, через которые проводят плавную кривую (см. рис. 5). Значения точек сводятся в табл. 5.

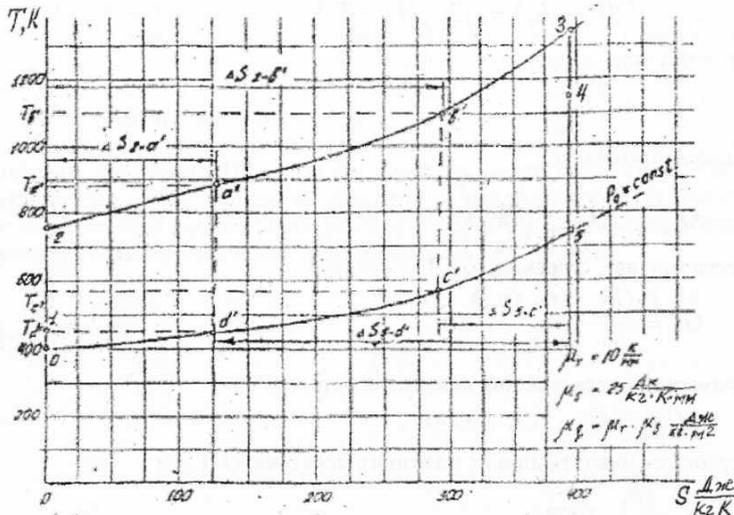


Рис. 5 Тепловая диаграмма цикла ГТД в  $T$ - $S$  координатах

## 7. Построение идеального цикла в $p$ - $v$ - и $T$ - $S$ - координатах

На миллиметровой бумаге по результатам расчетов параметров рабочего тела в узловых и промежуточных точках процессов цикла строят  $p$ - $V$ - и  $T$ - $S$ - диаграммы цикла. Масштабы параметров по осям координат  $\mu_p, \mu_v, \mu_T, \mu_S$  подбираются так (см. рис. 4 и 5), чтобы каждая из диаграмм размещалась на формате А4 (210x297). Графики используются для оценки равенства работы в идеальном цикле  $l_{расч} = l_{граф}$ ;  $P_{Црасч} = l_{Цграф}$ , найденных ранее расчетным путем и планиметрированием соответствующих площадей цикла.

## 8. Расчет энергетических характеристик ГТД

Энергетические характеристики ГТД следующие:

- скорость набегающего потока, м/с,

$$c_0 = M \cdot a = M \sqrt{kRT_0}$$

- скорость истечения рабочего тела из сопла двигателя, м/с,

$$c_5 = \sqrt{2(h_4 - h_5)} = \sqrt{2c_p(T_4 - T_5)}$$

- удельная тяга двигателя, кг,

$$G_{возд} = \frac{R}{R_{уд}}$$

- масса двигателя, кг,

$$M_{дв} = 20G_{возд} \sqrt{\left(\pi_k\right)_{opt}^{\frac{k-1}{k}} - 1}$$

- масса топлива, сгорающего в 1 кг воздуха, кг

$$G_T = \frac{G_{O_2}}{\alpha} \cdot \frac{(1+12j)}{8f}$$

- суммарная масса топлива за время полета, кг,

$$M_T^{сум} = G_{возд} \cdot G_T \cdot 3600\tau$$

- термический коэффициент полезного действия ГТД

$$\eta_t = \frac{l_{ц}}{q_1} \cdot 100\%$$

Результаты вносятся в табл. 6.

## 9. Рекомендации по оформлению пояснительной записки

При оформлении пояснительной записки (ПЗ) следует руководствоваться стандартом СГАУ. В состав ПЗ входят:

- титульный лист (выдается кафедрой);
- задание (выдается руководителем);
- реферат;
- содержание;
- перечень условных обозначений, символов, сокращений единиц и терминов;
- введение;
  
- основная часть;
- заключение;
- список использованных источников;
- приложения.

Текст ПЗ выполняется на бумаге формата А4 (297x210). Реферат должен содержать сведения об объеме, количестве иллюстраций и таблиц, об использованных источниках, перечень ключевых слов, текст. Ключевые слова характеризуют содержание реферируемой ПЗ (не более 15 слов в именительном падеже).

В основной части ПЗ отражаются основные этапы проведенной работы. Текст ПЗ подразделяется на разделы и подразделы со своей порядковой нумерацией. Таблицы, графики, схемы выполняются тушью или черными чернилами (паста, фломастер).

Графики должны иметь координаты с нанесенными масштабными цифрами. Формулы в ПЗ следует нумеровать, номер заключается в круглые скобки. Ссылки на источники помещают в прямые скобки. В заключение подводится итог проведенной работы, делаются выводы, предложения. В конце ПЗ приводится список использованных источников.

## ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Болгарский А.В., Мукачев Г.А., Щукин В.К. Термодинамика и теплопередача: Учеб.для авиационных вузов. 3-е изд., перераб. М.: Высш. шк., 1991.
2. Юдаев Б.Н. Техническая термодинамика, теплопередача: Учебник для энергетических спецвузов. М.: Высш. шк., 1988.
3. Алексеев Г.Н. Общая теплотехника. М: Высш. шк., 1980.
4. Некрасов Б.Б. Гидравлика и ее применение на летательных аппаратах. М.: Машиностроение, 1967.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Федоров М.Н. Эксплуатация теплооборудования, расход и нормирование топлива в аэропортах: Справочник. М.: Транспорт, 1986.
2. Басканов А.П. и др. Теплотехника. М.: Энергоиздат, 1982.
3. Егорушкин В.Е., Ценкович Б.И. Основы гидравлики и теплотехники. М.: Машиностроение, 1981.
4. Клемина А.Д. и др. Газовая динамика: Метод, указ.к лаб. раб. Куйбышев, Куйбыш. авиац. ин-т. 1986.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мухачев Г.А., Щукин В.Е. Термодинамика и теплопередача. М.: Высш. шк., 1991.-400 с.
2. Кирилин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. М.: Энергоатомиздат, 1983. -416 с.
3. Сборник задач по технической термодинамике и теплопередаче/ Под ред. Б.Н. Юдаева. М.: Высш. шк., 1968. - 372 с.
4. Требования к оформлению учебных текстовых документов: Метод, указания/ Сост. В.Н. Белозерцев, В.В. Бирюк, А.П.Толстоногов/ Куйбышев, авиац. ин-т. Куйбышев, 1988. -29 с.
5. Белозерцев В.Н., Бирюк В.В., Толстоногов А.П. Методические указания по оформлению пояснительной записки к курсовой работе (проекту)/ Куйбышев, авиац. ин-т. Куйбышев, 1987. - 16 с.
6. Меркулов А.П. Техническая термодинамика: Конспект лекций/ Куйбышев, авиац. ин-т. Куйбышев, 1990. - 235 с.
7. Толстоногов А.П. Техническая термодинамика: Конспект лекций/ Куйбышев, авиац. ин-т. Куйбышев, 1990. - 100 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1

### ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЯ

Топливо:керосин Т

№ вар.	Высота полета Н, м	Число М	Время τ	Температура Т <sub>3</sub> ,К	Тяга двигателя R, Н
1	1000	0,7	5	1400	4000
2	6000	1,2	4	1450	4500
3	11000	1,8	3	1500	5000
4	7000	2,2	2	1550	5500
5	8000	2,7	1	1600	6000
6	2000	0,6	5	1650	6500
7	7000	1,1	4	1700	7000
8	3000	2,1	3	1200	5000
9	8000	2,1	2	1250	5500
10	9000	2,6	1	1300	6000
11	3000	0,4	5	1350	6500
12	8000	0,9	4	1400	7000
13	4000	1,5	3	1450	6000
14	9000	1,9	2	1500	6500
15	10000	2,4	1	1550	5500
16	4000	0,5	5	1600	4500
17	9000	0,8	4	1650	4000
18	5000	1,3	3	1700	4550
19	10000	1,8	2	1200	5000
20	11000	2,3	1	1250	5500
21	5000	0,8	5	1300	4050
22	10000	1,3	4	1350	4550
23	6000	1,9	3	1400	5050
24	11000	2,3	2	1450	5550
25	7000	2,8	1	1500	6050

Приложение 2  
Таблица П1

**Международная стандартная атмосфера**

Н, м	T <sub>3</sub> , К	$p_0, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	$\rho, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	$\mu \cdot 10^5, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$
0	288,2	101325	1,225	1,79
1000	281,7	101325	1,112	1,76
2000	275,2	79501	1,007	1,73
3000	268,7	70121	0,909	1,69
4000	262,7	61660	0,819	1,66
5000	255,7	54048	0,736	1,63
6000	249,2	47218	0,660	1,60
7000	242,7	41105	0,590	1,56
8000	236,2	35652	0,526	1,53
9000	229,7	30800	0,467	1,49
10000	223,3	26500	0,414	1,45
11000	216,8	22700	0,365	1,42
12000	216,7	19399	0,312	1,42

Таблица П2

**Состав атмосферы по высотам**

Н, м	N <sub>2</sub> , %	O <sub>2</sub> , %	CO <sub>2</sub> , %	H <sub>2</sub> O, %
0	78,09	20,95	0,03	0,93
1000	78,01	20,87	0,11	1,01
2000	77,93	20,79	0,19	1,09
3000	77,85	20,71	0,27	1,17
4000	77,77	20,63	0,35	1,25
5000	77,69	20,55	0,43	1,33
6000	77,61	20,47	0,51	1,41
7000	77,53	20,39	0,59	1,49
8000	77,45	20,31	0,67	1,57
9000	77,37	20,23	0,75	1,65
10000	77,29	20,15	0,83	1,73
11000	77,21	20,23	0,91	1,81
12000	77,09	19,95	1,03	1,93

Таблица ПЗ

**Физико-химические свойства керосинов,  
применяемых для реактивных двигателей**

Марка керосина	Т	Т-1	ТС-1	Т-2	Т-6	Т-7	МРТУ-38-1-244-66
Химическая формула	$\text{C}_{11}\text{H}_{196}$	$\text{C}_{7,2}\text{H}_{13,3}$	$\text{C}_{1,02}\text{H}_{1,99}$	$\text{C}_{1,1}\text{H}_{2,15}$	$\text{C}_{6,8}\text{H}_{13,3}$	$\text{C}_{11}\text{H}_{22}$	$\text{C}_{1,2}\text{H}_{2,34}$
Содержание серы и влаги, %	-	0,005	0,005	0,005	-	0,001	-
Плотность при 20°C	0,8	0,775	0,775	0,755	0,84	0,775	0,83
Теплота сгорания (низшая)	43000	43000	43130	43130	43130	43130	

*Учебное издание*

**ТЕПЛОТЕХНИКА**

*Методические указания*

Составители: Виктор Николаевич Белозерцев, Бирюк Владимир Васильевич, Арлен Петрович Толстоногов.

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королева. 443086 Самара, Московское шоссе, 34