

**ВАРИАНТНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ
ТУРБОКОМПРЕССОРА ГТД
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АСТРА-ТК
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»

ВАРИАНТНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТУРБОКОМПРЕССОРА ГТД
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АСТРА-ТК
В PDM СИСТЕМЕ SMARTTEAM

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

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,
В.Н. Матвеев, А.Ю.Ткаченко,*

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

Вариантное проектирование проточной части турбокомпрессора ГТД с использованием АСТРА-ТК в PDM системе SmarTeam:
метод. указания/ В.В. Кулагин, В.С. Кузьмичев, И.Н. Крупенич [и др.]. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 40 с.: ил.

Изложена методика выполнения курсовой работы «Вариантное проектирование проточной части турбокомпрессора ГТД с использованием подсистемы АСТРА-ТК» 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.

ББК 39.55

УДК 621.431.75

© Самарский государственный

аэрокосмический университет, 2007

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ СОКРАЩЕНИЙ	4
ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	5
ОПИСАНИЕ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ В СРЕДЕ SMARTTEAM	6
ПОДГОТОВКА СИСТЕМЫ К РАБОТЕ	8
ФОРМИРОВАНИЕ РАЗДЕЛОВ КУРСОВОЙ РАБОТЫ	12
ВВЕДЕНИЕ	12
1. ОПИСАНИЕ ТУРБОКОМПРЕССОРА ДВИГАТЕЛЯ-ПРОТОТИПА	17
2. МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТУРБОКОМПРЕССОРА ...	18
3. ВАРИАНТНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТУРБОКОМПРЕССОРА ГТД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АСТРА-ТК	21
4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	22
5. ФОРМИРОВАНИЕ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ	23
ГЛОССАРИЙ	24
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	27

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
ПЧ	– проточная часть
САУ	– стандартные атмосферные условия
СККП	– сквозное курсовое компьютерное проектирование
ТВ(В)Д	– турбовинтовой (турбовинтовентиляторный) двигатель
ТВаД	– турбовальный двигатель
ТГДР	– термогазодинамический расчет
ТК	– турбокомпрессор
ТРД	– турбореактивный двигатель
ТРД(Д)Ф	– двухконтурный турбореактивный двигатель с форсажом
ТРДД	– двухконтурный турбореактивный двигатель

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Курсовая работа является продолжением работы «Формирование математической модели двигателя-прототипа и проектный расчет ГТД с использованием автоматизированной системы термогазодинамического расчета и анализа (АСТРА-ПР)», а результаты указанных двух работ являются исходными данными для детального проектирования лопаточных машин.

В курсовой работе согласно заданию студент рассчитывает величины основных конструктивно-геометрических параметров турбокомпрессора и строит предварительный эскиз меридионального профиля его проточной части. Исходными данными для определения основных размеров проточной части турбокомпрессора ГТД являются результаты проектного расчета двигателя на максимальном режиме в САУ при $H=0$, $M_{п}=0$. К ним относятся полные значения температуры и давления рабочего тела во всех характерных сечениях проточной части двигателя; расход рабочего тела через эти сечения; работы каскадов компрессора и турбины, КПД турбин.

Для успешного освоения задачи проектирования проточной части турбокомпрессора ее целесообразно решать в процессе курсового проектирования в два этапа. На первом этапе необходимо спроектировать один вариант турбокомпрессора без использования ЭВМ. Для этого нужно составить алгоритм расчета (на основании гл. 17 учебника [6] и учебного пособия [3]), согласовать его с преподавателем, рассчитать основные диаметральные размеры и число ступеней компрессора и турбины, построить эскиз проточной части. На втором этапе по тем же исходным данным проводится проектирование двух вариантов турбокомпрессора с использованием подсистемы АСТРА-ТК. Целесообразно повторить и расчет первого варианта. Затем следует проанализировать полученные варианты, в случае необходимости можно изменить конструктивную схему двигателя, перераспределить работу сжатия между каскадами компрессора из условия обеспечения оптимальной нагруженности каскадов турбин, что может потребовать уточнения проектного расчета и расчета характеристик двигателя; выбрать наиболее рациональный вариант из условия обеспечения высоких КПД узлов, минимальных габаритов и массы. Параметры выбранного варианта проточной части являются исходными данными для проектирования узлов турбокомпрессора.

Курсовая работа состоит из введения, трех основных разделов и заключения. В среде SmarTeam студенту предлагается готовая структура, состоящая из документов, сгруппированных в те же три раздела, а также во введение, заключение и приложение.

Процесс выполнения курсовой работы в PDM-системе 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 и качества выполнения курсовой работы);
- **студента** (выполняет курсовую работу).

В данном руководстве будет подробно 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

На рисунке 1 представлено сформированное дерево проектов, из которого можно видеть, что структура курсовой работы в среде SmarTeam полностью соответствует структуре, принятой в [3].

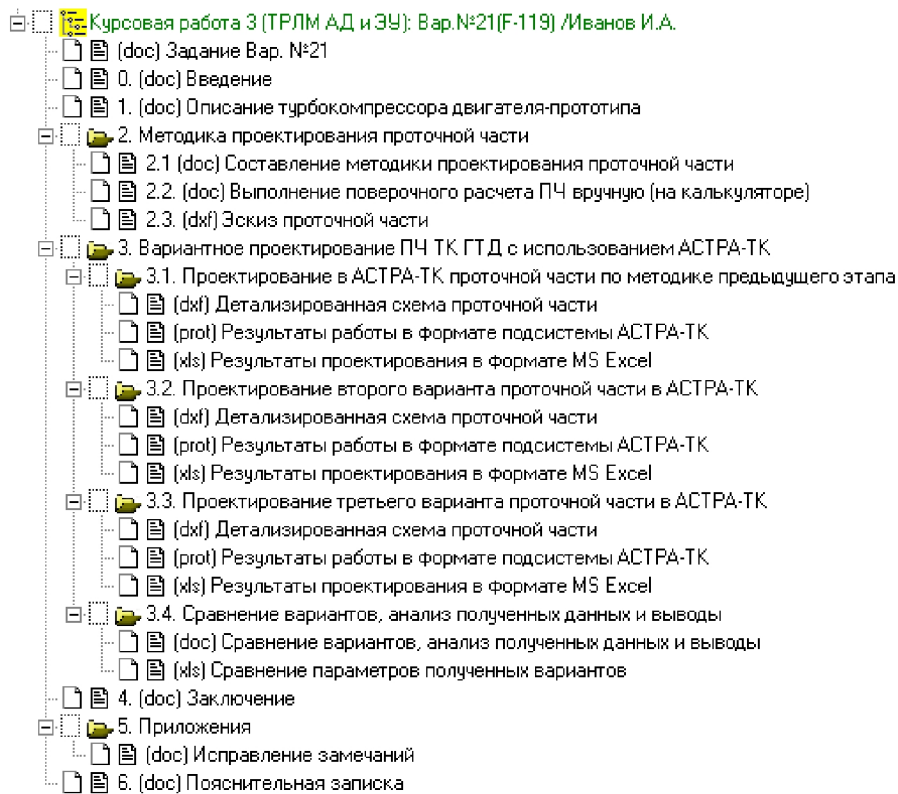


Рис. 1 – Структура курсовой работы, реализованная в среде SmarTeam.

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

[doc] – документ MS Word;

[prot] – результаты работы в формате подсистемы АСТРА-ТК;

[dxf] – детализированная проточная часть в формате DXF;

[xls] – документ MS Excel.

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

Для удобства документы группируются в разделы, для нашего случая группирующие разделы и их наименования соответствуют разделам курсовой работы, как они представлены в [3].

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 преподавателем (на проверку), так и студентом (на доработку после проверки).

преподавателем); 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 контрольные точки и защиту:

- **первая контрольная точка** (необходимо защитить перед преподавателем методику проектирования);
- **вторая контрольная точка** (необходимо предоставить преподавателю выполненные варианты)
- **заключительная защита** (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. 2).

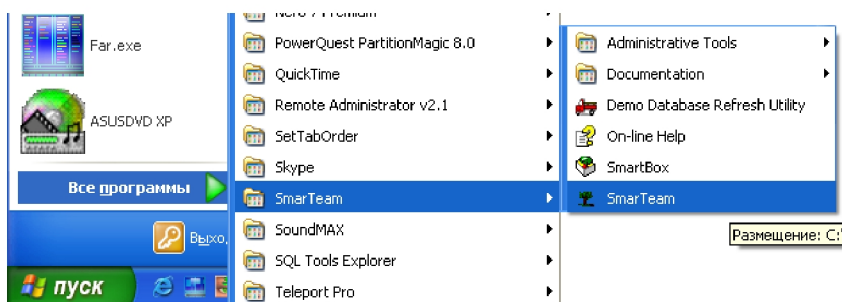


Рис. 2 – Запуск системы SmarTeam

После запуска системы необходимо ввести имя пользователя и пароль, заданные администратором (рис. 3).

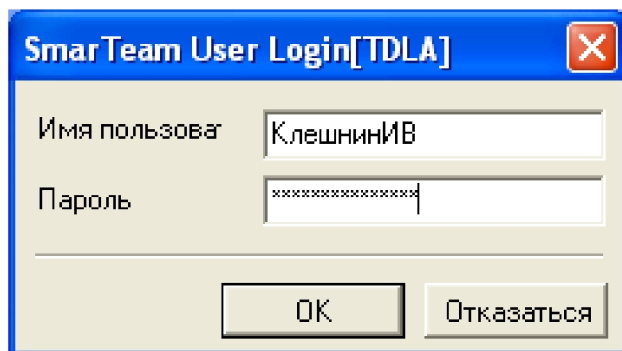


Рис. 3 – Авторизация в SmarTeam

2. Описание системы SmarTeam

Работа с системой начинается с основного экрана системы.

Основной экран системы включает в себя (рис. 4):

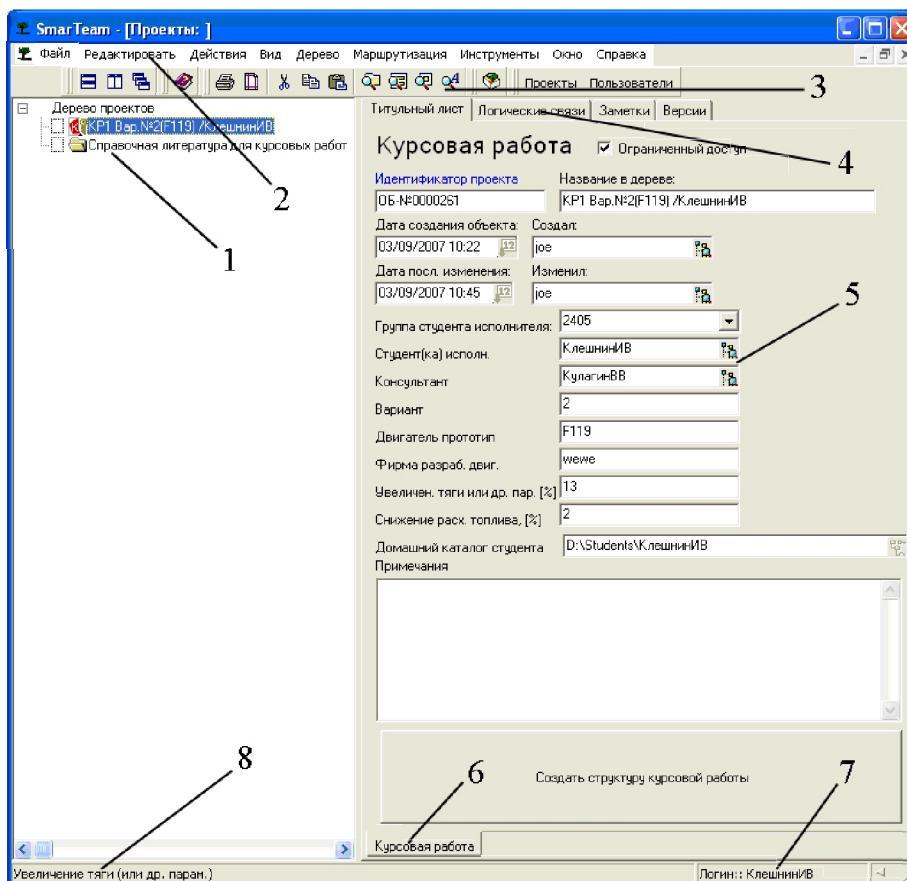


Рис. 4 – Главное окно SmarTeam

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, которые требуется заполнить в ходе выполнения курсовой работы. 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. 4) выберите **объект** «*КР3 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. 5). При возникновении ошибок на этом этапе обратитесь к администратору системы.

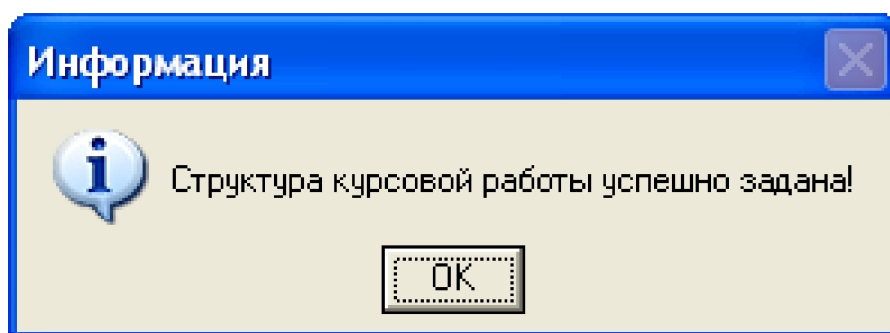


Рис. 5 – Отчет о создании структуры курсовой работы

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. 6).

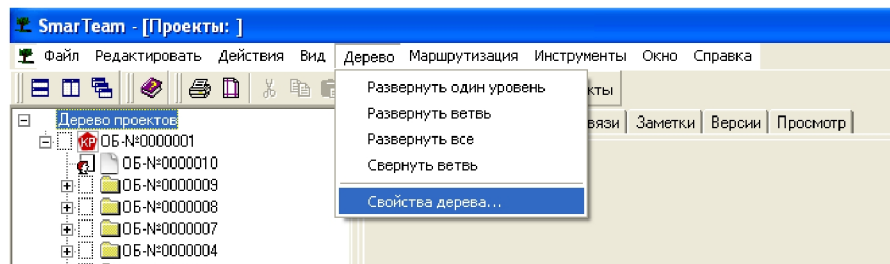


Рис. 6 – Исправление вида дерева

2. На закладке «Сортировка» в поле «Сортировать» установите «По классам, обозначению», а в поле «Направление» выберите «По возрастанию» (рис. 7).

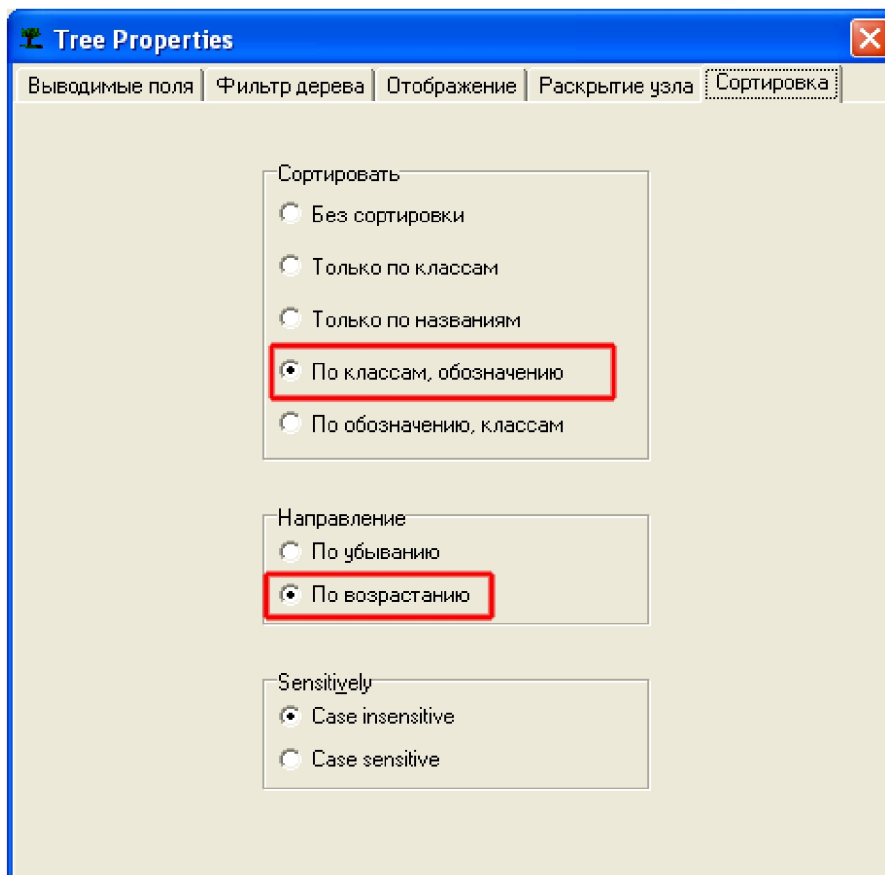


Рис. 7 – Исправление вида дерева

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

1. Выбор объекта

В открывшемся дереве проектов необходимо двойным щелчком мыши открыть **раздел** «0. Введение» и однократным щелчком мыши выбрать входящий в его состав **объект** «(doc) Введение» (рис. 8).

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. 9). В дальнейшем, двойной щелчок ЛКМ по объекту будет вызывать этот созданный файл для редактирования.

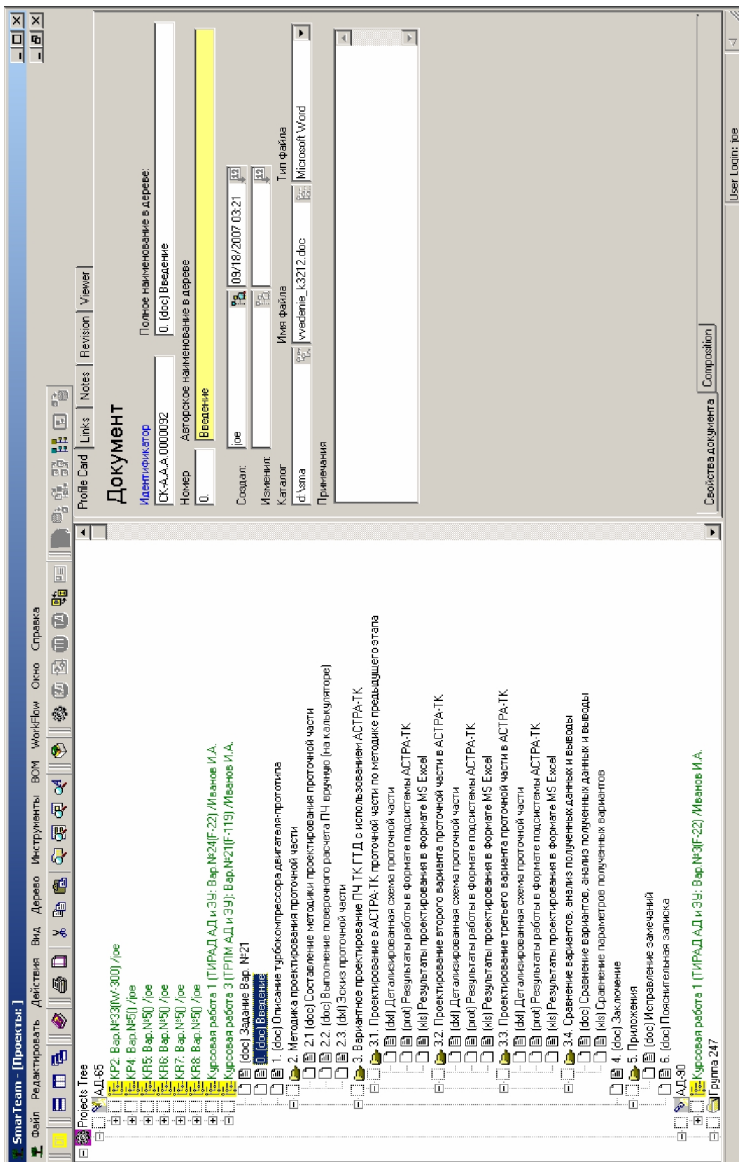


Рис. 8 – Выбор объекта

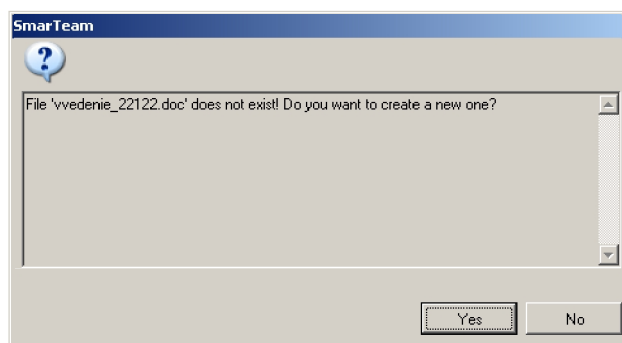


Рис. 9 – Подтверждение создания объекта

3. Формирование документа «Введение»

Далее следует заполнить этот пустой документ данными (рис. 10).

Раздел «Введение» является важной частью курсовой работы. После знакомства с введением читатель принимает окончательное решение о прочтении всего труда. Для студентов эта часть является самой трудной, хотя и не превосходит одной-двух страниц.

Введение – это обоснование и доказательство важности рассматриваемой темы, а также краткое описание сути проблемы или задачи. Введение необходимо использовать для того, чтобы читатель стал понимать важность данной задачи, при этом каждое утверждение должно быть доказано и подтверждено ссылкой на литературу, что подтверждает достоверность сказанного.

Круг вопросов, освещаемых в курсовой работе, виден в ее названии, поэтому повторять текст названия работы во введении нецелесообразно.

Во введении можно изобразить схему двигателя, привести его основные данные, указать прототип, а также тип летательного аппарата (диапазон летных условий).

Заканчивается введение чётко сформулированной целью и перечислением задач, которые нужно решить, чтобы ее достичь. В большинстве случаев цель работы четко следует из ее названия.

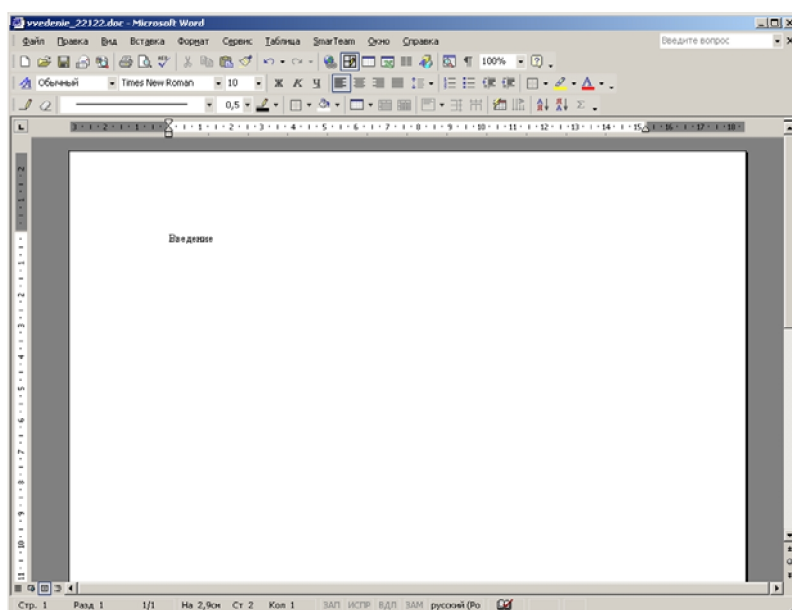


Рис. 10 – Открытый в программе MS Word шаблон документа

4. Сохранение документа

После внесения необходимой информации (или изменений в дальнейшей работе) необходимо сохранить изменения, нажав «сохранить» в программе с которой вы работаете. Документ автоматически сохраняется в вашей рабочей папке в системе SmarTeam.

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 можете вносить в него изменения, только создавая новые версии документа.

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. 11);
- 4) в выпадающем меню выбрать «Утвердить (сдать в архив)»;

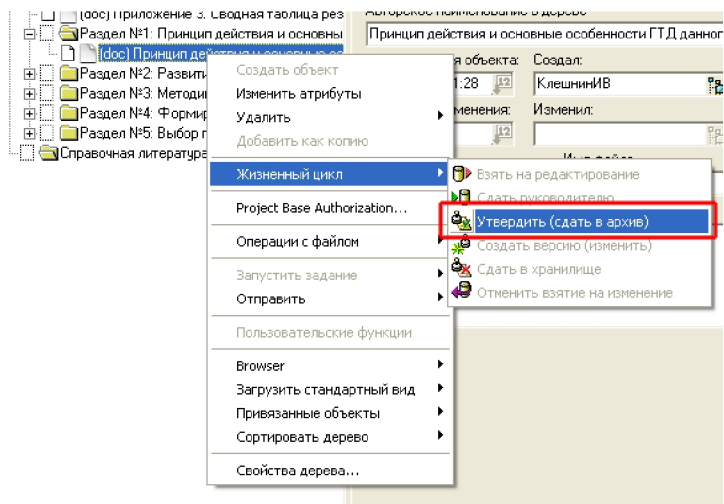


Рис. 11 – Отправка документа в архив

5) в открывшемся окне (рис. 12) нажать «ОК».

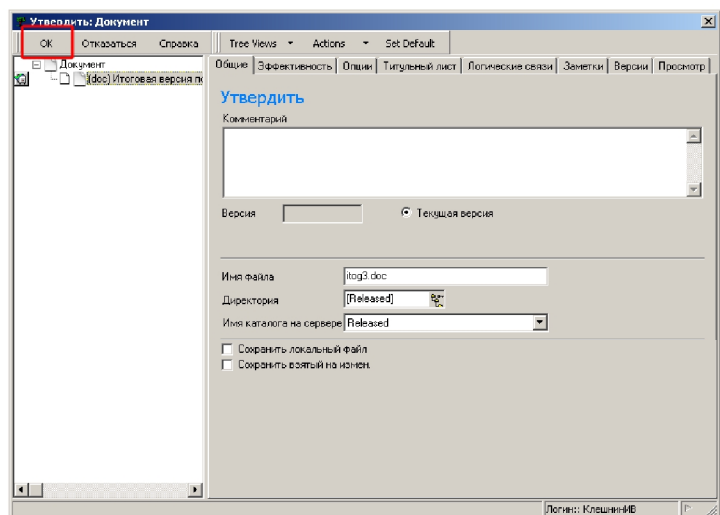


Рис. 12 – Подтверждение отправки документа в архив

6. Просмотр замечаний преподавателя по созданному документу

Преподаватель вносит свои замечания в атрибут «примечания» каждого документа (рис. 13). 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. 13) закладку «Просмотр» и войдя в режим «MarkUp».

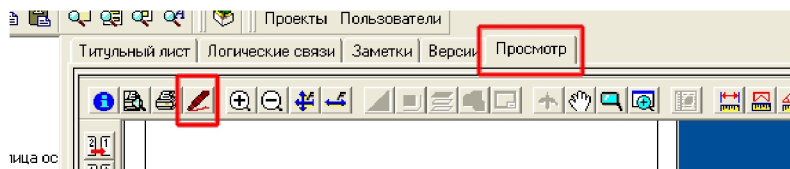


Рис. 13 – Включение режима просмотра замечаний

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 **и перечислив их** в документе «Исправление замечаний» (который располагается в разделе 5 дерева проектов), в главном меню объекта выберите закладку «Версии». Там выберите последнюю созданную версию, и вновь отправьте ее в электронный архив.

1. ОПИСАНИЕ ТУРБОКОМПРЕССОРА ДВИГАТЕЛЯ-ПРОТОТИПА

Данный раздел курсовой работы включает в себя один документ MS Word: «Описание турбокомпрессора двигателя-прототипа».

В этом разделе излагается подробное описание турбокомпрессора двигателя прототипа. Целесообразно указать, какие лопаточные машины входят в состав турбокомпрессора, а также их тип, форму проточной части и число ступеней, достоинства и недостатки, особенности их использования для двигателя указанного типа и схемы. Кроме этого, необходимо привести основные параметры и геометрические соотношения, определяющие облик турбокомпрессора двигателя-прототипа, его габаритные размеры.

После завершения формирования документа, его необходимо отправить в архив (ЖЦ → «Утвердить»). Редактирование документов осуществляется путем вызова их из архива и создания новых версий (ЖЦ → «Создать версию»).

2. МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТУРБОКОМПРЕССОРА

Данный раздел курсовой работы в системе SmarTeam включает в себя следующие документы:

- «Составление методики проектирования проточной части» (MS Word);
- «Выполнение поверочного расчета ПЧ «вручную» (на калькуляторе)» (MS Word);
- «Эскиз проточной части» (Схема в формате DXF).

В первом документе излагается методика проектирования проточной части турбокомпрессора. Основной для составления методики является учебное пособие [3] и учебник [6]. В методике описывается последовательность расчета, метод выбора недостающих данных и т.п. Данная методика должна быть согласована с преподавателем на контрольной точке.

Универсальной можно считать методику расчета проточной части газогенератора, поскольку, изменяя число ступеней турбины, тип компрессора, запас прочности рабочих лопаток турбины, а также форму проточной части компрессора и турбины, можно получить различные варианты турбокомпрессора.

Поэтому эту методику целесообразно использовать не только для расчета проточной части газогенераторов, но и для расчета турбокомпрессоров СД трехвальных ТРДД(Ф) и ТВВД, турбокомпрессоров НД двухвальных ТРД(Ф) и трехвальных (с двухкаскадным компрессором) ТВаД, а также турбокомпрессоров одновальных ТРД(Ф).

1. Универсальная методика расчета проточной части

В первом приближении целесообразно принять форму проточной части турбины и компрессора с постоянным средним диаметром.

Расчет целесообразно начинать с параметров турбины, поскольку её прочностью чаще всего определяется предельная частота вращения ротора газогенератора.

Задаемся величиной параметра нагруженности турбины на уровне рекомендованных значений, при выборе числа ступеней целесообразно оценить окружную скорость, полагая турбину одноступенчатой. Если окружная скорость на среднем диаметре выше рекомендованных значений, то турбину газогенератора следует выполнять двухступенчатой.

Далее определяется частота вращения ротора из условия обеспечения необходимого запаса прочности рабочих лопаток последней ступени турбины (для этого необходимо задаться длительностью работы двигателя на режимах, эквивалентных максимальному, материалом лопаток, коэффициентами запаса, формы и т.д.).

Переходим к расчету компрессора газогенератора. Задаемся (с учетом типа проектируемого компрессора) приведенной окружной скоростью на периферии рабочих лопаток первой ступени и величиной среднего коэффициента напора.

По полученным данным, задаваясь в первом приближении формой проточной части с постоянным средним диаметром, вычисляем геометрические параметры на входе и выходе компрессора и турбины. Оцениваем взаимное расположение узлов и их расположение относительно оси двигателя, делаем вывод о необходимости корректировки параметров.

2. Методика расчета проточной части турбовентилятора

Если же рассматривается турбовентилятор ТРДД, целесообразно воспользоваться следующей методикой.

В первом приближении форму проточной части турбины НД и вентилятора целесообразно также принять с постоянным средним диаметром.

Расчет начинаем с параметров вентилятора. Вентиляторы двухконтурных двигателей с большой степенью двухконтурности выполняются одноступенчатыми, обычно транс- и сверхзвуковыми.

Выбираем тип вентилятора, т. е. окружную скорость на периферии рабочей лопатки первой ступени.

Задаемся относительным диаметром втулки на нижнем уровне рекомендованных значений для обеспечения минимальных лобовых габаритов двигателя и средним коэффициентом напора ступени вентилятора на рекомендованном уровне.

Переходим к расчету турбины турбовентилятора. Главная особенность этой турбины заключается в том, что на двигателях с высокой степенью двухконтурности она всегда многоступенчатая. Это объясняется двумя причинами: увеличением работы, необходимой для вращения вентилятора, и снижением средней окружной скорости турбины из-за уменьшения ее среднего диаметра относительно диаметра вентилятора.

Поскольку частота вращения задается вентилятором, повышение окружной скорости и соответственно уменьшение числа ее ступеней возможно только за счет увеличения ее среднего диаметра. Обычно рассчитывают несколько вариантов проточной части, отличающихся диаметром, при этом можно задаваться либо геометрическими параметрами, либо числом ступеней. При выборе диаметральных размеров турбины вентилятора важно учитывать возможность сокращения переходного канала между турбинами газогенератора и турбовентилятора за счет уменьшения разницы средних диаметров на выходе и входе соответственно, а также стремиться не загромождать канал второго контура турбиной вентилятора.

При таком подходе к проектированию проточной части (начиная от вентилятора) необходимо проверить запас прочности рабочих лопаток турбины.

Затем оцениваем взаимное расположение узлов и их расположение относительно оси двигателя, делаем вывод о необходимости корректировки параметров.

3. Рекомендации по проектированию проточной части двигателей различных типов и схем

Одновальные и двухвальные ТРД(Ф). Обеспечение максимальной лобовой тяги – одно из основных требований, предъявляемых к силовым установкам сверхзвуковых летательных аппаратов, в качестве которых и получили распространение ТРД(Ф). Проточную часть таких двигателей необходимо проектировать из условия обеспечения минимальных диаметральных габаритов.

Для этого в первом приближении целесообразно задаться относительным диаметром втулки $\bar{d}_{вт}$ в сечении на входе в компрессор НД (на нижнем уровне рекомендованных значений) и отношением D_{cp}/h в сечении на выходе из турбины НД (на верхнем уровне рекомендованных значений) и определить диаметральные размеры этих сечений, в том числе периферийный диаметр рабочих лопаток первой ступени компрессора и последней ступени турбины. Один из них определяет лобовые габариты двигателя.

Затем нужно выбрать форму проточной части компрессора и турбины. Интерес представляет проточная часть с наружным диаметром $D_{к.п} = const$ и $D_{т.п} = const$, поскольку в этом случае обеспечивается минимальное число ступеней турбокомпрессора.

Максимально допустимые частоты вращения роторов НД и ВД определяются из условия обеспечения запасов прочности рабочих лопаток последних ступеней соответствующих каскадов турбины. Затем вычисляются соответствующие этим частотам окружные скорости компрессора и турбины.

Предлагаемая методика одинаково справедлива для ТРД и ТРДФ, хотя следует иметь в виду, что диаметральные габариты ТРДФ определяются форсажной камерой. Поэтому для ТРДФ полученные диаметры на входе в компрессор и на выходе из турбины можно увеличить, не выходя за габаритный диаметр форсажной камеры, если это приведет к уменьшению числа ступеней турбокомпрессора.

Таким образом, особенность методики расчета диаметральных размеров проточной части ТРД(Ф) заключается в том, что проектирование идет не от числа ступеней к окружным скоростям и диаметрам, как при универсальном подходе, а, наоборот, от диаметральных размеров проточной части и частоты вращения к окружным скоростям и числу ступеней. Кроме того, в этом случае расчет начинается не с газогенератора, как рекомендовано для ТРДД, а с турбокомпрессора НД, которым определяются диаметральные габариты двигателя.

Трехвальные ТРДД(Ф). Подчеркнем, что наличие турбокомпрессора СД позволяет проектировать турбины ВД и СД одноступенчатыми, а вентилятор без подпорных ступеней. Исходя из этого следует распределять работу между турбинами ВД, СД и НД, обеспечивая оптимальную нагрузку ступеней.

Турбокомпрессор СД занимает промежуточное положение между турбовентилятором и газогенератором, в том числе по диаметральным размерам. Таким образом, расчет диаметральных размеров и числа ступеней турбокомпрессора СД целесообразно выполнять после проектирования проточной части турбокомпрессоров ВД и НД.

Проточную часть турбокомпрессора СД можно проектировать по методике, рекомендованной для проектирования газогенератора.

Двухвальные и трехвальные ТВАД и ТВВД. Газогенератор этих двигателей целесообразно рассчитывать по методике расчета газогенератора, изложенной выше.

Оценка диаметральных размеров проточной части свободной турбины ТВАД имеет свои особенности, которые заключаются в том, что частота вращения ротора этой турбины задана потребителем. Следовательно, требуется определить диаметральные размеры, окружную скорость и число ступеней турбины при заданных значениях работы и частоты вращения. Такой постановке задачи отвечает расчет проточной части турбины вентилятора ТРДД. Он сводится к тому, что

нужно задаться диаметром свободной турбины, определить окружную скорость и число ступеней или, наоборот, задаться числом ступеней и определить диаметральные размеры.

Согласование винтовентилятора с турбиной НД в системе ТВВД аналогично согласованию узлов турбовентилятора ТРДД. Отличие состоит в том, что турбина НД приводит винтовентилятор через редуктор (по схеме с редуктором выполняются и некоторые ТРДД), поэтому при определении частоты вращения ротора турбины НД нужно учитывать передаточное отношение редуктора. С его увеличением повышается окружная скорость турбины (при принятых диаметральных размерах) и уменьшается число ступеней турбины, или при принятом числе ступеней (и соответствующей окружной скорости) снижаются диаметральные размеры этой турбины. Одновременно увеличиваются габаритные размеры и масса редуктора. Выбор передаточного отношения – задача, требующая оптимизации по габаритам и массе винтовентилятора, его турбины и редуктора.

Одновальный и двухвальный ТВД. Турбина одновального ТВД и турбина НД двухвального ТВД приводят винт через редуктор. Частота вращения винта задается из условия обеспечения его эффективной работы, поэтому увеличение передаточного отношения редуктора позволяет повысить частоту вращения ротора турбокомпрессора, снизить его габариты и массу. При этом габаритные размеры и масса редуктора увеличиваются. Следовательно, частота вращения ротора турбины винта должна выбираться путем оптимизации силовой установки по габаритам и массе.

После определения числа ступеней и диаметральных размеров проточной части турбокомпрессора необходимо проверить запас прочности рабочих лопаток последней ступени турбины.

Таким образом, подходы к проектированию проточной части турбокомпрессора ГТД различаются прежде всего в определении частоты вращения ротора, которая или рассчитывается из условия обеспечения запаса прочности рабочих лопаток турбины (для турбокомпрессора ВД, СД, а в некоторых схемах и НД), или задается из условия обеспечения оптимальной работы потребителя мощности, а при наличии редуктора, кроме того, из условия минимизации суммарной массы турбокомпрессора и редуктора.

При известной частоте вращения ротора последовательность определения диаметральных размеров проточной части и числа ступеней турбокомпрессора сводится к трем основным вариантам:

1. Если задаться числом ступеней турбины (компрессора), то по величине z_T (z_K) можно определить окружную скорость, а по ней – диаметральные размеры.
2. Если задана окружная скорость (например, тип компрессора), то по ее значению определяются диаметральные размеры и число ступеней.
3. Если требуется обеспечить минимальные лобовые габариты, то целесообразно вначале рассчитать, исходя из этого требования, диаметральные размеры проточной части, затем окружные скорости и число ступеней.

После формирования методики студент должен пройти **первую контрольную точку**. На контрольную точку требуется принести распечатанную методику и по ней отчитаться.

Второй документ. В этом документе приводится расчет выполненный на калькуляторе, также оформленный в виде документа MS Word.

В третьем документе на основании расчета, выполненного «вручную», строится эскиз проточной части ТК.

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

3. ВАРИАНТНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТУРБОКОМПРЕССОРА ГТД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АСТРА-ТК

Данный раздел включает в себя следующие подразделы:

- 1.1. Проектирование в АСТРА-ТК проточной части по методике предыдущего этапа.
- 1.2. Проектирование второго варианта проточной части в АСТРА-ТК.
- 1.3. Проектирование третьего варианта проточной части в АСТРА-ТК.
- 1.4. Сравнение вариантов, анализ полученных данных и выводы.

Каждый из разделов 3.1.-3.3. включает в себя следующие три документа:

- «Детализированная схема проточной части»;
- «Результаты работы в формате подсистемы АСТРА-ТК»;
- «Результаты проектирования в формате MS Excel».

А раздел 3.4. содержит два документа:

- «Сравнение вариантов, анализ полученных данных и вывод»;
- «Сравнение параметров полученных вариантов».

Вначале выполняется проектирование ПЧ по методике, составленной во втором разделе. В программу АСТРА-ТК вводятся такие же исходные данные, как и при расчете вручную.

Далее варианты корректируются, могут измениться как исходные данные, так и сам подход к проектированию проточной части, а в некоторых случаях может быть целесообразно перераспределить степень повышения давления между каскадами компрессора (повторить проектный ТГД расчет с новыми данными) или изменить схему двигателя. Таким образом появляются **второй** и **третий варианты**. Данные аргументировано выбираются на основании [3] и [6]. Результаты работы в подсистеме АСТРА-ТК сохраняются в формате подсистемы (файл с расширением PROT), а также в виде детализированной схемы (в формате DXF) и в виде таблиц (документе MS Excel).

После создания всех вариантов, требуется пройти **вторую контрольную точку**. На защиту приносятся выбранные студентом варианты, и этот выбор обосновывается перед преподавателем.

Далее в **четвертом документе** выполняется сравнение: сравниваются три проточных части по параметрам и схеме: числу ступеней и габаритам, плавности проточной части, выходам параметров за пределы допустимых/рекомендованных значений и т.п. Делаются выводы, какая из них наилучшая, или что необходимо изменить: перераспределить теплоперепад, перейти к схеме с большим количеством валов, с редуктором, с ЦБ компрессором и т.д.

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. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении студентом отражаются результаты, полученные в ходе выполнения работы, а также делаются основные выводы. Указывается, в каких дальнейших работах могут быть использованы полученные результаты.

При необходимости можно описать, каким образом была организована работа, какие этапы вызвали наибольшие затруднения и проанализировать их причины. Опишите причины, по которым часть из запланированных этапов не была выполнена, а также какие новые знания и навыки вы приобрели в процессе выполнения работы.

Эта часть отражает степень перспективности проведенного расчета, помогает понять ценность выполненной задачи. В заключении вы даете собственную оценку работе и высказываете мнение о целесообразности проведения дальнейших работ по совершенствованию проточной части.

5. 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»).

Подчеркнем, что каждый раз, когда после проверки документов преподавателем он оставляет свои замечания, необходимо вызвать соответствующие документы из архива (создавая новую версию) и внести в них исправления. Все внесенные исправления должны обязательно быть перечислены в документе «Исправление замечаний» (располагающемся в разделе 5 дерева проектов). Затем все исправленные документы (включая «Исправление замечаний») опять сдаются в архив.

Точную дату *заключительной защиты* необходимо уточнить у преподавателя. Защита после указанного срока может служить основанием для снижения оценки по курсовой работе.

ГЛОССАРИЙ

1. **Алгоритм** – ряд последовательных действий, необходимых для решения задачи.
2. **Анализ термогазодинамический** – определение КПД узлов и коэффициентов потерь, а также расходных характеристик узлов и сравнение их с соответствующими значениями на базовом двигателе.
3. **Аппарат направляющий** – неподвижный лопаточный венец компрессора.
4. **Аппарат сопловой** – неподвижный лопаточный венец турбины.
5. **Венец лопаточный** – совокупность лопаток, установленных в ободу или на диске.
6. **Вентилятор** – компрессор, работающий в наружном контуре.
7. **Винтовентилятор** – высоконапорный винт, специально профилированный для эффективной работы при больших дозвуковых скоростях полета.
8. **Газогенератор** – совокупность компрессора высокого давления, камеры сгорания и турбины высокого давления.
9. **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).
10. **Двигатель турбовальный** – тепловая машина, в которой большая часть полезной тепловой энергии преобразуется в турбине в механическую работу и отводится на привод потребителя.
11. **Двигатель турбовинтовентиляторный** – тепловая машина, в которой большая часть полезной тепловой энергии преобразуется в турбине в механическую работу и отводится на привод высоконапорного винта, специально профилированного для эффективной работы при больших дозвуковых скоростях полета (винтовентилятора).
12. **Двигатель турбовинтовой** – тепловая машина, в которой большая часть полезной тепловой энергии преобразуется в турбине в механическую работу и отводится на привод самолетного винта.
13. **Диаметр относительный втулочный** – отношение втулочного диаметра сечения к его периферийному диаметру
$$\bar{d}_{вт} = \frac{D_{вт}}{D_{п}}$$
14. **Зазор осевой** – осевое расстояние между неподвижными и вращающимися венцами лопаточной машины.
15. **Зазор радиальный** – расстояние между корпусом лопаточной машины и её вращающимися венцами, измеренное в радиальном направлении.
16. **Изэнтропический, изэнтропный** – идеальный (происходящий при постоянной энтропии).
17. **Колесо рабочее** – вращающийся лопаточный венец.
18. **Компрессор** – агрегат, предназначенный для непрерывного сжатия поступающего рабочего тела до расчетного уровня степени повышения давления.
19. **Коэффициент запаса прочности** – отношение разрушающего напряжения к действующему.
20. **Коэффициент скорости** – отношение скорости потока к критической скорости.
21. **Коэффициент формы лопатки** – отношение площади периферийного сечения лопатки к площади ее втулочного сечения.
22. **Критерий эффективности двигателя** – признак, на основании которого производится оценка эффективности двигателя (общий КПД, удельный расход топлива и т.д.).
23. **Машина лопаточная** – устройство, в проточной части которого осуществляется подвод (или отвод) механической энергии к потоку рабочего тела, проходящего через машину.
24. **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.
25. **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.

26. **Модель математическая** - совокупность расчетных формул, вычислительных алгоритмов, табличных, графических результатов. Математические модели являются информационным аналогом изделия и решают задачи анализа.
27. **Нагруженность (ступени турбины)** – параметр ступени турбины, характеризует кинематику потока и уровень КПД ступени, а также ее режим работы, показывает отношение окружной скорости ступени к идеальной работе ступени.
28. **Напорность (ступени компрессора)** – параметр, определяющий степень нагруженности ступени ОК, равен отношению удельной работы ступени к квадрату окружной скорости.
29. **Параметр оптимальный** – наиболее благоприятный по выбранным критериям параметр.
30. **Параметры двигателя приведенные** – параметры, определенные в стандартных атмосферных условиях.
31. **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).
32. **Параметры потока полные** – см. параметры заторможенного потока.
33. **Параметры рабочего процесса** – температура газа перед турбиной и степень повышения давления в компрессоре.
34. **Показатель изэнтропы (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).
35. **Постоянная удельная газовая** – универсальная газовая постоянная, отнесенная к 1 кг данного вещества.
36. **Постоянная универсальная газовая** – постоянная \tilde{R} в уравнении состояния для моля идеального газа $p\tilde{v} = \tilde{R}T$.
37. **Производительность (ступени компрессора)** – объемный расход воздуха.
38. **Прототип** – двигатель, выбранный в качестве базового при проектировании.
39. **Размерность (двигателя, компрессора)** – определяется главным образом диаметрными размерами.
40. **Режим расчетный** – проектный расчет, принятый за исходный для проектирования узлов и двигателя в целом.
41. **Режим течения критический** – режим, когда скорость потока равна скорости звука в потоке.
42. **Решение компромиссное** – решение, в равной степени удовлетворяющее совокупности условий.
43. **Ротор** – совокупность всех рабочих колес в проточной части лопаточной машины.
44. **Свойства теплофизические (рабочего тела)** – показатель изэнтропы, теплоемкость, газовая постоянная и т.д.
45. **Скорость критическая** – скорость звука для критического режима.
46. **Скорость приведенная** – см. коэффициент скорости.
47. **Статор** – совокупность всех направляющих аппаратов (или сопловых аппаратов).
48. **Степень двухконтурности** – отношение расхода воздуха, проходящего через наружный контур, к расходу воздуха, проходящего через внутренний контур $m = \frac{G_{II}}{G_I}$.
49. **Ступень компрессора** – совокупность рабочего колеса и расположенного за ним направляющего аппарата.
50. **Ступень турбины** – совокупность соплового аппарата и расположенного за ним рабочего колеса.
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. **Турбина** – агрегат, предназначенный для выработки мощности, необходимой для привода компрессора.
55. **Турбовентилятор** – совокупность вентилятора и вращающей его турбины (турбокомпрессор НД).
56. **Турбокомпрессор** – совокупность турбокомпрессоров всех каскадов двигателя.
57. **Турбокомпрессор каскада ВД (НД, СД)** – совокупность компрессора ВД (НД, СД) и турбины ВД (НД, СД).
58. **Тяга лобовая** – отношение тяги двигателя к площади миделевого (максимального) сечения.
59. **Удлинение относительное** – отношение высоты лопатки к ширине лопаточного венца.
60. **Уровень авиационного двигателя научно-технический (НТУ)** – степень соответствия его основных данных, удельных параметров и характеристик лучшим мировым научно-техническим достижениям в области авиадвигателестроения.
61. **Число Маха** – отношение скорости потока к скорости звука в потоке.
62. **Энтальпия (теплосодержание)** – функция состояния термодинамической системы, равная сумме внутренней энергии и произведения объема на давление; численно равна произведению теплоемкости при изобарном процессе на температуру.

63. **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. Кузьмичев, В.С. Проектный расчет основных параметров турбокомпрессоров авиационных ГТД: учеб. пособие / В.С. Кузьмичев, А.А. Трофимов. – Куйбышев: Куйбыш. авиац. ин-т, 1990. – 72 с.
2. 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.
3. Кулагин, В.В. Вариантное проектирование проточной части турбокомпрессора ГТД с использованием подсистемы АСТРА ТК: учеб. пособие / В.В. Кулагин, В.С. Кузьмичев, И.Н. Крупенич [и др.]. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006.
4. Научный вклад в создание авиационных двигателей. / под общ. ред. В.А. Скибина и В.И. Солонина. – М.: Машиностроение, 2000.
5. Деменчонок, В.П. Теория двухконтурных турбореактивных двигателей / В.П. Деменчонок [и др.]; под ред. С.М. Шлях-тенко, В.А. Сосунова. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.
6. 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. – 462 с.
7. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок / под ред. В.А. Сосунова и В.М. Чепкина. – М.: Изд-во МАИ, 2003. – 688 с.
8. Холщевников, К.В. Некоторые вопросы теории и расчета ТРД / К.В. Холщевников. – М.: Оборонгиз, 1960. – 118 с.

Учебное издание

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

**ВАРИАНТНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТУРБОКОМПРЕССОРА ГТД
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АСТРА-ТК
В PDM СИСТЕМЕ SMARTTEAM**

Методические указания

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

Подписано в печать 28.12.07. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Печ.л. 2,5.
Тираж 120 экз. Заказ . ИП-53/2007

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

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