

**ФОРМИРОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ
МОДЕЛИ
ДВИГАТЕЛЯ-ПРОТОТИПА
И ПРОЕКТНЫЙ РАСЧЕТ ГТД
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОДСИСТЕМЫ
АСТРА-ПР
В PDM СИСТЕМЕ SMARTTEAM**

2007



САМАРА

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА»

ФОРМИРОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
ДВИГАТЕЛЯ-ПРОТОТИПА И ПРОЕКТНЫЙ РАСЧЕТ ГТД
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОДСИСТЕМЫ АСТРА-ПР
В PDM СИСТЕМЕ SMARTTEAM

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве методических указаний*

САМАРА
Издательство СГАУ
2007

УДК 621.431.75
ББК 39.55



**Инновационная образовательная программа
"Развитие центра компетенции и подготовка
специалистов мирового уровня в области аэро-космических и геоинформационных технологий"**

Составители: *В.В. Кулагин, В.С. Кузьмичев, И.Н. Крупенич, А.Ю.Ткаченко*

Рецензент канд. техн. наук, доц. кафедры КиПДЛА СГАУ М. Е. П р о д а н о в

Формирование математической модели двигателя-прототипа и проектный расчет ГТД с использованием подсистемы АСТРА-ПР в PDM системе SmarTeam: метод. указания/ сост. В.В. Кулагин, В.С. Кузьмичев, И.Н. Крупенич [и др.].– Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 48 с.: ил.

Изложена методика выполнения курсовой работы «Формирование математической модели двигателя-прототипа и проектный расчет ГТД с использованием автоматизированной системы термогазодинамического расчета и анализа (АСТРА-ПР)» в PDM системе SmarTeam.

PDM модель разработана на кафедре теории двигателей летательных аппаратов СГАУ и предназначена прежде всего для студентов специальности 160301, выполняющих курсовое и дипломное проектирование авиационных ГТД.

УДК 621.431.75
ББК 39.55

© Самарский государственный

аэрокосмический университет, 2007

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ СОКРАЩЕНИЙ	4
ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	5
ОПИСАНИЕ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ В СРЕДЕ SMARTeam	6
ПОДГОТОВКА СИСТЕМЫ К РАБОТЕ	8
ФОРМИРОВАНИЕ РАЗДЕЛОВ КУРСОВОЙ РАБОТЫ	11
ВВЕДЕНИЕ	11
1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГТД ДАННОГО ТИПА ..	12
2. РАЗВИТИЕ ГТД СЕМЕЙСТВА ЗАДАННОГО ДВИГАТЕЛЯ-ПРОТОТИПА И ОСНОВНЫЕ ДАННЫЕ ПРОТОТИПА	16
3. СОСТАВЛЕНИЕ МЕТОДИКИ ПРОЕКТНОГО ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА И ЕГО ВЫПОЛНЕНИЕ «ВРУЧНУЮ» (НА КАЛЬКУЛЯТОРЕ).....	17
4. ФОРМИРОВАНИЕ ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОТОТИПА	19
5. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ И ПРОЕКТНЫЙ ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ МОДИФИЦИРОВАННОГО ДВИГАТЕЛЯ	22
6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	24
7. ФОРМИРОВАНИЕ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ.....	25
ПРИЛОЖЕНИЕ	25
ГЛОССАРИЙ	27
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	30

СПИСОК ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

PDM	– Product Data Management (система управления проектными данными)
ST	– PDM-система SmarTeam
ГТД	– газотурбинный двигатель
ЖЦ	– жизненный цикл (документа)
КР	– курсовая работа
ЛКМ	– левая клавиша мыши
м/м	– математическая модель
ПКМ	– правая клавиша мыши
САУ	– стандартные атмосферные условия
СККП	– сквозное курсовое компьютерное проектирование
ТВ(В)Д	– турбовинтовой (турбовинтовентиляторный) двигатель
ТВад	– турбовальный двигатель
ТГДР	– термогазодинамический расчет
ТРД	– турбореактивный двигатель
ТРД(Д)Ф	– двухконтурный турбореактивный двигатель с форсажом
ТРДД	– двухконтурный турбореактивный двигатель

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Курсовая работа «Формирование математической модели двигателя-прототипа и проектный расчет ГТД с использованием автоматизированной системы термозаэродинамического расчета и анализа (АСТРА-ПР)» является начальным этапом сквозного курсового компьютерного проектирования (СККП), выполняемого в четырех семестрах, и нацелена на практическое усвоение и закрепление знаний, полученных студентами на лекциях в седьмом семестре (кн. 1 учебника [1]).

В ней на базе известного двигателя-прототипа студент выбирает параметры рабочего процесса и выполняет проектный расчет модифицированного «своего» двигателя. Результаты этого расчета являются исходными данными для расчета его высотно-скоростных характеристик (с помощью подсистемы АСТРА-ВСХ), проектирования проточной части (АСТРА-ТК) и последующего проектирования компрессора, турбины и других узлов двигателя, а также для выполнения курсового проекта на кафедре КиПДЛА.

Курсовая работа складывается из введения, пяти разделов и заключения. Чтобы выполнить работу со знанием дела и успешно защитить ее, целесообразно, во-первых, внимательно прочитать приложение 1 к *электронному учебнику* [2], в котором изложено краткое содержание этой работы, во-вторых, поступать в соответствии с предлагаемыми методическими указаниями, а при затруднениях обращаться к *электронному учебному пособию* [4], в котором курсовая работа изложена подетально и приведены четкие указания как надо решать задачу в разделах, которые могут, по мнению авторов, вызвать затруднения.

Подчеркнем, что для выполнения раздела 1 достаточно знать принцип действия двигателя (гл. 1 учебника [1]). В разделе 2 учебного пособия [4] указывается как надо поступать, если исходных данных двигателя-прототипа недостаточно для выполнения курсовой работы. Для выполнения раздела 3 необходимо знать материал, изложенный на первой и второй лекциях (или в разделе 3 *электронного учебного пособия* [4]).

Затруднения могут возникнуть при выполнении разделов 4 и 5 (которые вместе с разделом 3 следует отнести к основным). Для усвоения их сути и тонкостей выполнения нужно пользоваться и приложением 1 [2], и *электронным учебным пособием* [4].

В среде SmarTeam студенту предлагается готовая структура, состоящая из документов, сгруппированных в те же пять разделов.

Процесс выполнения курсовой работы полностью аналогичен процессу её выполнения в бумажном виде. Отличие заключается в том, что система SmarTeam позволяет документировать результаты, получаемые при её выполнении в электронном виде, обеспечивая автоматическое формирование структуры курсовой работы и хранение информации, а также организуя доступ к курсовой работе студенту и преподавателю.

В процессе работы в базе данных ТДЛА пользователь выполняет одну из трех ролей:

- **администратора** (обеспечивает обслуживание процедур, запуск, выдачу заданий);
- **преподавателя** (выполняет контроль понимания студентом предметной области, а также качество выполнения курсовой работы);
- **студента** (выполняет курсовую работу).

В данном руководстве объяснено, какую последовательность действий необходимо выполнить *студенту*, чтобы приступить к работе, сформировать её, отправить на проверку преподавателю, внести необходимые исправления по замечаниям преподавателя и успешно защитить курсовую работу.

ОПИСАНИЕ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ В СРЕДЕ SMARTTEAM

Как уже отмечалось, краткое содержание курсовой работы приведено в Приложении 1 [2], а методика ее выполнения детально описана в [4]; в данном руководстве подробно освещаются основные отличия выполнения работы, связанные с внедрением PDM системы SmartTeam.

На рис. 1 представлено сформированное дерево проектов, из которого можно видеть, что структура курсовой работы в среде SmartTeam полностью соответствует структуре, рекомендованной в [4]. Она включает пять основных разделов, и, кроме того, введение, заключение и четыре приложения.

Данные, полученные при выполнении курсовой работы, содержатся в среде SmartTeam в объектах, называемых «документ». Все документы относятся к одному из трех типов и обозначаются в дереве проектов соответствующим идентификатором перед наименованием документа:

[doc] – документ MS Word;

[xls] – документ MS Excel;

[vrd] – математическая модель в подсистеме АСТРА-ПР.

Каждый раз, когда пользователь в процессе работы вносит в документ изменения, создается новая **версия** документа в дополнение к старым.

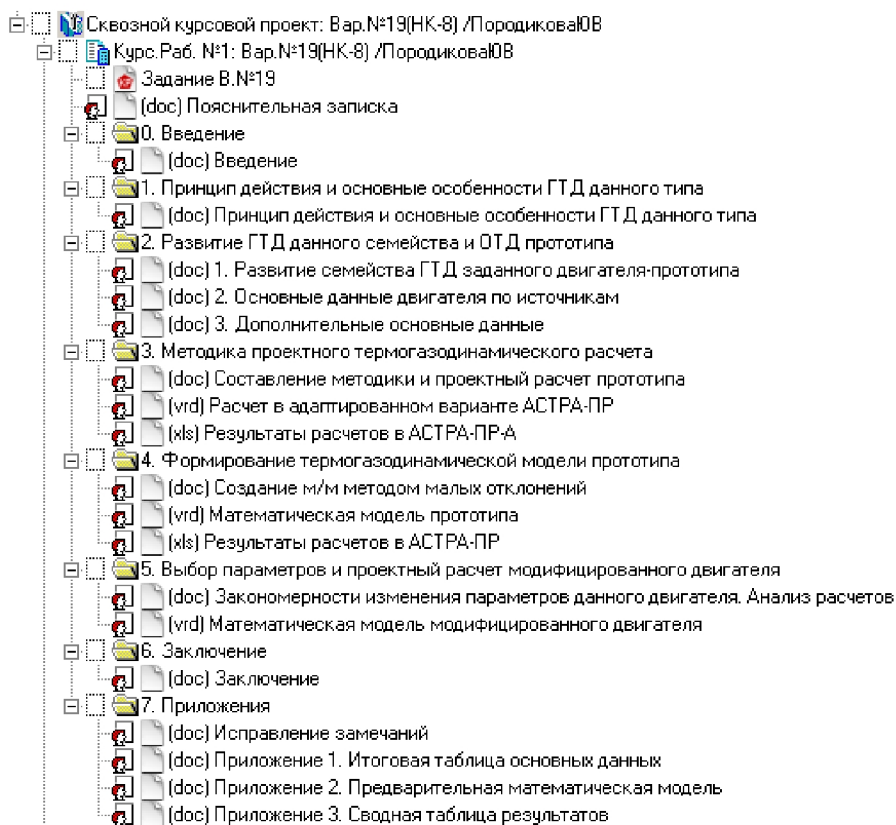


Рис. 1. – Структура курсовой работы, реализованная в среде SmartTeam.

Для удобства документы группируются в разделы, для нашего случая группирующие разделы и их наименования соответствуют разделам курсовой работы, как они представлены в [4].

Документы, входящие в группирующие разделы, и сами разделы образуют структуру курсовой работы.

Каждый документ в системе SmarTeam может находиться в одном из трех состояний:

- в процессе разработки;
- в архиве;
- на проверке.

В процессе разработки документ располагается в рабочей папке студента, которая задается ему администратором вместе с именем пользователя и паролем для входа в систему SmarTeam. Когда студент принимает решение о том, что работа над очередным документом завершена, он отправляет его в **архив**, откуда документ может быть взят как студентом (на доработку), так и преподавателем (на проверку); важно отметить, что при этом создается новая **версия** документа, которая создается в рабочей папке соответственно студента или преподавателя.

Таким образом, в процессе выполнения курсовой работы:

администратор создает курсовую работу как объект, задает пользователю имя пользователя, пароль и рабочую папку;

студент, работая над курсовой, заполняет полученными данными соответствующие документы курсовой работы; каждый заполненный документ отправляет в архив; после проверки преподавателем забирает документ из архива и вносит в него исправления, создавая новую версию;

преподаватель вызывает из архива готовые документы студента и осуществляет их проверку, создавая новые версии документов, включающие замечания.

Кроме того, студенту будет необходимо пройти две защиты:

- **промежуточную** (после завершения формирования математической модели двигателя-прототипа);
- **заключительную** (после выполнения всех разделов работы).

Каждая защита проводится при личной встрече, назначаемой преподавателем, согласно учебному плану.

Рассмотрим на примере, какие действия необходимо выполнить студенту в процессе выполнения курсовой работы.

ПОДГОТОВКА СИСТЕМЫ К РАБОТЕ

1. Вход в систему SmarTeam

Для запуска системы ST выполните: Меню Пуск → Все программы → SmarTeam → SmarTeam (рис. 1).

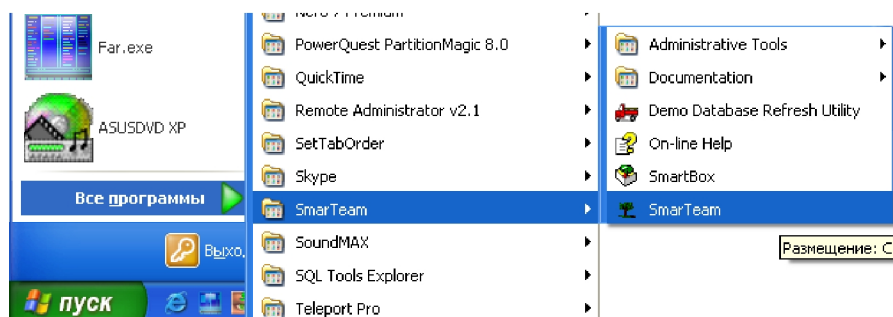


Рис. 1 – Запуск системы SmarTeam

После запуска системы необходимо ввести имя пользователя и пароль, заданные администратором (рис. 2).

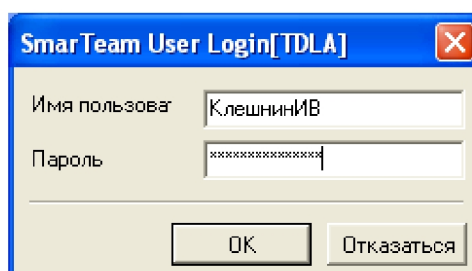


Рис. 2 – Авторизация в SmarTeam

2. Описание системы SmarTeam

Работа с системой начинается с основного экрана системы.

Основной экран системы включает в себя (рис. 3):

- 1 – дерево существующих в системе проектов (объектов), в котором отображаются все объекты, доступные для просмотра текущему пользователю;
- 2 – главное меню программы;
- 3 – панель инструментов, на которой расположены кнопки, вызывающие наиболее часто требующиеся функции системы;
- 4 – панель информации выбранного объекта, на которой отображаются стандартные для данного типа объектов закладки;
- 5 – форма выбранного объекта, где представлены все атрибуты, присущие выбранному объекту;
- 6 – вспомогательное меню выбранного объекта. Здесь расположены закладки, объединяющие атрибуты объекта по группам;
- 7 – поле, отображающее имя текущего пользователя;
- 8 – статусная строка с подсказками по текущим действиям.

3. Создание объектов курсовой работы

Перед началом работы необходимо создать все документы (пустые), которые требуется заполнить в ходе выполнения курсовой работы. Подчеркнем, что по форме вся курсовая работа представляет собой заполнение этих пустых документов. Эта процедура **выполняется только один раз**, при первом запуске системы пользователем; система не позволит случайно создать структуру объектов второй раз.

Для этого в дереве проектов (рис. 3) выберите **объект** «КР1 Вар.№XX(YYY)/Ваша фамилия» одним щелчком мыши.

На форме объекта нажмите кнопку «Создать структуру курсовой работы» и дождитесь отчета системы о том что структура успешно создана (рис. 4). При возникновении ошибок на этом этапе обратитесь к администратору системы.

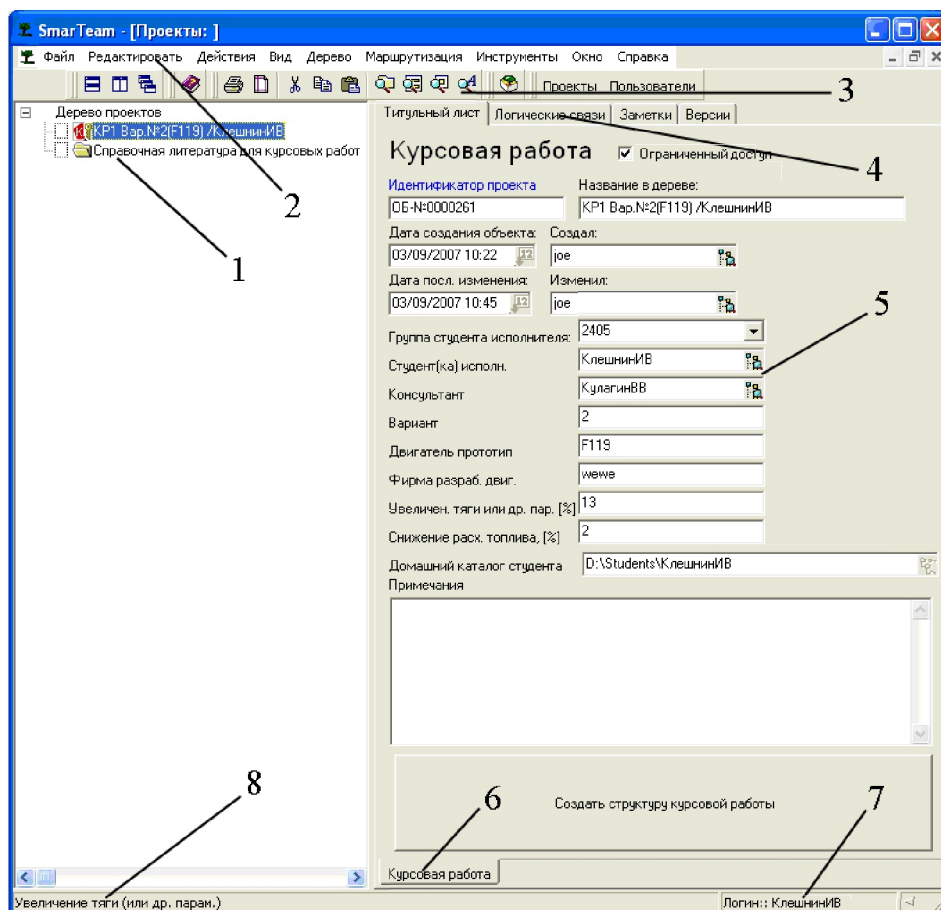


Рис. 3 – Главное окно SmarTeam

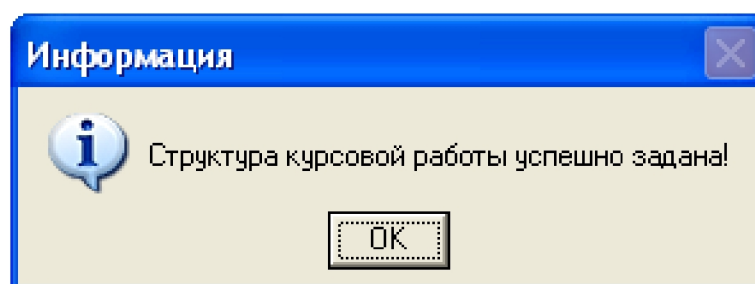


Рис. 4 – Отчет о создании структуры курсовой работы

После того, как структура курсовой работы создана, необходимо изменить режим отображения дерева проектов, чтобы документы и разделы курсовой работы стали отображаться в дереве в правильном порядке.

4. Переключение режима отображения дерева проектов к требуемому виду

При первом запуске системы требуется настроить вывод дерева проектов удобным для пользователя образом, поскольку по умолчанию дерево выводится в неупорядоченном виде. Эта процедура также выполняется только один раз.

Для того чтобы произвести сортировку объектов в дереве, необходимо сделать следующее:

1. В главном меню выберите пункт «Дерево» → «Свойства дерева» (рис. 5).

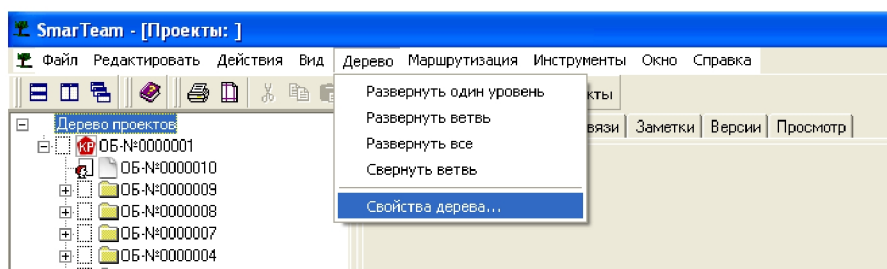


Рис. 5 – Исправление вида дерева

2. На закладке «Сортировка» в поле «Сортировать» установите «По классам, обозначению», а в поле «Направление» выберите «По возрастанию» (рис. 6).

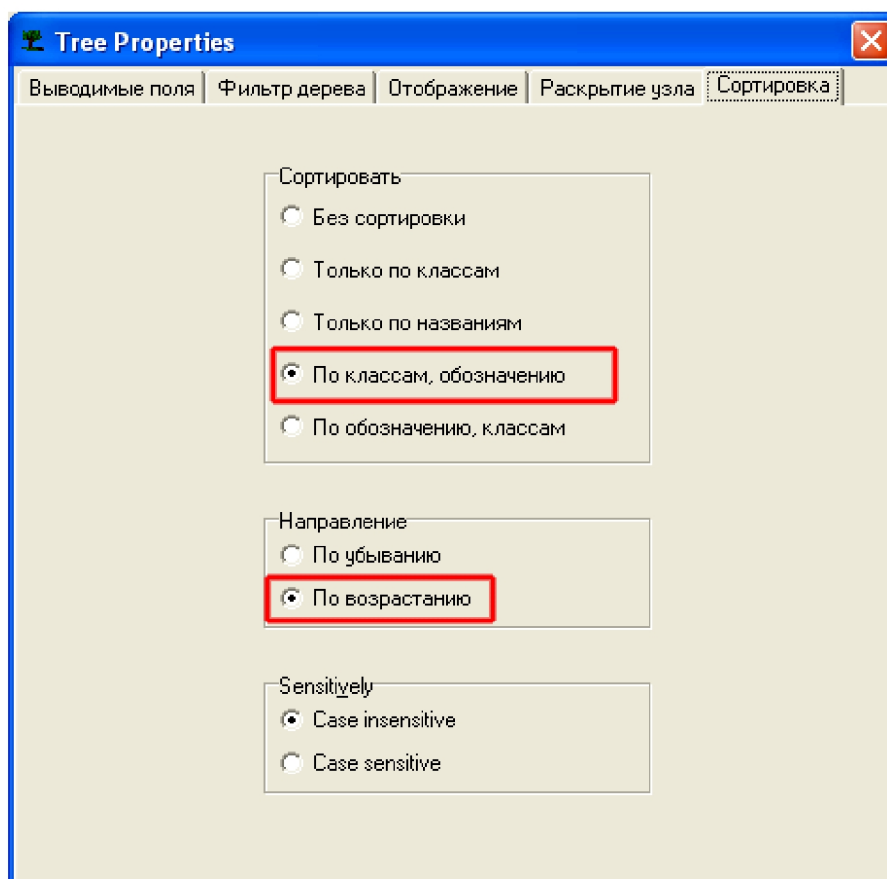


Рис. 6 – Исправление вида дерева

Если после этого в дереве проектов не появятся разделы и документы, составляющие структуру курсовой работы, выйдите из системы, и выполните повторный вход в систему, для того чтобы изменения вступили в силу.

ФОРМИРОВАНИЕ РАЗДЕЛОВ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

ВВЕДЕНИЕ

Во введении рекомендуется кратко охарактеризовать заданный двигатель–прототип и летательный аппарат, на котором он эксплуатируется, указать, к какому типу данный двигатель относится и какой фирмой разработан. Желательно отметить, какие материалы были обнаружены по этому двигателю в периодической литературе за последние 1...5 лет (список литературы на бланке задания) и в Интернете.

1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГТД ДАННОГО ТИПА

1. Выбор объекта

В открывшемся дереве проектов необходимо двойным щелчком мыши открыть **раздел** «Раздел №1: Принцип действия и основные особенности ГТД данного типа» и однократным щелчком мыши выбрать входящий в его состав имеющийся **объект** «(doc) Принцип действия и основные особенности ГТД данного типа» (рис. 7).

При этом в правой части экрана отобразится карточка объекта. На карточке представлены основные атрибуты документа и расположение привязанного файла MS Word. Каталог, в котором располагаются все рабочие файлы студента, задается администратором системы.

2. Открытие файла, привязанного к объекту

Дважды щелкнув ЛКМ по объекту, мы откроем файл, привязанный к объекту в программе-обработчике (в данном случае, MS Word) для заполнения его данными (предварительно в начале работы файл будет создан, после подтверждения этой операции – см. рис. 8). В дальнейшем, двойной щелчок ЛКМ по объекту будет вызывать этот созданный файл для редактирования.

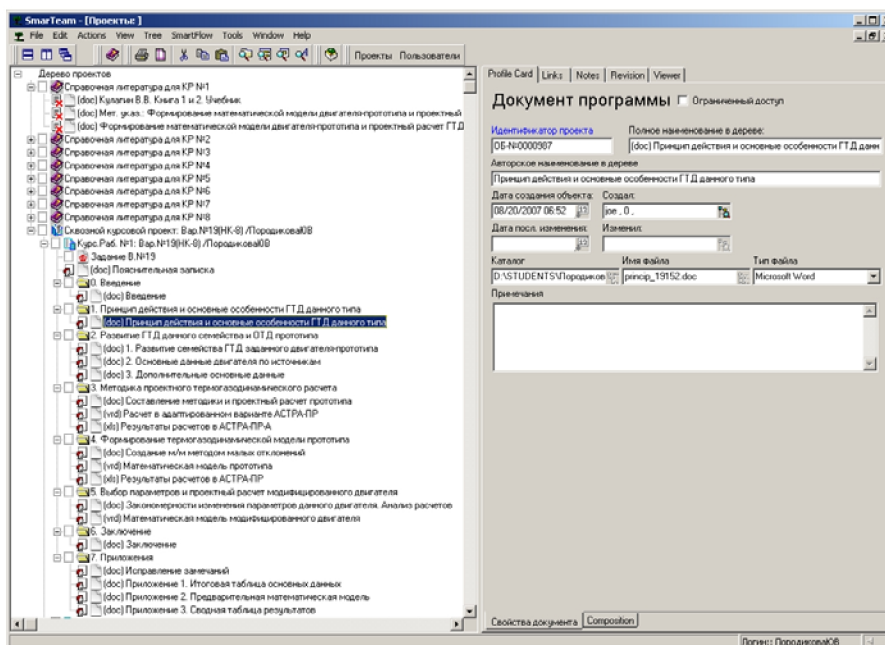


Рис. 7 – Выбор объекта

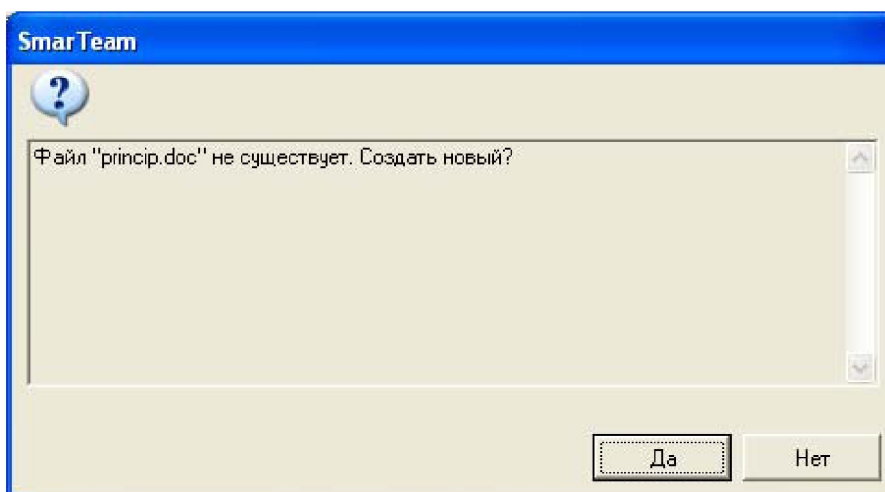


Рис. 8 – Подтверждение создания объекта

3. Формирование документа «Принцип действия и основные особенности ГТД данного типа»

Далее в этом пустом документе (рис. 9) следует изложить принцип действия и особенности заданного вам ГТД, как вы их понимаете.

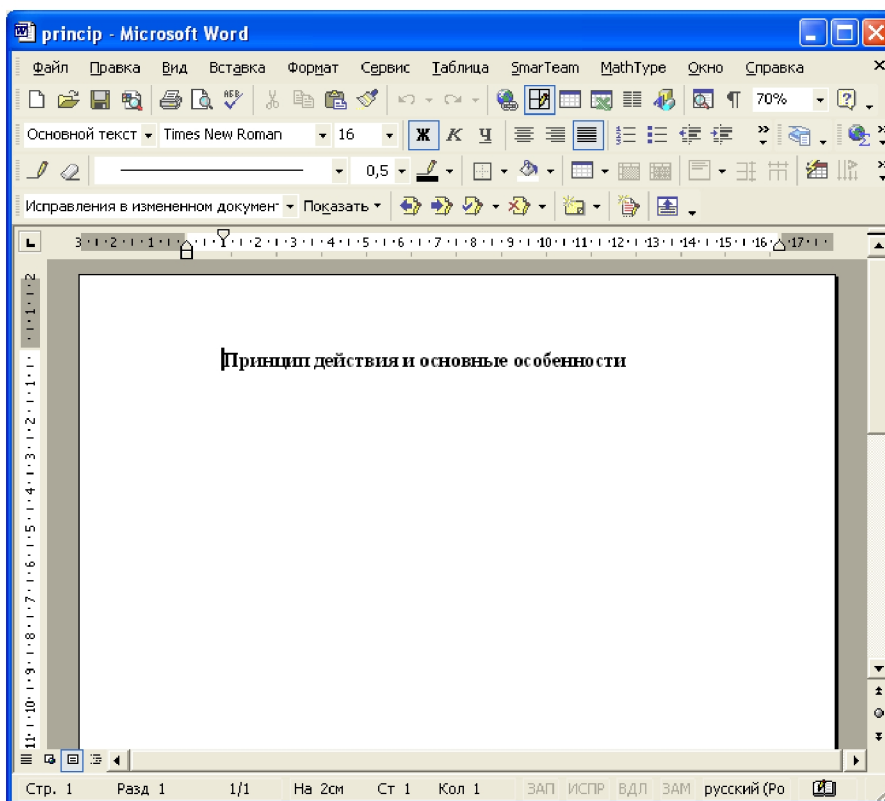


Рис. 9 – Открытый в программе MS Word шаблон документа

4. Сохранение документа

После внесения необходимой информации (или изменений в дальнейшей работе) необходимо сохранить их, нажав «сохранить» в программе, с которой вы работаете. Документ автоматически сохраняется в вашу рабочую папку в системе SmartTeam.

5. Отправка документа в архив

После того как вы внесли всю информацию и хотите отдать документ на проверку преподавателю, необходимо отправить его в электронный архив. После отправления документа в архив, вы больше не можете вносить в него изменения.

Для того чтобы отправить документ в архив, нужно:

- 1) выбрать объект, работа над которым окончена, в дереве проектов;
- 2) щелкнуть ПКМ по объекту;
- 3) в выпадающем меню выбрать пункт «Жизненный цикл» (рис. 10);
- 4) в выпадающем меню выбрать «Утвердить (сдать в архив)»;

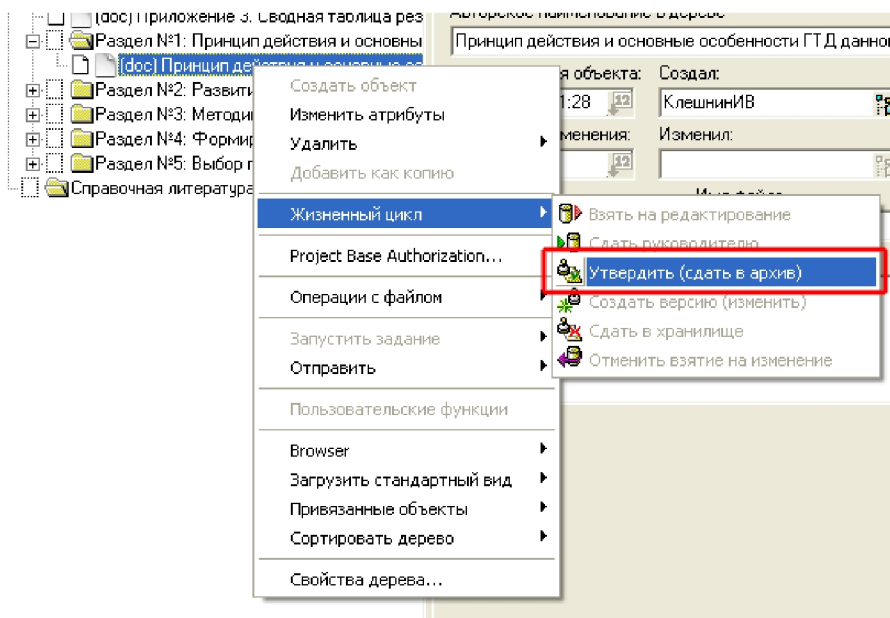


Рис. 10 – Отправка документа в архив

5) в открывшемся окне (рис. 11) нажать «ОК».

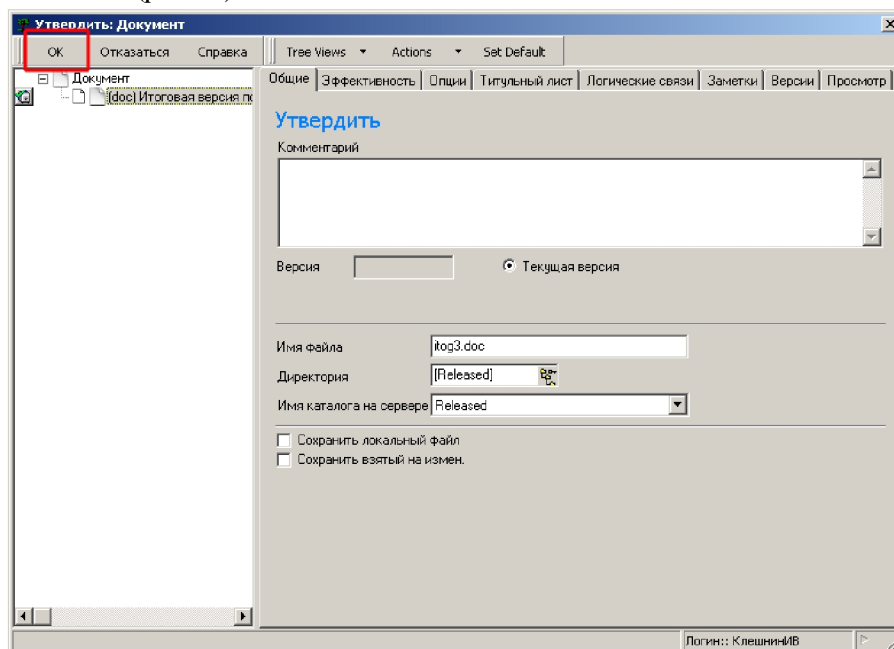


Рис. 11 – Подтверждение отправки документа в архив

6. Просмотр замечаний преподавателя по созданному документу

Преподаватель вносит свои замечания в атрибут «примечания» каждого документа (рис. 7). Вы не можете редактировать эти атрибуты. Расшифровку замечания по тексту документа преподаватель наносит, используя функцию «красный карандаш» (MarkUp).

Вы всегда сможете просмотреть замечания, выбрав в главном меню объекта (рис. 12) закладку «Просмотр» и войдя в режим «MarkUp».

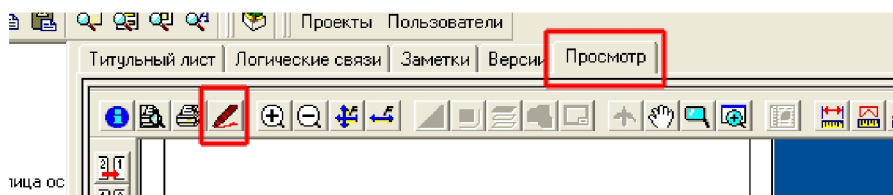


Рис. 12 – Включение режима просмотра замечаний

7. Исправление замечаний в документе

Для того чтобы исправить замечания, сделанные вам преподавателем, требуется забрать документ электронного архива в вашу рабочую папку.

Для того чтобы это сделать, необходимо следующее:

- 1) выбрать объект в дереве проектов;
- 2) щелкнуть ПКМ по объекту;
- 3) в выпадающем меню выбрать «Жизненный цикл»;
- 4) в выпадающем меню выбрать «Создать версию (изменить)»;
- 5) в открывшемся окне нажать «ОК».

После этого документ попадет в вашу рабочую папку и станет доступным для редактирования. Исправив замечания, в главном меню объекта выберите закладку «Версии». Там выберите **последнюю созданную версию, и вновь отправьте ее в электронный архив.**

2. РАЗВИТИЕ ГТД СЕМЕЙСТВА ЗАДАННОГО ДВИГАТЕЛЯ-ПРОТОТИПА И ОСНОВНЫЕ ДАННЫЕ ПРОТОТИПА

Данный раздел курсовой работы в системе SmarTeam включает в себя три документа (MS Word):

- «Развитие семейства ГТД»;
- «Основные данные по источникам»;
- «Основные данные, полученные путем анализа».

В первом документе освещаются следующие три вопроса:

- тенденции развития двигателей данного семейства (основные данные – P и $C_{y\partial}$, параметры рабочего процесса – T_F^* , $\pi_{K\Gamma}^*$, m , π_{BH}^* и G_B по годам);
- краткие сведения о летательном аппарате, на котором эксплуатируется двигатель-прототип или его модификация;
- конструктивная схема двигателя-прототипа и её краткое описание.

Во втором документе со ссылкой на справочную и периодическую литературу, а также Интернет приводятся основные данные и термогазодинамические параметры двигателя-прототипа для взлетных условий ($H=0$, $M_n=0$, САУ, режим максимальный) и для условий длительного крейсерского полета, а в случае различия данных по разным источникам – их анализ и обоснование варианта, принимаемого за верный.

В третьем документе приводятся необходимые в данной курсовой работе основные данные, отсутствующие в периодической и справочной литературе, которые получают из анализа тенденций изменения параметров: фирменных (по реферату) и общих (по разделу 16.5 [3] и таблице 16.3 [3]).

На основании вышеуказанных трех документов формируется документ «Приложение 1».

После завершения формирования всех четырех документов (трех входящих в раздел и документа «Приложение 1»), их необходимо отправить в архив (ЖЦ → «Утвердить»). Редактирование документов осуществляется путем вызова их из архива и создания новых версий (ЖЦ → «Создать версию»).

3. СОСТАВЛЕНИЕ МЕТОДИКИ ПРОЕКТНОГО ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА И ЕГО ВЫПОЛНЕНИЕ «ВРУЧНУЮ» (НА КАЛЬКУЛЯТОРЕ)

Работу над разделом 3 курсовой работы необходимо вести следующим образом.

В первую очередь необходимо составить методику проектного расчета ГТД заданного типа и схемы. Исходный материал для этого наиболее полно приведен в [4]. В среде SmarTeam методика проектного расчета составляется и расчет выполняется в документе MS Word, который называется «Составление методики проектного термогазодинамического расчета и его выполнение «вручную» (на калькуляторе)».

Затем на основании раздела 8.1. [1, 2] необходимо обосновать и выбрать величины, характеризующие отборы воздуха на охлаждение узлов, а также все КПД, коэффициенты потерь, и другие постоянные, необходимые, согласно разработанной методике, для проектного расчета заданного двигателя (сформировать исходные данные для предварительной математической модели двигателя). Все выбранные величины и их обоснование приводятся в документе «Приложение 2. Исходные данные для предварительной математической модели». При этом параметры рабочего процесса берутся из предыдущего этапа.

Далее по составленной методике и принятым исходным данным (параметры рабочего процесса, КПД и коэффициенты потерь) выполняется проектный расчет «вручную» (на калькуляторе). Результаты расчета вписываются в первый столбец («Ручной расчет») документа «Приложение 3. Сводная таблица результатов». Туда же вписываются все величины из документа «Приложение 2», поскольку они являются исходными, и с ними будут сравниваться все последующие результаты расчетов.

Наконец, необходимо проверить правильность выполнения расчета. Это делается с помощью специального адаптированного варианта программы АСТРА-ПР, который обозначается АСТРА-ПР-А. Для того чтобы запустить подсистему, необходимо дважды щелкнуть ЛКМ по документу «Расчет в адаптированном варианте АСТРА-ПР». Затем необходимо ввести исходные данные для расчета в соответствии с параметрами, используемыми в ручном расчете и провести расчет.

Результаты расчетов, выполненных на калькуляторе и с помощью АСТРА-ПР-А, сравниваются:

$$\delta P = \frac{P_{\text{кальк}} - P_{\text{АСТРА}}}{P_{\text{АСТРА}}} \cdot 100\%, \quad \delta C_{\text{уд}} = \frac{C_{\text{уд.кальк}} - C_{\text{уд.АСТРА}}}{C_{\text{уд.АСТРА}}} \cdot 100\%.$$

Совпадение результатов ($\delta P < 1\%$ и $\delta C_{\text{уд}} < 1\%$) говорит о том, что методика расчета составлена правильно и расчет выполнен без ошибок.

В случае расхождения результатов указанных расчетов необходимо подетально и системно сравнить выписанные в таблицу документа «Приложение 3» результаты «ручного» расчета и контрольного расчета по АСТРА-ПР-А, начиная с параметров воздуха во входном устройстве и заканчивая параметрами газа в канале сопла.

После проведения расчета полученную *предварительную* математическую модель двигателя-прототипа необходимо сохранить нажатием кнопки «Сохранить» (она будет автоматически помещена в вашу рабочую папку). Результаты расчета в формате MS Excel необходимо сохранить в вашу рабочую папку с названием «adaprez.xls» (выбрав соответствующие пункты меню MS Excel и заданное администратором расположение вашей рабочей папки), а также занести все необходимые данные во второй столбец таблицы документа «Приложение 3».

Таким образом, на этом этапе работы необходимо заполнить данными два документа MS Word:

- «Приложение 2. Исходные данные предварительной математической модели»;

- «Приложение 3. Сводная таблица результатов».

Кроме того, данный раздел в среде SmarTeam включает в себя три документа:

- документ MS Word «Составление методики проектного термогазодинамического расчета и его выполнение «вручную» (на калькуляторе)»;
- математическая модель в подсистеме АСТРА-ПР «Расчет в адаптированном варианте АСТРА-ПР»;
- документ MS Excel «Результаты расчета в АСТРА-ПР».

После завершения работы над данным этапом курсовой работы отправьте все созданные документы в архив (ЖЦ → «Утвердить»), а новые варианты документов создавайте путем создания новых версий (ЖЦ → «Создать версию»), сохраняя историю изменения и наполнения документа.

4. ФОРМИРОВАНИЕ ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОТОТИПА

В предыдущем разделе получена весьма приблизительная математическая модель по двум причинам. Во-первых, расчет на калькуляторе выполняется при условии, что теплоемкость рабочего тела c_p и показатель изоэнтропы k в процессе сжатия (расширения) не изменяются, в то время как инженерные методы расчета учитывают переменность величин c_p и k в зависимости от температуры рабочего тела и его состава. Во-вторых, величины КПД узлов и коэффициентов потерь приняты по рекомендациям, изложенным в разд. 8.1. [1] и отражают эффективность среднестатистического двигателя. Величины КПД и коэффициентов каждого конкретного двигателя различаются, как правило, в пределах рекомендованных значений.

Поэтому здесь необходимо, во-первых, проектный расчет выполнять в АСТРА-ПР (с переменными c_p и k), а не в АСТРА-ПР-А, и получить математическую модель, которую можно принять за основу для дальнейшего формирования математической модели двигателя-прототипа. Ее будем называть *промежуточной*.

Во-вторых, необходимо подобрать величины КПД узлов и коэффициентов потерь из условия получения в результате расчетов основных данных прототипа. В этом и заключается формирование математической модели двигателя-прототипа. Оно выполняется, в свою очередь, в два этапа.

На первом этапе студент вычисляет прежде всего отличия величин тяги δP и удельного расхода топлива $\delta C_{уд}$, полученных по результатам расчета *промежуточной* математической модели, от их значений у двигателя-прототипа (невязки). Сведение невязок к величинам, близким к нулю, и является сутью формирования математической модели прототипа. С этой целью необходимо сделать термодинамический анализ и оценить качественно влияние различных КПД узлов и коэффициентов потерь на величины $P_{уд}$ и $C_{уд}$. (Именно здесь наиболее рельефно высвечивается понимание (непонимание) студентом ключевого вопроса теории двигателей.) А количественно оценить это влияние необходимо методом малых отклонений.

Работу над данным разделом курсовой работы необходимо вести следующим образом.

1. Перенесите полученную в предыдущем разделе *предварительную* математическую модель в новый этап: средствами операционной системы создайте в своей рабочей папке копию файла «adaptir.vrd» и переименуйте её в «prototype.vrd».

2. Подготовьте первоначальный вариант расчета в АСТРА-ПР: дважды щелкните ЛКМ на документе «Математическая модель прототипа». В системе АСТРА-ПР измените параметры топлива, для того чтобы проводить инженерный расчет с учетом переменности теплоемкости. Проведите расчет и сохраните полученную математическую модель в подсистеме АСТРА-ПР (кнопка «Сохранить»). Получена по существу *промежуточная* математическая модель. Ее необходимо ещё сформировать для получения окончательной математической модели двигателя-прототипа. Сохраните результаты в MS Excel в вашу рабочую папку с названием «rez.xls»; занесите полученные в результате расчета данные из документа MS Excel в соответствующие столбцы документа «Приложение 3».

Отправьте документы «Математическая модель прототипа» (*промежуточная*) и «Результаты расчета в АСТРА-ПР» в архив (ЖЦ → «Утвердить»), и дальнейшие новые варианты создавайте путем создания новых версий (ЖЦ → «Создать версию»), сохраняя историю изменения и наполнения вами документа.

3. Формирование математической модели прототипа выполняется в два этапа. На **первом этапе** уточняются КПД узлов и коэффициенты потерь (а может быть и некоторые другие параметры) из условия обеспечения тяги и удельного расхода топлива в проектном расчете, равными их значениям у двигателя-прототипа (документ «Приложение 1»). Эта задача решается методом малых отклонений (см. разд. 8.4. [1]). Определяются, прежде всего, «процентные отклонения» (невязки) указанных величин (P и $C_{уд}$ для ТРД и ТРДД; N_3 и C_3 для ТВ(В)Д; N_e и C_e для ТВАД):

$$\delta P = \frac{P_{\text{инж}} - P_{\text{прот}}}{P_{\text{прот}}} \cdot 100\%, \quad \delta C_{\text{уд}} = \frac{C_{\text{уд.инж}} - C_{\text{уд.прот}}}{C_{\text{уд.прот}}} \cdot 100\%.$$

(Вычисляя «процентное отклонение» (невязку), необходимо всегда из полученного значения вычитать заданное и результат брать со своим знаком.)

Подчеркнем, что если расход воздуха двигателя–прототипа известен, то невязки можно вычислять как по величинам абсолютной тяги δP , так и по величинам удельной тяги $\delta P_{\text{уд}}$, поскольку при принятом в расчете значении расхода воздуха $G_{\text{в}}$, равном расходу воздуха двигателя–прототипа, величины P и $P_{\text{уд}}$ однозначно определяют друг друга и $\delta P_{\text{уд}} = \delta P$.

Полученные невязки (δP и $\delta C_{\text{уд}}$) обычно отличаются от нуля и во многих случаях – весьма значительно. Поэтому необходимо определить пути их снижения, для чего анализируется влияние КПД узлов и коэффициентов потерь на удельные параметры прототипа аналогично тому, как это делается в разд. 8.5 [1] для одновального ТРД. Намечаются несколько вариантов (итерации $i=1,2,3$) двигателя-прототипа с измененными значениями КПД узлов и коэффициентов потерь и оценивается их влияние на невязки методом малых отклонений:

$$\delta P_{\text{уд}i} = \frac{\delta P_{\text{уд}}}{\delta \text{КПД}} \delta \text{КПД} + \dots + \frac{\delta P_{\text{уд}}}{\delta \text{коэф}} \delta \text{коэф} + \dots, \quad \delta C_{\text{уд}i} = \frac{\delta C_{\text{уд}}}{\delta \text{КПД}} \delta \text{КПД} + \dots + \frac{\delta C_{\text{уд}}}{\delta \text{коэф}} \delta \text{коэф} + \dots,$$

где

i – номер намеченного варианта расчета прототипа ($i = 1, 2, 3, \dots$);

$\frac{\delta P_{\text{уд}}}{\delta \text{КПД}}, \frac{\delta C_{\text{уд}}}{\delta \text{КПД}}$ – коэффициенты влияния КПД узлов на удельную тягу и удельный расход топлива;

$\frac{\delta P_{\text{уд}}}{\delta \text{коэф}}, \frac{\delta C_{\text{уд}}}{\delta \text{коэф}}$ – коэффициенты влияния коэффициентов потерь на удельную тягу и удельный расход топлива.

Коэффициенты влияния рассчитываются с помощью подсистемы АСТРА-ПР.

Понятно, что для существенного снижения невязок необходимо подобрать $\delta P_{\text{уд}}$ и $\delta C_{\text{уд}}$, близкие по величине к невязкам, но с обратным знаком. При этом следует иметь в виду, что выбираемые значения КПД узлов и коэффициентов потерь должны находиться в указанных в разд. 8.1 [1] пределах, и в редких случаях могут выходить за них, но не более чем на 1–2%.

Если за счет изменения КПД узлов и коэффициентов потерь не удастся обеспечить приемлемые (меньше 1%) невязки по удельной тяге и удельному расходу топлива (например величины $\delta P_{\text{уд}}$ и $\delta C_{\text{уд}}$ имеют одинаковый знак) и вместе с тем имеется возможность изменять температуру газа перед турбиной, то подбор удельной тяги нужно выполнять в основном за счет снижения $T_{\text{г}}^*$, а подбор удельного расхода топлива – в основном за счет изменения КПД узлов и коэффициентов потерь. В этом случае необходимо, кроме того, оценить влияние температуры $T_{\text{г}}^*$ на удельные параметры двигателя:

$$\delta P_{\text{уд}i} = \frac{\delta P_{\text{уд}}}{\delta T_{\text{г}}^*} \delta T_{\text{г}}^* \quad \text{и} \quad \delta C_{\text{уд}i} = \frac{\delta C_{\text{уд}}}{\delta T_{\text{г}}^*} \delta T_{\text{г}}^*.$$

Следует также помнить, что величину $\pi_{\text{кП}}^*$ нужно принимать равной её оптимальному значению $\pi_{\text{кП}opt}^*$, которое всегда необходимо подбирать из условия оптимального распределения энергии между контурами ТРДД.

4. На втором этапе формирования математической модели прототипа с помощью АСТРА-ПР по существу проверяются и уточняются расчеты, выполненные на первом этапе методом малых отклонений. Из намеченных в результате анализа вариантов расчета прототипа выбираются два наиболее обоснованных варианта и выполняется их расчет с помощью подсистемы АСТРА-ПР.

Вычисляются невязки δP и $\delta C_{уд}$ и делается вывод об окончательно выбранном варианте расчета прототипа. Рассчитанные и приведенные в таблице варианты должны быть проанализированы и обоснованы.

Данными двух промежуточных вариантов заполните столбцы 4 и 5 (Приближение 1 и 2) документа «Приложение 3». Данными окончательного варианта заполните столбец 6 (окончательный расчет).

Расчет необходимо повторять необходимое количество раз, каждый раз **создавая новые версии!** Каждую версию требуется отправить в архив [Утвердить], указывая в примечаниях версий документа, в чем заключается особенность данного расчета, чем он отличается от остальных.

5. После выполнения разделов 1,2,3 и 4 состоится *промежуточная защита курсовой работы* (ориентировочно 15 октября), но не позднее третьей недели октября (защита после указанного срока может служить основанием для снижения оценки по курсовой работе).

Ключевые вопросы промежуточной защиты: методика проектного термогазодинамического расчета (включая знание всех необходимых формул); термогазодинамический анализ влияния КПД узлов и коэффициентов потерь на параметры рабочего тела (p_i^* , T_i^*) во всех сечениях двигателя, а также на π_t^* , π_c , работы узлов, скорости истечения, на удельные параметры ($P_{уд}$ и $C_{уд}$) и основные данные (P и G_T) двигателя; формирование математической модели двигателя-прототипа (суть и особенности). Более полно перечень вопросов приведен в Приложении данных методических указаний.

На защиту требуется принести распечатанные документы «Приложение 1», «Приложение 2» и «Приложение 3», а в случае необходимости и другие разделы курсовой работы.

Данный раздел в среде SmartTeam включает в себя три документа:

- документ MS Word «Создание м/м методом малых отклонений»;
- математическая модель в подсистеме АСТРА-ПР «Математическая модель прототипа»;
- документ MS Excel «Результаты расчета в АСТРА-ПР».

Кроме того, на этом этапе работы продолжается заполнение данными документа MS Word «Приложение 3. Сводная таблица результатов».

5. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ И ПРОЕКТНЫЙ ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ МОДИФИЦИРОВАННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Данный раздел в среде SmarTeam включает в себя два документа:

- документ MS Word «Закономерности изменения параметров данного двигателя. Анализ расчетов»;
- математическая модель в подсистеме АСТРА-ПР «Математическая модель модифицированного двигателя».

Кроме того, на этом этапе работы будет продолжено заполнение данными документа MS Word «Приложение 3. Сводная таблица результатов».

Работу над данным разделом курсовой работы необходимо вести следующим образом.

1. Формируем документ «Закономерности изменения параметров данного двигателя. Анализ расчетов».

Для этого исследуется влияние параметров рабочего процесса (T_r^* , $\pi_{\kappa\Sigma}^*$, m , $\pi_{в||}^*$ и T_{ϕ}^*) при изменении их в широких пределах. («Основные закономерности изменения удельных параметров ТРД(Д)Ф» необходимо выполнять для форсажного режима работы двигателя.)

Полученные результаты сводятся в таблицу, представляются в графическом виде и подробно анализируются, при анализе результатов расчета целесообразно использовать материал, изложенный в гл. 5, 6, 7 и 9 учебника [1]. Необходимо кратко описать закономерности влияния указанных параметров рабочего процесса на удельную тягу и удельный расход топлива. При этом следует особо отметить основные закономерности изменения $P_{уд}$ и $C_{уд}$, соответствующие современным параметрам рабочего процесса, и характер их изменения в полном диапазоне.

Излагаются основные пути повышения тяги и снижения удельного расхода топлива двигателя новой модификации (см. также разд. 30.1 [3]).

2. Исследования необходимо проводить в диалоговом режиме с помощью подсистемы АСТРА-ПР на основании проектного расчета двигателя-прототипа, для чего необходимо перенести математическую модель с предыдущего этапа (из раздела 4). Средствами операционной системы создайте в своей рабочей папке копию файла «prototype.vrd» и переименуйте её в «mod_engine.vrd».

На основании проведенных ранее исследований и анализа результатов, с учетом развития авиационных двигателей (разд. 16.5, гл. 16) [3] и лучших мировых образцов, выбираются несколько комбинаций (вариантов) T_r^* , $\pi_{\kappa\Sigma}^*$, m , $\pi_{в||}^*$ и T_{ϕ}^* , при которых обеспечивается (при $G_{I \text{ прототипа}} = \text{const}$) прежде всего удельный расход топлива.

Если при этом не удалось получить заданную тягу, необходимо изменить расход воздуха через внутренний контур, рассчитывая новое его значение следующим образом:

$$G_I = (P_{\text{заданное}} / P_{\text{полученное в расчете}}) \cdot G_{I \text{ прототипа}}.$$

Следует иметь в виду, что G_I можно изменить (сохраняя газогенератор) только за счет увеличения $\pi_{\kappa\text{НД}}^*$ (за счет увеличения числа подпорных ступеней) или увеличения $\pi_{\kappa\text{ВД}}^*$ в схеме двигателя без подпорных ступеней за счет постановки дополнительных ступеней на входе в КВД.

Расчет необходимо повторять необходимое количество раз, каждый раз **создавая новые версии!** Каждую версию требуется отправить в архив [Утвердить], указывая в примечаниях версий документа, в чем заключается особенность данного расчета, чем он отличается от остальных.

Результаты проектного расчета, выполненного с помощью подсистемы АСТРА-ПР, заносятся в документ «Приложение 3». Далее выполняется сравнительный анализ результатов расчета модифицированного двигателя и двигателя-прототипа.

По результатам анализа делается вывод о том, какие изменения нужно внести в двигатель-прототип, чтобы обеспечить получение основных данных модифицированного двигателя, и в какой степени удалось выполнить

требование задания по сохранению неизменным возможно бóльшего числа деталей и узлов. Расчет выполняется в САУ на максимальном (в случае ТРД(Д)Ф на полном форсированном) режиме при $H = 0$, $M_{II} = 0$.

В результате выполнения данного раздела должны быть заполнены столбцы 7 («1 приближение») 8 («2 приближение») и 9 («Окончательный») документа «Приложение 3». По завершении этапа отправьте все созданные документы в архив (ЖЦ → «Утвердить»).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении необходимо:

- 1) охарактеризовать двигатель-прототип:
 - к какому поколению принадлежит;
 - его место среди других двигателей этого типа;
 - какие параметры рабочего процесса не опубликованы и как их удалось определить;
- 2) перечислить, как обеспечивается на модернизированном двигателе:
 - повышение тяги;
 - понижение удельного расхода топлива;
 - условие сохранения неизменным возможно большего числа узлов (перечислить эти узлы);
 - необходимые изменения узлов (добавляется ступень, изменяется диаметр, изменяется площадь характерного сечения и т. д.).

7. ФОРМИРОВАНИЕ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

На этом этапе необходимо сформировать документ MS Word «Пояснительная записка», используя предыдущие сформированные разделы; после завершения работы над пояснительной запиской её необходимо отправить в архив (ЖЦ → «Утвердить»).

В случае, если после завершения проверки пояснительной записки преподавателем были сделаны замечания, их необходимо исправить, описывая все исправления в документе «Исправление замечаний» в дереве проектов, а документ снова отправить на проверку.

Заключительная защита проводится ориентировочно 15 ноября, но не позднее третьей недели ноября; точную дату заключительной защиты необходимо уточнить у преподавателя. Защита после указанного срока может служить основанием для снижения оценки по курсовой работе.

Заключительная защита включает, помимо всех вопросов промежуточной защиты, анализ влияния параметров рабочего процесса ($T_{г}^*$, $\pi_{к\Sigma}^*$, $\pi_{кП}^*$, m) на параметры рабочего тела (p_1^* , T_1^*) во всех сечениях двигателя, а также на π_t^* , π_c , работы узлов, скорости истечения, на удельные параметры ($P_{уд}$ и $C_{уд}$) и основные данные (P и G_T) двигателя (см. Приложение данных методических указаний).

На защиту требуется принести распечатанные документы «Приложение 1», «Приложение 2» и «Приложение 3». Рекомендуется выполнять распечатку выполненных расчетов и анализа.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Контрольные сроки

- 15.09 – выдача задания;
- 15.10 – предзащита (до контрольной работы по гл. 7 [1]);
- 15.11 – защита.

Вопросы на предзащите

1. **К разд. 2 пояснительной записки:** Как определены основные технические данные и параметры рабочего процесса двигателя-прототипа, необходимые для проектного расчета (источники)?
2. **К разд. 3 пояснительной записки:** Предварительная математическая модель: методика и принятые КПД и коэффициенты потерь. Формулы. Связи параметров в проектном расчете (например, от чего зависит степень понижения давления в турбине и как она определяется). Термогазодинамический анализ.
3. **К разд. 4 пояснительной записки:** Что было сделано при формировании математической модели двигателя-прототипа? За счет чего были обеспечены $\delta P < 1\%$ и $\delta C_{уд} < 1\%$? Опишите первый этап. Что показал второй этап? Студент демонстрирует практику применения термогазодинамического анализа.

Вопросы на защите

1. Все указанные вопросы на предзащите.
2. **К разд. 5 и 6 пояснительной записки:** Основные закономерности изменения удельных параметров проектируемого двигателя: Каким образом и почему были изменены параметры?
3. **Заклучение по работе**
 - 3.1. По двигателю-прототипу:

- к какому поколению принадлежит (его место среди других двигателей этого типа);
 - какие параметры не опубликованы и как удалось их определить.
- 3.2. Перечислить, как обеспечивается на модернизированном двигателе:
- повышение тяги;
 - понижение удельного расхода топлива;
 - условие сохранения неизменным возможно большего числа узлов (перечислить эти узлы), как это обеспечивалось на двигателях П.А. Соловьева;
 - необходимые изменения узлов (добавляется ступень, изменяется диаметр, изменяется площадь характерного сечения и т.д.).

ГЛОССАРИЙ

1. **Алгоритм** – ряд последовательных действий, необходимых для решения задачи.
2. **Вентилятор** – компрессор, работающий в наружном контуре.
3. **Вес удельный** – отношение веса (силы тяжести) двигателя к его тяге.
4. **Винтовентилятор** – высоконапорный винт, специально спрофилированный для эффективной работы при больших дозвуковых скоростях полета.
5. **Входное устройство** – агрегат, который служит для частичного преобразования кинетической энергии воздушного потока, поступающего в двигатель при движении летательного аппарата, в потенциальную энергию сжатого воздуха и для подвода его к компрессору.
6. **Газогенератор** – совокупность компрессора высокого давления, камеры сгорания и турбины высокого давления.
7. **Данные основные (двигателя)** – совокупность основных параметров двигателя (тяга ТРД(Ф) и ТРДД(Ф), эффективная, эквивалентная мощность на валу ТВАД и ТВ(В)Д, расход топлива, масса двигателя, габаритные размеры, ресурс, стоимость).
8. **Двигатель реактивный** – двигатель внутреннего сгорания, в котором химическая энергия топлива преобразуется в кинетическую энергию газовой струи, вытекающей из двигателя, а сила реакции непосредственно используется как движущая сила – сила тяги.
9. **Двигатель турбовальный** – тепловая машина, в которой большая часть полезной тепловой энергии преобразуется в турбине в механическую работу и отводится на привод потребителя.
10. **Двигатель турбовинтовентиляторный** – тепловая машина, в которой большая часть полезной тепловой энергии преобразуется в турбине в механическую работу и отводится на привод высоконапорного винта, специально спрофилированного для эффективной работы при больших дозвуковых скоростях полета (винтовентилятора).
11. **Двигатель турбовинтовой** – тепловая машина, в которой большая часть полезной тепловой энергии преобразуется в турбине в механическую работу и отводится на привод самолетного винта.
12. **Движитель** – двигатель как объект, предназначенный для преобразования механической работы в полезную работу передвижения.
13. **Изэнтропический, изэнтропный** – идеальный (происходящий при постоянной энтропии).
14. **Камера сгорания** – агрегат, который служит для преобразования химической энергии топлива в тепловую и подвода ее к рабочему телу (то есть для повышения его температуры).
15. **Компрессор** – агрегат, предназначенный для непрерывного сжатия поступающего рабочего тела до расчетного уровня степени повышения давления.
16. **Коэффициент восстановления полного давления агрегата** – отношение полного давления в сечении на выходе из агрегата к полному давлению в сечении перед агрегатом.
17. **Коэффициент избытка воздуха** – отношение расхода воздуха, действительно проходящего через камеру сгорания, к расходу, теоретически необходимому для полного сгорания подаваемого топлива.
18. **Коэффициент полноты сгорания (выделения тепла)** – отношение количества тепла, подведенного к воздушному потоку в камере сгорания, к располагаемой (химической) энергии внесенного в двигатель топлива.
19. **Коэффициент потерь** – параметр, характеризующий потери скорости (φ_c), полного давления ($\sigma_{вх}, \sigma_{кв}$) и др.
20. **Коэффициент скорости** – отношение скорости потока к критической скорости.
21. **Коэффициент скорости сопла** – отношение осевой составляющей действительной скорости истечения к идеальной (изэнтропической) скорости при одинаковых в обоих случаях степенях понижения давления и одинаковых полных температурах газового потока.
22. **Коэффициент топлива стехиометрический** – количество воздуха, теоретически необходимое для полного сгорания 1 кг топлива.

23. **Коэффициент тяги сопла** – отношение тяги сопла к его идеальной тяге при одинаковом (действительном) в обоих случаях расходе газа через сопло.
24. **Критерий эффективности двигателя** – признак, на основании которого производится оценка эффективности двигателя (общий КПД, удельный расход топлива и т.д.).
25. **Масса удельная** – отношение массы двигателя к его тяге (мощности).
26. **Машина тепловая** – двигатель как объект, преобразующий тепловую энергию в механическую.
27. **Метод последовательных приближений** – метод вычисления, при котором одна и та же последовательность действий выполняется многократно, а параметры, полученные на каждом приближении, используются как исходные для последующего.
28. **Модель двигателя математическая** – совокупность уравнений, условий и ограничений, принятых для описания физических процессов в двигателе, из которых одна часть отражает условия совместной работы основных узлов и элементов, а другая представляет собой описание их свойств и характеристик.
29. **Модель математическая** – совокупность расчетных формул, вычислительных алгоритмов, табличных, графических результатов. Математические модели являются информационным аналогом изделия и решают задачи анализа.
30. **Мощность эквивалентная** – мощность, которая, будучи подведенной к винту, позволяет развить тягу, равную суммарной тяге винта и собственно двигателя.
31. **Отбор воздуха на охлаждение турбины относительный** – отношение расхода охлаждающего воздуха, который отбирается между сечениями К и Г, к расходу воздуха через внутренний контур двигателя.
32. **Параметр оптимальный** – наиболее благоприятный по выбранным критериям параметр.
33. **Параметры заторможенного потока** – параметры потока, соответствующие случаю, когда скорость течения уменьшается до нуля при отсутствии энергетического обмена с окружающей средой (энтальпия, температура и давление при этом достигают максимального возможного значения).
34. **Параметры потока полные** – см. параметры заторможенного потока.
35. **Параметры рабочего процесса** – температура газа перед турбиной и степень повышения давления в компрессоре.
36. **Показатель изэнтропии (рабочего тела)** – отношение теплоемкостей газа при постоянном давлении и объеме $k = c_p / c_v$, существенно зависит от температуры и состава смеси (ориентировочно равен 1,4 для воздуха, 1,33 для затурбинного газа).
37. **Постоянная удельная газовая** – универсальная газовая постоянная, отнесенная к 1 кг данного вещества.
38. **Постоянная универсальная газовая** – постоянная $\tilde{R}$ в уравнении состояния для моля идеального газа $p\tilde{v} = \tilde{R}T$.
39. **Прототип** – двигатель, выбранный в качестве базового при проектировании.
40. **Размерность (двигателя, компрессора)** – определяется главным образом диаметрными размерами.
41. **Расход топлива относительный** – отношение расхода топлива к расходу воздуха, проходящего через камеру сгорания.
42. **Расход топлива удельный** – параметр, который показывает, сколько топлива нужно затратить для получения 1 Н тяги (1 Вт мощности) в течение 1 ч.
43. **Режим расчетный** – проектный расчет, принятый за исходный для проектирования узлов и двигателя в целом.
44. **Режим течения критический** – режим, когда скорость потока равна скорости звука в потоке.
45. **Решение компромиссное** – решение, в равной степени удовлетворяющее совокупности условий.
46. **Свойства теплофизические (рабочего тела)** – показатель изэнтропии, теплоемкость, газовая постоянная и т.д.
47. **Скорость критическая** – скорость звука для критического режима.
48. **Скорость приведенная** – см. коэффициент скорости.
49. **Сопло** – агрегат, который служит для преобразования тепловой и потенциальной энергии рабочего тела в кинетическую энергию струи, вытекающей из двигателя.
50. **Степень двухконтурности** – отношение расхода воздуха, проходящего через наружный контур, к расходу воздуха, проходящего через внутренний контур.
51. **Тело рабочее** – воздушно-газовый поток, проходящий через двигатель.
52. **Температура критическая** – значение температуры в потоке, соответствующее критическому режиму.
53. **Теплоемкость (рабочего тела)** – количество теплоты, которое необходимо передать рабочему телу для увеличения его температуры на один градус.

54. **Теплота сгорания топлива** – количество теплоты, которое выделяется при сгорании единицы массы топлива.
55. **Теплота сгорания топлива массовая низшая удельная** – количество тепла, которое выделяется в калориметре при полном сгорании 1 кг топлива и последующем охлаждении продуктов сгорания до начальной температуры топлива и воздуха 293 К без учета тепла конденсации содержащихся в них паров воды.
56. **Турбина** – агрегат, предназначенный для выработки мощности, необходимой для привода компрессора.
57. **Тяга (внутренняя тяга)** – равнодействующая сил избыточного (над атмосферным) давления и сил трения, приложенных к внутренним поверхностям двигателя и к жидкому контуру на входе, разделяющему потоки рабочего тела, проходящего через двигатель и обтекающего его.
58. **Тяга движителя (двигателя) эффективная** – равнодействующая всех сил, приложенных к его внутренним и наружным поверхностям. Эффективная тяга меньше внутренней на величину внешнего сопротивления.
59. **Тяга лобовая** – отношение тяги двигателя к площади миделевого (максимального) сечения.
60. **Тяга сопла** – условная сумма действительного динамического импульса в выходном сечении сопла и статической составляющей тяги.
61. **Тяга сопла идеальная** – условный динамический импульс в его выходном сечении, соответствующий изэнтропическому полному расширению потока при заданной располагаемой степени понижения давления.
62. **Тяга удельная** – отношение тяги к расходу воздуха.
63. **Тяга удельная объемная** – отношение тяги двигателя к его объему.
64. **Число Маха** – отношение скорости потока к скорости звука в потоке.
65. **Энтальпия (теплосодержание)** – функция состояния термодинамической системы, равная сумме внутренней энергии и произведения объема на давление; численно равна произведению теплоемкости при изобарном процессе на температуру.
66. **Энтропия** – функция состояния термодинамической системы, определяемая тем, что ее дифференциал (dS) при элементарном равновесном (обратимом) процессе равен отношению бесконечно малого количества теплоты (dQ), сообщенной системе, к термодинамической температуре (T) системы $dS = \frac{dQ}{T}$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кулагин, В.В. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: учебник: в 3 кн. / В.В. Кулагин. – М.: Машиностроение, 2003. Кн. 1: Основы теории ГТД. Рабочий процесс и термогазодинамический анализ. Кн. 2: Совместная работа узлов выполненного двигателя и его характеристики.
2. Кулагин, В.В. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: электронный учебник / В.В. Кулагин. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. Кн. 1: Основы теории ГТД. Рабочий процесс и термогазодинамический анализ.
3. Кулагин, В.В. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: учебник: в 3 кн. / В.В. Кулагин, В.С. Кузьмичев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2005. Кн. 3: Основные проблемы: начальный уровень проектирования, газодинамическая доводка, специальные характеристики и конверсия авиационных ГТД.
4. Кулагин, В.В. Формирование математической модели двигателя–прототипа и проектный расчет ГТД с использованием автоматизированной системы термогазодинамического расчета и анализа (АСТРА-ПР): электрон. учеб. пособие / В.В. Кулагин, В.С. Кузьмичев [и др.]. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006.

Учебное издание

*Кулагин Виктор Владимирович
Кузьмичев Венедикт Степанович
Крупенич Илья Николаевич
Ткаченко Андрей Юрьевич*

**ФОРМИРОВАНИЕ
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДВИГАТЕЛЯ-ПРОТОТИПА
И ПРОЕКТНЫЙ РАСЧЕТ ГТД
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОДСИСТЕМЫ АСТРА-ПР
В PDM СИСТЕМЕ SMARTTEAM**

Методические указания

Технический редактор А. М. Цыганов
Редакторская обработка Ю. Н. Литвинова
Корректорская обработка Ю. Н. Литвинова
Доверстка Т. Е. Половнева

Подписано в печать 28.12.07. Формат 60х84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. 3,0.

Тираж 120 экз. Заказ _____. ИП - 52/2006

Самарский государственный
аэрокосмический университет.
443086 Самара, Московское шоссе, 34

Изд-во Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34