

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЁВА»
(Самарский университет)»

МОДЕЛИРОВАНИЕ
ДИНАМИКИ И ПРОЧНОСТИ
РАБОЧИХ КОЛЁС ТУРБОМАШИН
В T-FLEX PLM

Методические указания

Составители:

В.С. Мелентьев, А.С. Гвоздев, А.М. Уланов, А.С. Виноградов

САМАРА

Издательство Самарского университета

2026

УДК 629.7.036.3

Составители: *В. С. Мелентьев, А. С. Гвоздев,
А. М. Уланов, А. С. Виноградов*

Рецензент к-т техн. наук, доц. *А. И. Сафин*

Моделирование динамики и прочности рабочих колёс турбомашин в T-FLEX PLM: метод. указания / сост. *В.С. Мелентьев, А.С. Гвоздев, А.М. Уланов, А. С. Виноградов.* – Самара: Изд-во Самарского университета, 2026. – 38 с.: ил.

Методические указания предназначены для обучающихся Института двигателей и энергетических установок. Рекомендованы для обучения бакалавров (ФГОС-3++) по направлению подготовки 24.03.05 «Двигатели летательных аппаратов» по дисциплине «Цифровые двойники в двигателестроении»; специалистов (ФГОС-3++, ОСУС) по направлению подготовки 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» по дисциплине «Динамика и прочность двигателей».

Разработано на кафедре конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Расчет неравномерно нагретых дисков турбомашин, находящихся в упругопластическом состоянии.....	5
1.1 Подготовка исходных данных для геометрической модели.....	5
1.2 Формирование геометрической модели диска.....	6
1.3 Задание материала диска.....	7
1.4 Формирование конечно-элементной модели диска.....	11
1.5 Формирование нагрузок и граничных условий.....	12
1.6 Расчет напряженно-деформированного состояния.....	14
1.7 Визуализация результатов.....	17
2 Проектирование лопатки.....	20
2.1 Подготовка исходных данных для геометрической модели.....	20
2.2 Формирование геометрической модели лопатки.....	22
2.3 Формирование конечно-элементной модели лопатки.....	30
2.4 Формирование нагрузок и граничных условий.....	32
2.5 Расчет напряженно-деформированного состояния.....	34
2.6 Визуализация результатов расчёта.....	35
2.7 Расчет частот колебаний лопатки.....	35
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	37
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	38

ВВЕДЕНИЕ

Рабочее колесо, конструктивно состоящее из диска и лопаточного венца, наряду с валом и опорой, является основным элементом компрессора и турбины ГТД и ТНА. Рабочие колёса работают в тяжёлых условиях: высокие частоты вращения, скорости, температуры и давления газового потока, жёсткие ограничения по массе и материалам. При этом необходимо обеспечить статическую и динамическую прочность лопаток и диска. В современной практике конструирования для расчёта собственных частот, деформаций и напряжений применяется метод конечных элементов и основанные на нем пакеты программ, в частности, «T-FLEX Анализ». Для выполнения расчётов необходимы базовые навыки работы в «T-FLEX Анализ», знание основ метода конечных элементов, знание теории динамики и прочности авиационных ГТД или ТНА.

«T-FLEX Анализ» (аналог ANSYS Mechanical, Nastran) использует метод конечных элементов и позволяет рассчитать деформацию конструкции и напряжения в ней, в том числе и в движении. С помощью «T-FLEX CAD» быстро создается полностью параметризованная модель изделия. Также геометрия может быть импортирована из наиболее популярных CAD-систем, например, SolidWorks, КОМПАС и др. Задав связи компонентов модели и запустив расчет, можно легко и быстро получить данные по собственным частотам модели, практически идентичные результатам натурных испытаний системы.

Программные комплексы заменяют дорогостоящие и длительные натурные эксперименты быстрым и подробным компьютерным моделированием, обеспечивая промышленным предприятиям экономию значительных средств и выход на рынок с всесторонне оптимизированными изделиями.

1 РАСЧЕТ НЕРАВНОМЕРНО НАГРЕТЫХ ДИСКОВ ТУРБОМАШИН, НАХОДЯЩИХСЯ В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ


В курсовой работе необходимо провести прочностное проектирование диска турбины либо компрессора. Суть данного расчета в оптимизации диска по параметрам: коэффициент запаса – масса. Получив исходную конструкцию (чертеж), необходимо доказать, что у диска конструкция оптимальна и, если это не так, усовершенствовать ее. Для этого нужен ряд последовательных многократных расчетов с целью исследования влияния имеющихся геометрических размеров и охлаждения.

1.1 Подготовка исходных данных для геометрической модели

Создайте рабочую папку, где будут храниться все материалы. Лучше всего использовать папку D:\Users\№ группы\Фамилия, например, D:\Users\2310\Иванов Максим;

Следуя дальнейшим инструкциям, выполните расчёт диска согласно заданию. Для примера взято сечение диска, представленное на рисунке 1.1.

Запустите приложение «T-FLEX CAD».

Выберите в окне приветствия (или в меню Файл - Создать) окно «Создать новый документ», далее выберите вкладку «Детали и сборки» и создайте «3D деталь» ; Появится вкладка с названием «3D Деталь ...» с отображением рабочих плоскостей и древа построения.

Выберите в меню Файл – Сохранить как. В окне сохранения выберите созданную ранее рабочую папку и в поле *Имя файла* впишите название создаваемой детали, например, «Диск».

Для диска на рис. 1.1 выбраны 9 параметров – толщины, радиусы изменения толщин и радиусы скруглений. Их численные значения для данного примера сведены в таблицу 1.1. Для диска

сложной формы сечение следует строить по точкам, как описано в [1].

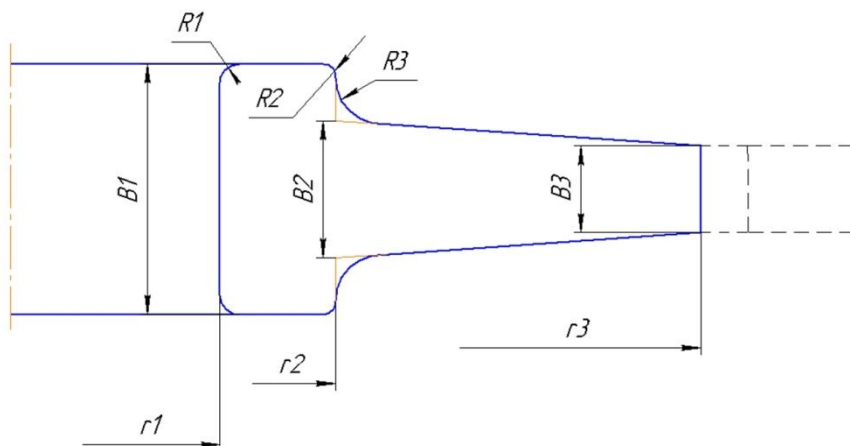





Рисунок 1.1 – Сечение диска

Таблица 1.1 – Геометрические размеры диска

Переменная	B1	B2	B3	r1	r2	r3	R1	R2	R3
Размер, мм	65	36	22	55	85	180	5	3	12

1.2 Формирование геометрической модели диска

Воспользуйтесь инструментом «Переменные»  панели «Параметры». В открывшемся окне «Редактор переменных» выберите инструмент «Новая переменная» . Введите имя переменной согласно таблице 1.1. Укажите тип «Вещественная». В поле «Выражение» введите значение размера. В поле «Единица измерения» укажите «мм». Поставьте галочку в поле «Внешняя». В поле «Комментарий» можно указать какую-то вспомогательную информацию. Завершите создание переменной, нажав «ОК».

Выберите плоскость «Вид сверху» и создайте на ней 3D-профиль сечения диска (см. рис. 1.2), используя команду «Чертить»  панели 3D Модель. Используйте один из изученных ранее

методов, например, через вспомогательные прямые . Добавьте осевую линию . Для параметризации используйте размеры $\times 5$. На осевой линии сделайте отрезок другого цвета – будущую ось вращения. Используйте инструмент «Цвет» панели «Стиль» вкладки «Рабочая плоскость», чтобы разделить элементы построения (линии), относящиеся к разным телам. По умолчанию выбран чёрный цвет . Измените цвет на любой другой. Нажмите «Завершить» на панели «Управление». Создайте для каждого цвета линий изображения отдельный 3D-профиль.

Создайте тело операцией «Вращение» панели «Операции». В качестве оси вращения используйте созданную осевую линию. Угол поворота составляет 6 градусов. В поле «Начальный угол» укажите 0 градусов. Оставьте галочку «Упростить геометрию».

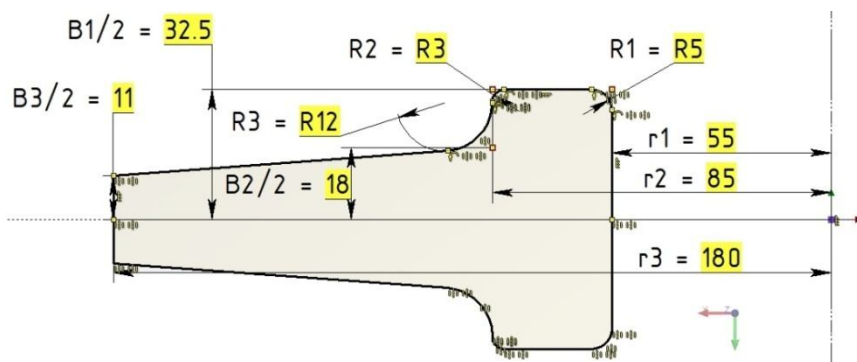


Рисунок 1.2 – 3D-профиль диска

1.3 Задание материала диска

Воспользуйтесь инструментом «материалы» , чтобы открыть окно управления материалами детали. На вкладке «Документ» окна материалы в поле «Имя» должен находиться материал «Сталь», из которого сделаны все тела детали по умолчанию. Нажмите на название материала «Сталь» правой кнопкой мыши и выберите в выпадающем меню пункт «Создать копию материала».




Дважды кликните на название скопированного материала. Откроется окно «Параметры материала». На вкладке «Вид» (или «Общие») измените имя материала на «ЭИ698». Далее перейдите на вкладку «Физические свойства» (или «Физические»). Задайте в поле «Плотность» 7800 кг/м^3 и в поле «Коэффициент Пуассона» 0,3, в полях «Предел прочности на разрыв» и «Предел прочности на сжатие» 1160000000 Н/м^2 . Затем в поле «Модуль упругости» кликните на пиктограмму «Добавить график»  справа от значения, чтобы задать зависимость модуля упругости от температуры. Создайте график по данным таблицы 1.2. Назовите его, например, «Модуль упругости диска», тип «Кривая». Используя инструмент «Добавить новый узел по координатам» , задайте точки графика.

Таблица 1.2 – Модуль упругости и предел текучести материала

Температура, °C	Модуль упругости, Н/м^2	Предел текучести, Н/м^2
20	$2 \cdot 10^{11}$	1184000000
300	$1,9 \cdot 10^{11}$	1123000000
350	$1,85 \cdot 10^{11}$	1112000000
400	$1,8 \cdot 10^{11}$	1101000000
420	$1,78 \cdot 10^{11}$	1097000000
450	$1,75 \cdot 10^{11}$	1090000000
550	$1,65 \cdot 10^{11}$	1030000000
650	$1,6 \cdot 10^{11}$	1010000000
700	$1,55 \cdot 10^{11}$	920000000
750	$1,5 \cdot 10^{11}$	724000000

Аналогично добавьте график для параметра «Предел текучести». В данном случае предел текучести будет использоваться в качестве замены предела длительной прочности.

Если в данной версии T-FLEX Анализ присутствует возможность задать кривые пластичности материала (доступно с версии 18), задайте их. Для этого в окне «Параметры материала» на вкладке «Физические» измените поведение материала с «Линейно-упругий» на «Пластичный (изотропный)». В поле «Модель материала» выберите «Мультилинейная». В появившемся поле «Закон деформирования» кликните на пиктограмму  «Редактировать закон деформирования». Откроется окно «Закон деформации». В разделе «Единицы измерения» выберите «Напряжение» в МПа, а «Температуру» в градусах Цельсия.

В поле «Основные параметры» создайте нужное число графиков для своего материала аналогично табл. 1.3, где T – температура снятия кривой, ϵ – относительное удлинение образца, σ – напряжения в образце. Кривые пластичности в интерфейсе T-FLEX CAD показаны на рис. 1.3.

Таблица 1.3 – Кривые пластичности материала

T , °C	ϵ	σ , МПа	T , °C	ϵ	σ , МПа	T , °C	ϵ	σ , МПа
20	0	0	450	0	0	550	0	0
	0,003	555		0,003	525		0,003	495
	0,02	800		0,02	775		0,02	760
	0,06	950		0,06	900		0,06	890
	0,20	1125		0,20	1050		0,20	1020
	0,26	1200		0,26	1050		0,26	1020
650	0	0	700	0	0	750	0	0
	0,003	480		0,003	465		0,003	450
	0,02	730		0,02	700		0,02	700
	0,06	890		0,06	850		0,06	730
	0,20	980		0,20	950		0,20	730
	0,26	980		0,26	950		0,26	730

Основные параметры

№	Температура	Имя графика	График
1	20 °C	Кривая пластичности 20 C	
2	450 °C	Кривая пластичности 450 C	
3	550 °C	Кривая пластичности 550 C	
4	650 °C	Кривая пластичности 650 C	
5	700 °C	Кривая пластичности 700 C	
6	750 °C	Кривая пластичности 750 C	

Параметры материала

Параметры отображения

Единицы измерения	Общие	Визуальные	Штриховка	Физические
Напряжение: МПа	Поведение материала:		Пластичный (изотропный)	
Температура: °C	Модель материала:		Мультилинейная	
Значение температуры	Закон усталости:		не задан	
Температура: Весь диапазон температур	Закон деформирования:		Зависимость от температуры	

Диаграммы деформирования материала

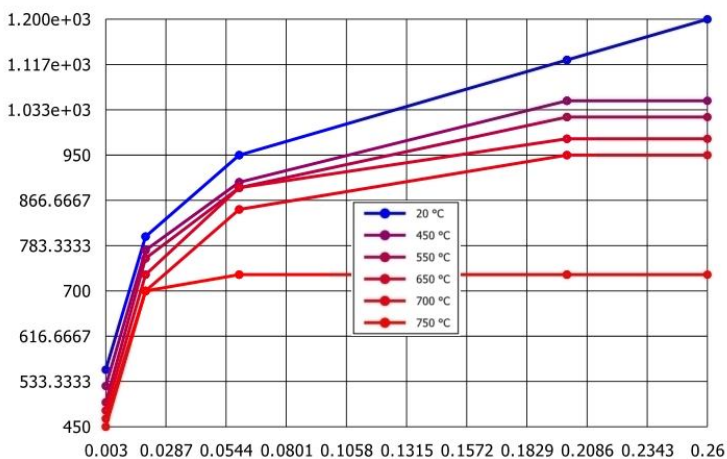





Рисунок 1.3 – Кривые пластичности материала

Для каждого значения температуры создаётся свой график. Т.е. для данного материала нужно создать шесть графиков. Не за-





бывайте изменять размерность температуры согласно данным по материалу. В данном случае на градусы Цельсия.

Кривые пластичности можно создать заранее, а можно непосредственно в окне «Закон деформации». Для этого кликните на пиктограмму  «График». И далее либо выберите существующий график, либо нажмите «Создать» для создания новой кривой пластичности. Далее, используя инструмент «Добавить новый узел по координатам» , задайте точки графика.

Сохраните документ .

Кликните два раза на теле диска в древе построения модели (или воспользуйтесь любым другим способом), чтобы открыть окно параметров тела. В поле «материал» выберите  материал «ЭИ698».

1.4 Формирование конечно-элементной модели диска

Для проведения дальнейших расчётов необходимо запустить модуль T-FLEX Анализ. Для этого перейдите на вкладку «Анализ». Выберите пиктограмму «Создать задачу»  на панели «Задача». И в выпадающем списке выберите «Конечно-элементный анализ» . На вкладке «Задача» в поле «Тип» выберите «Установившиеся тепловые процессы» . Добавьте в окно «Элемент» тело диска. В окне «Параметры расчётной модели» убедитесь, что правильно подставились все значения физических констант материалов. Если нет, то поставьте галочку «Другой материал» и принудительно выберите «ЭИ698». Завершите создание задачи . Автоматически откроется окно создания сетки конечных элементов. Для разбивки используется конечный элемент «Криволинейный тетраэдр». Для ускорения расчётов можно использовать конечный элемент «Тетраэдр», но он работает только в зоне упругих деформаций (не учитывает пластичность материала). Убедитесь, что в поле размер выбран параметр «Относительный» и выставьте его

значение на 0,02. В случае нехватки оперативной памяти допустимо увеличить значение относительного размера максимум до 0,05. Либо можно поставить значение в поле размер на «Абсолютный» и явно указать нужный средний размер конечного элемента. Чем меньше будет значение, тем точнее результат. Значения остальных параметров оставьте по умолчанию. Завершите создание сетки ✓. Ориентировочный вид сетки (примерно 260 тыс. КЭ) показан на рис. 1.4. В первом приближении можно начать с сетки в 20...50 тыс. КЭ.

Теперь на панели будет находиться вкладка «Задачи», а в ней конкретная задача «Задача_1 (Тепловая стационарная)». Также папка «Задачи» появится в древе построения модели. В одной модели может быть несколько разных задач, но только одна из них является активной.

1.5 Формирование нагрузок и граничных условий

Воспользуйтесь инструментом «Температура» 🌡️ панели «Условия» вкладки «Анализ». Задайте температуры для поверхностей обода и ступицы из задания, как показано на рис. 1.4. В данной модели температура ступицы 300 градусов Цельсия, а температура обода 420 градусов Цельсия.

Воспользуйтесь инструментом «Расчёт» 📊 на панели «Расчёт» вкладки «Анализ». В поле «Метод расчёта» оставьте «Автоматический выбор». В поле «Тип элемента» выберите «Квадратичная интерполяция», поскольку только такой тип элемента учитывает пластичность материала. Если расчёт будет проходить без учёта пластичности, то можно выбрать «Линейную интерполяцию». Это несколько снизит точность расчёта, существенно увеличив его скорость.

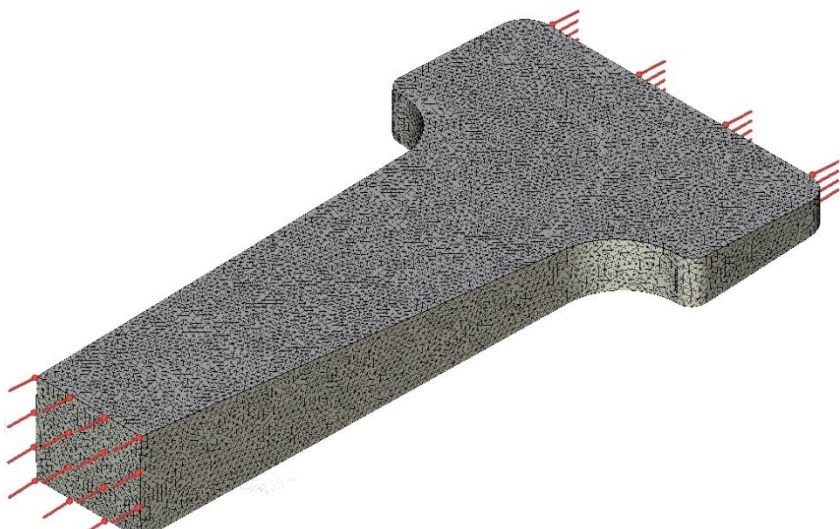


Рисунок 1.4 – Сетка конечных элементов модели сектора диска

Поставьте галочку «Учитывать изменение физических свойств от температуры». Остальные параметры оставьте по умолчанию. Нажмите «ОК». В открывшемся окне «Результаты» выберите нужные параметры. В данном случае нас интересует «Температура».

Откройте подпапку «Результаты» папки «Задача_1 (Тепловая стационарная)». Выведите картину распределения температур по телу диска. Для данной модели она приведена на рис. 1.5. Убедитесь в правильности результатов. Сделайте скриншот и добавьте в отчёт.

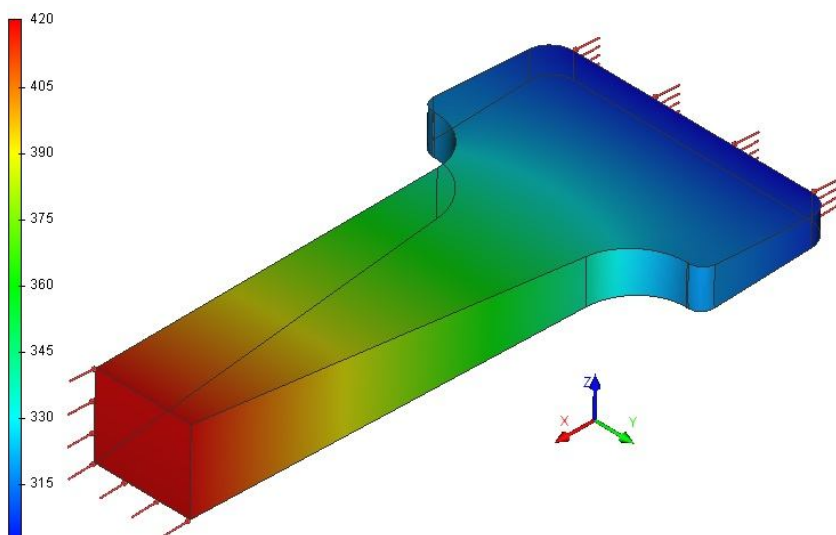






Рисунок 1.5 – Распределение температур по телу диска


1.6 Расчет напряженно-деформированного состояния




Для проведения статического расчёта диска кликните на задаче по расчёту установившихся тепловых процессов в древе построения модели правой кнопкой мыши и выберите в выпадающем списке «Копировать задачу». В параметрах копирования задачи выберите «Создать зависимую копию сетки». Кликните на созданную копию, чтобы сделать данную задачу активной. Затем кликните на неё правой кнопкой мыши и выберите пункт «Изменить». Измените тип задачи на «Статическая прочность» .






Удалите из статической задачи приложенные в тепловом расчёте температуры.

На диск также действует контурная нагрузка. Это сила от лопаток (которых нет в модели) и замковой части диска. Ее следует рассчитывать по учебнику Хронина [5]. В данной модели контурная нагрузка на номинальном режиме 25 МПа.

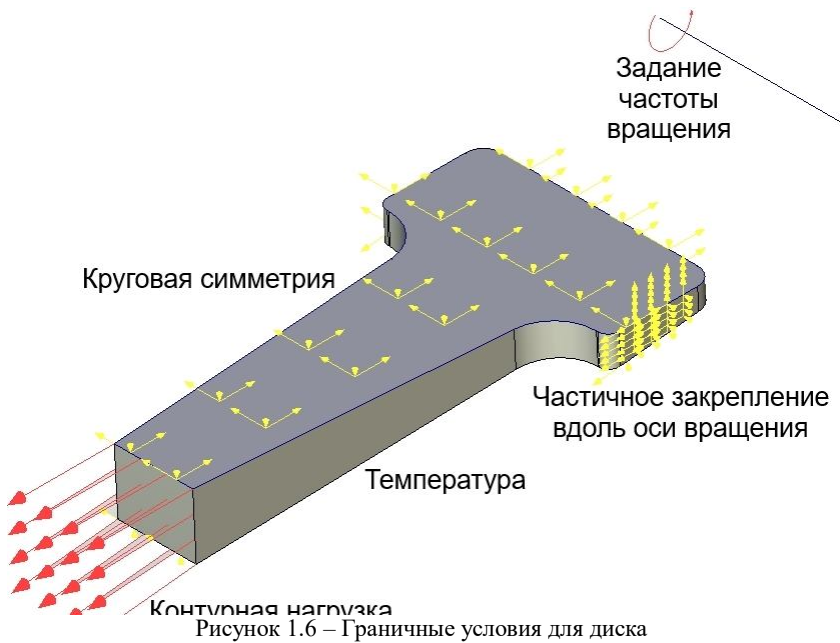
Воспользуйтесь инструментом «Давление»  (подменю инструмента «Сила» ) панели «Условия» вкладки «Анализ». Выберите поверхность обода диска. Тип нагрузки «Равномерная». В поле «Значение» введите величину давления на данном участке. Поставьте галочку «Обратное направление», поскольку давление должно дополнительно растягивать диск. Завершите создание давления .


Воспользуйтесь инструментом «Вращение» . Выберите тело диска, созданный выше отрезок (совпадающий с осью Y) в качестве оси вращения и в поле «Угловая скорость» введите значение угловой скорости из задания. В данной модели это 2000 рад/с.

В выпадающем списке инструмента «Закрепление»  на панели «Условия» вкладки «Анализ» выберите «Частичное закрепление» . Укажите одну из граней ступицы диска перпендикулярную оси Y (на передней или задней поверхности диска, где происходит его соединение с соседним диском). Оставьте прямоугольную систему координат. Снимите галочки с направлений осей X (радиальное направление) и Z (окружное направление). В поле оси Y (осевое направление) должен стоять ноль. Завершите создание закрепления .

В выпадающем списке инструмента «Закрепление»  выберите «Симметрия» . В поле «Тип симметрии» выберите «Круговая» . В поле «1-я плоскость симметрии» укажите грань диска в плоскости XY, по которой сектор диска вырезан из целого. В поле «2-я плоскость симметрии» укажите противоположащую грань, повернутую относительно первой на 6 градусов. В качестве оси вращения выберите тот же отрезок, что и для операции «Вращение» . Завершите создание симметрии .

Все граничные условия в модели показаны на рис. 1.6.



Воспользуйтесь инструментом «Расчёт» . В поле «Метод расчёта» оставьте «Автоматический выбор». В поле «Тип элемента» выберите «Квадратичная интерполяция» для учёта пластичности или «Линейная интерполяция» для расчёта диска только в зоне упругости. Остальные параметры на данной вкладке оставьте по умолчанию.

Перейдите на вкладку «Термоэффекты». Поставьте галочки «Учитывать термоупругость» и «Учитывать изменение физических свойств от температуры». Учёт зависимости свойств материала от температуры – это учёт изменения модуля упругости и предела текучести материала при нагреве или охлаждении. Термоупругость - это учёт напряжений и деформаций конструкции от нагрева или охлаждения. Термоупругость позволяет рассчитать расширение диска от нагрева. Т.е. если изначально диск имеет

температуру 20 градусов, и напряжения в нём равны нулю. А при нагреве примерно до 400 градусов Цельсия, как в данной задаче, диск расширяется и при этом возникают напряжения.

Выберите «Использовать результаты теплового анализа» и укажите «Задача_1». В поле «Температура нулевых деформаций» укажите 20 градусов Цельсия, переключившись щелчком мыши на размерности с градусов Кельвина на градусы Цельсия. Нажмите «Далее».

В открывшемся окне «Результаты» выберите нужные параметры: перемещения по осям, суммарные перемещения, все выделенные напряжения, включая эквивалентные, коэффициент запаса по эквивалентным напряжениям.

Если при расчёте систему уравнений решить не удаётся, то возможно не хватает памяти. Попробуйте увеличить размер конечных элементов (т.е. уменьшить их количество).

Если проводится расчёт с учётом пластичности, на вкладке «Пластичность» можно увеличить максимальное число итераций или относительную погрешность.

1.7 Визуализация результатов

Откройте подпапку «Результаты» папки «Задача_1_0 (Прочность)». Выведите картины распределения суммарных перемещений, эквивалентных напряжений и коэф. запаса по статической прочности (по пределу текучести). Для распределения коэф. запаса выберите линейную шкалу (щелчок левой кнопкой мыши на шкале открывает окно свойств).

В некоторых версиях T-FLEX Анализ при выводе распределения коэф. запаса не учитывается его распределение по температуре, т.е. берётся значение по умолчанию. В этом случае коэф. запаса рассчитывается неправильно. Тогда задайте в свойствах материала предел прочности для среднего значения температуры (для данной

модели 360 градусов Цельсия), например, в поле «Предел прочности на сжатие». И далее выводите предел прочности по этому параметру. Это несколько снизит точность, но коэф. запаса будет рассчитываться правильно.

Сделайте скриншоты. Занесите в отчёт максимальные значения. Сравните полученное значение минимального рассчитанного коэф. запаса с допустимым (минимальный 1,3, максимальный 2,5). Сделайте вывод о прочности. Если нормы прочности не удовлетворяются, по согласованию с преподавателем:

- либо осуществите доводку диска до нормативных запасов прочности, изменяя его форму и материал;

- либо приведите рекомендации по изменению конструкции диска.

Следуя инструкциям ниже, вычислите разрушающие обороты для диска.

Критерием наступления разрушающих оборотов является наличие в диске слоя (шириной во всё сечение), в котором коэф. запаса опускается ниже единицы. Если коэф. запаса меньше единицы в точке или замкнутой области (не во всём сечении), то такая частота вращения не считается разрушающей. Если в модели учитывается пластичность, то КЭ-решатель отказывается считать дальше, поскольку диск бесконечно растекается и в какой-то момент рвется. Если пластичность не учитывается, коэф. запаса может опускаться и дальше, но дальнейший расчёт не имеет смысла.

Чтобы коэф. запаса снижался, необходимо увеличивать частоту вращения диска. Рекомендуется сделать таблицу со столбцами: № расчёта, частота вращения, контурная нагрузка, минимальный коэф. запаса. И далее выполнить серию расчётов, занося данные в эту таблицу. Не забывайте пересчитывать контурную нагрузку, поскольку она зависит от частоты вращения. Либо задайте её в

модель в виде уравнения. Искать нужное значение коэф. запаса можно разными способами. Рекомендуется использовать метод последовательного приближения. Т.е. для первого расчёта увеличьте частоту вращения вдвое от номинальной (данной в задании), например, с 2000 рад/с до 4000 рад/с. Если коэф. запаса больше единицы, то увеличьте ещё вдвое (до 8000 рад/с). Если меньше единицы (либо пластичная модель не считается), значит, нужное значение частоты вращения лежит в диапазоне от 2000 до 4000 рад/с. Разделите диапазон пополам. Т.е. рассчитайте модель с частотой вращения 3000 рад/с. Если коэф. запаса больше единицы, возьмите 3500 рад/с, если меньше – то 2500 рад/с. И так далее, пока не найдёте нужное значение коэф. запаса. Точность поиска – 50 рад/с.

Далее вычислите коэф. запаса по разрушающим оборотам, разделив найденное значение разрушающих оборотов на номинальное. Сравните коэф. запаса по разрушающим оборотам с допустимым. Он должен быть больше 1,5.

Если на номинальном режиме минимальный коэф. запаса уже меньше единицы, чтобы найти разрушающие обороты, частоту вращения нужно снижать. Коэф. запаса по разрушающим оборотам при этом не определяют. В записке указывается, что он однозначно меньше допустимого.

Сделайте вывод. Если диск не проходит по разрушающим оборотам, по согласованию с преподавателем:


- либо осуществите доводку диска до нормативных запасов прочности, изменяя его форму и материал;
- либо приведите рекомендации по изменению конструкции диска.

2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛОПАТКИ

После курсового проектирования на кафедре “Теория двигателей”, Вы получаете газодинамические профили лопатки, которые и будут использованы для прочностного проектирования. Перо лопатки должно иметь оптимальную массу и удовлетворять требованиям Норм Прочности. Для этого требуется проведение многократных последовательных расчетов, которые возможно оптимизировать с помощью параметрической модели.

2.1 Подготовка исходных данных для геометрической модели

Запустите приложение «T-FLEX CAD».

Выберите в окне приветствия (или в меню Файл - Создать) окно «Создать новый документ», далее выберите вкладку «Детали и сборки» и создайте «3D деталь» ; Появится вкладка с названием «3D Деталь ...» с отображением рабочих плоскостей и древа построения.

Выберите в меню Файл – Сохранить как. В окне сохранения выберите созданную ранее рабочую папку и в поле *Имя файла* впишите название создаваемой детали, например, «Лопатка».

Лопатку при моделировании твердого тела можно строить в двух вариантах: по трем сечениям – втулке, среднему сечению и периферии для длинных лопаток, и по одному сечению для коротких, например, в турбине ТНА. Для этого необходимо задать геометрические параметры 3D-профилей. Предложенная ниже методика построения необходима для того, чтобы при изменении относительной толщины профиля он не искажался и газодинамически максимально соответствовал исходному профилю.

Между корытцем и спинкой постройте касательно к сплайнам окружности таким образом, чтобы профиль описывался максимально точно, как показано на рис. 2.1. Для этого обычно достаточно 9-12 окружностей.

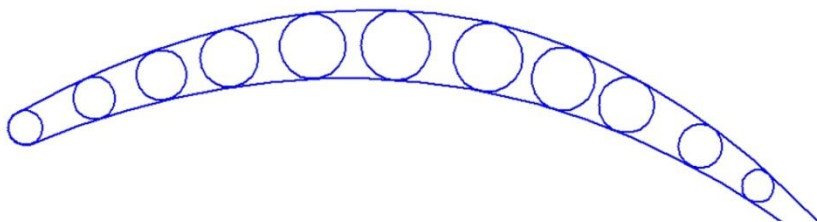
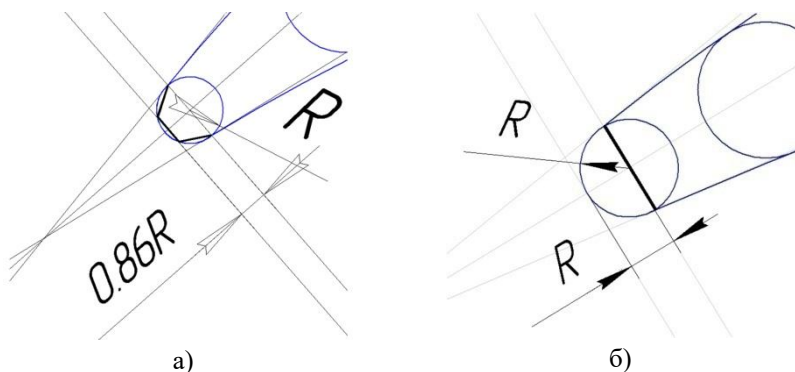


Рисунок 2.1 – Профиль лопатки с вписанными окружностями

Кромки лопатки моделируйте упрощенно, заменяя радиусный переход на прямые согласно рисунку 2.2.



а)

б)

а) для турбины; б) для компрессора

Рисунок 2.2 – Методика представления кромок для формирования модели

Затем снимите координаты точек трапеции и пересечения сплайновых линий с окружностями и занесите в таблицу координат (см. табл. 2.1), как показано на рис. 2.3. Координату Z для крайних сечений выберите как на рисунке 2.4. RZW – расстояние от оси вращения до втулочного сечения, RZP – расстояние от оси вращения до периферийного сечения, $H = RZP - RZW$ – высота лопатки.

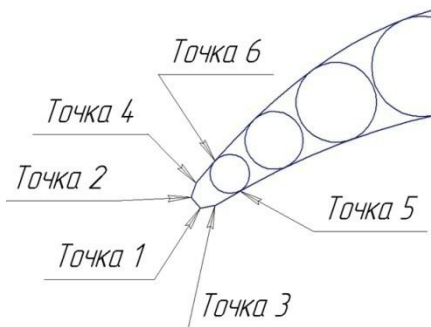


Рисунок 2.3 – Порядок записи точек в таблицу данных

При этом вычислите и углы раскрытия тракта GP и GW.

Формируя таблицу координат самостоятельно, учтите, что для последующего построения тела лопатки операцией «По сечениям», все 3D-профиля должны быть топологически одинаковы.




Т.е. иметь одинаковое количество точек и линий, одинаково соединённых, поскольку каждая точка одного 3D-профиля будет связана направляющей с соответствующей ей точкой другого 3D-профиля. Координаты точек, длины линий и формы сплайнов могут различаться.

2.2 Формирование геометрической модели лопатки


Воспользуйтесь инструментом «Переменные» . Создайте переменную delta1, равную 1,2. В поле «Единица измерения» не указывайте ничего, поскольку данная переменная безразмерная. Поставьте галочку в поле «Внешняя».

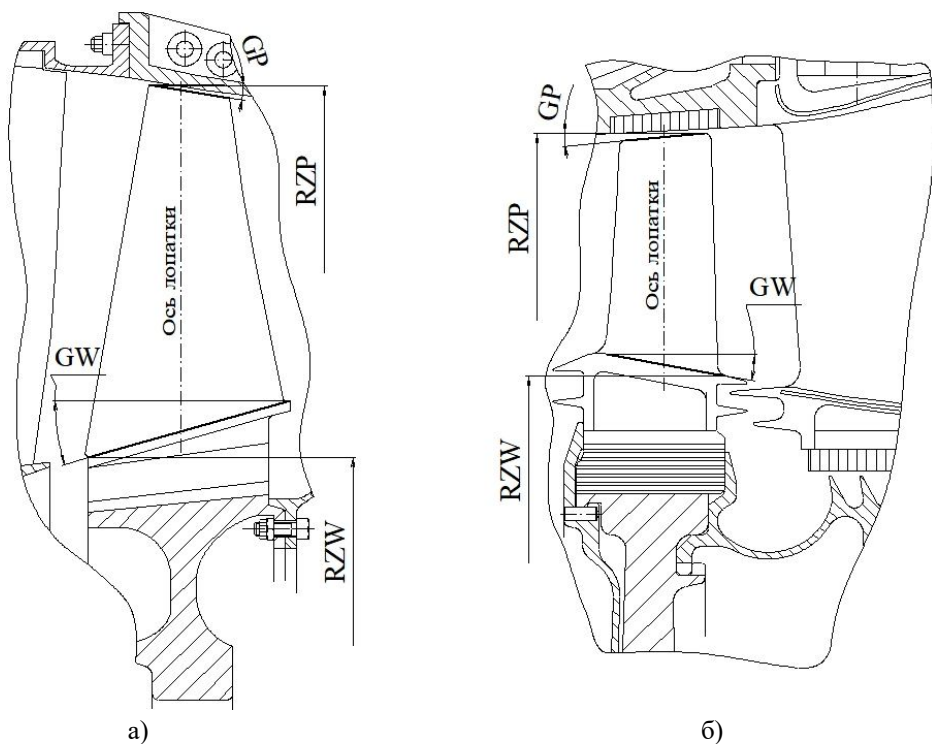
Создайте вспомогательный файл «3D деталь» . Выберите в меню Файл – Сохранить как. В окне сохранения выберите созданную ранее рабочую папку и в поле *Имя файла* впишите название создаваемой детали, например, «Втулочное сечение».

Начните чертить на рабочей плоскости «Вид сверху» файла «Втулочное сечение». Используя инструмент «Точка» панели «Эскиз» вкладки «Рабочая плоскость» (или «Чертёж»), создайте точки с координатами из таблицы 2.1 для первого профиля (втулочного сечения). Затем соедините точки спинки сплайном .

также сплайном  соедините точки корытца. Кромки сформируйте отрезками . Нажмите «Завершить»  на панели «Управление».

Для построения лопатки необходимо совместить центры тяжести сечений на одной оси. Совмещать удобнее на оси координат Z. Текущие координаты центра тяжести определяются следующим образом.

Вытолкните  созданный 3D-профиль. В поле «Прямое направление» укажите «Симметрично по общей длине». Длина может быть любой. Оставьте значение по умолчанию (10 мм).




а) для компрессора; б) для турбины

Рисунок 2.4 – Необходимые данные

о радиальном расположении профилей лопатки и углах раскрытия тракта

Таблица 2.1 – Координаты точек профилей

№ точки	X ₁ , мм	Y ₁ , мм	X ₂ , мм	Y ₂ , мм	X ₃ , мм	Y ₃ , мм
1	-30,294	3,58932	-17,729	23,7075	-28,456	1,7995
2	-30,595	2,18334	-18,270	23,1806	-28,549	1,1725
3	-27,000	3,45502	-15,721	21,9581	-24,954	1,4361
4	-27,484	0,96900	-16,578	21,1323	-25,088	0,4848
5	-23,000	3,16455	-12,715	19,2112	-19,948	1,0003
6	-23,584	-0,2606	-14,014	18,0014	-20,099	-0,3455
7	-18,000	2,85309	-8,3826	14,9591	-14,952	0,66291
8	-18,610	-1,5247	-10,230	13,3226	-15,091	-0,9910
9	-12,000	2,56092	-4,9309	11,2969	-9,9639	0,42287
10	-12,489	-2,6570	-7,1261	9,43193	-10,069	-1,4521
11	-6,0000	2,39344	-0,9770	6,76153	-4,9808	0,27942
12	-6,2751	-3,3625	-3,4517	4,76244	-5,0368	-1,7288
13	0	2,31456	2,77353	2,07409	0	0,2321
14	0,19080	-3,5882	0,15220	0,11382	0	-1,821
15	6,0000	2,29660	6,32152	-2,7648	4,98048	0,28082
16	6,24214	-3,3156	3,77121	-4,6246	5,03675	-1,7291
17	12,0000	2,35654	9,66673	-7,7554	9,96359	0,42567
18	12,4379	-2,5553	12,2986	-12,031	10,0688	-1,4528
19	18,0000	2,50633	15,2677	-17,302	15,0000	0,66852
20	18,5116	-1,3381	13,8401	-18,197	15,0912	-0,9921
21	23,0000	2,68349	12,2986	-12,031	20,0000	1,01001
22	23,4519	-0,0015	10,2977	-13,355	20,0994	-0,3468
23	27,0000	2,92911	15,2677	-17,302	25,0000	1,44544
24	27,3409	1,20312	13,8401	-18,197	25,0884	0,48311
25	30,6390	3,16751	18,3134	-23,328	28,4573	1,80773
26	30,7975	2,44432	17,7676	-23,654	28,5592	1,17246
Все	Z ₁ = 336,5 мм		Z ₂ = 405,75 мм		Z ₃ = 475 мм	

Чтобы узнать положение центра масс созданного тела, воспользуйтесь инструментом «Характеристики»  панели «Измерить» вкладки «Измерение». Кликните левой кнопкой мыши на тело. И в поле измерения появятся значения параметров для выбранного тела. Найдите и запишите значения X и Y центра масс. Координата Z центра масс будет равна нулю, поскольку по этой оси тело симметрично.

Далее прибавьте найденные значения X и Y центра масс к координатам каждой точки. Удобнее всего делать это в каком-либо табличном редакторе, например, MS.Excel.

Если лопатка строится по трём сечениям, то проделайте то же самое с периферийным и средним сечением. Координаты со смещением и величина сдвига для учебного примера приведены в табл. 2.2. Величина сдвига зависит от положения начальной системы координат. Для данной модели она сразу была расположена примерно в центре сечений, поэтому величина сдвига невелика.





Далее вернитесь к файлу «Лопатка». Воспользуйтесь инструментом «Плоскость»  панели «Построения» вкладки «3D-модель». Выберите в открывшемся окне опцию «Смещённая плоскость» . В качестве «Исходной плоскости» укажите рабочую плоскость «Вид сверху». В поле смещения укажите величину RZW (можно создать для неё переменную). В окне «Система координат рабочей плоскости» выберите «Глобальная система координат» . В поле «Имя» введите, например, «Втулочного сечения». Завершите создание рабочей плоскости . Она появится в древе построения модели в разделе «Рабочие плоскости».

Таблица 2.2 – Координаты точек профилей со смещением

№ точки	X ₁ , мм	Y ₁ , мм	X ₂ , мм	Y ₂ , мм	X ₃ , мм	Y ₃ , мм
1	-29,269	4,03036	-15,718	27,0274	-24,901	5,14212
2	-29,570	2,62438	-16,259	26,5005	-24,994	4,51512
3	-25,975	3,89606	-13,710	25,278	-21,399	4,77872
4	-26,459	1,41004	-14,567	24,4522	-21,533	3,82742
5	-21,975	3,60559	-10,704	22,5311	-16,393	4,34292
6	-22,559	0,18044	-12,003	21,3213	-16,544	2,99712
7	-16,975	3,29413	-6,3721	18,279	-11,397	4,00553
8	-17,585	-1,0836	-8,2195	16,6425	-11,536	2,35162
9	-10,975	3,00196	-2,9204	14,6168	-6,4091	3,76549
10	-11,464	-2,2159	-5,1156	12,7518	-6,5142	1,89052
11	-4,9754	2,83448	1,03345	10,0814	-1,426	3,62204
12	-5,2505	-2,9214	-1,4412	8,08234	-1,482	1,61382
13	1,02451	2,7556	4,78398	5,39399	3,5548	3,57472
14	1,21531	-3,1471	2,16265	3,43372	3,5548	1,52162
15	7,02451	2,73764	8,33197	0,5551	8,53528	3,62344
16	7,26665	-2,8745	5,78166	-1,3047	8,59155	1,61352
17	13,0245	2,79758	11,6771	-4,4355	13,5183	3,76829
18	13,4624	-2,1142	14,3090	-8,7111	13,6236	1,88982
19	19,0245	2,94737	17,2781	-13,982	18,5548	4,01114
20	19,5361	-0,8970	15,8505	-14,877	18,646	2,35052
21	24,0245	3,12453	14,3090	-8,7111	23,5548	4,35263
22	24,4764	0,43954	12,3081	-10,035	23,6542	2,99582
23	28,0245	3,37015	17,2781	-13,982	28,5548	4,78806
24	28,3654	1,64416	15,8505	-14,877	28,6432	3,82573
25	31,6635	3,60855	20,3238	-20,008	32,0121	5,15035
26	31,8220	2,88536	19,7780	-20,334	32,114	4,51508
Сдвиг	1,02451	0,44104	2,01045	3,31990	3,55480	3,34262
















Начните чертить  на рабочей плоскости «Втулочного сечения». Поставьте точки с новыми координатами. Затем соедините точки  спинки сплайном , также сплайном  соедините точки  корытца. Кромки сформируйте отрезками . Нажмите «Завершить»  на панели «Управление». Теперь центр координат будет совпадать с центром тяжести сечения, как показано на рис. 2.5.




Рисунок 2.5 – 3D-профиль лопатки после коррекции

Далее необходимо добавить возможность изменять толщину профиля параметром delta1. Для этого соедините противоположащие точки  на спинке и корытце поперечными отрезками , поставив галочку «Вспомогательная линия». Осторожнее обращайтесь с точками , поскольку они могут свободно передвигаться. Имейте копию файла с правильным профилем.

Затем поставьте точки  в серединах этих отрезков, а также отрезков на кромках. Зафиксируйте точки середин отрезков ограничением  «Фиксация» , поскольку они не должны смещаться. Не обращайте внимания на ошибки. Выберите «Добавлять новые ограничения».

Затем последовательно соедините все точки середин отрезков вспомогательными продольными отрезками  (или прямыми ), как показано на рис. 2.6. Затем задайте угловые размеры $\frac{5}{4}$ между продольными и поперечными отрезками. При изменении толщины лопатки эти углы изменяться не будут.

Наконец, задайте расстояния между парными точками на спинке и корытце лопатки, умножив их на переменную delta1. Завершите создание 3D-профиля . Сохраните документ .

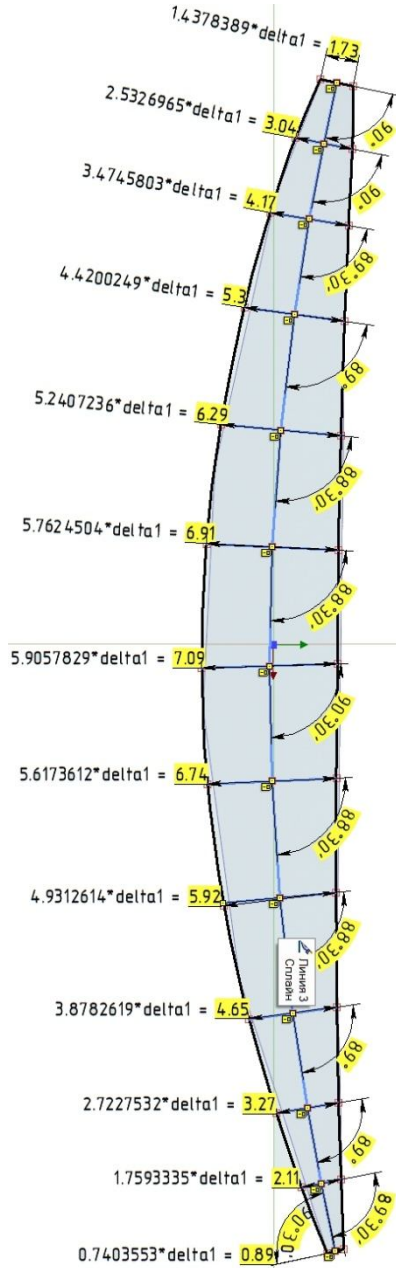













Рисунок 2.6 – 3D-профиль лопатки с центральными точками

Изменяя значение переменной delta1 (нажимайте «Применить» в окне «Редактора переменных», чтобы геометрия 3D-профиля перестраивалась), наблюдайте, правильно ли изменяется геометрия. Верните переменной delta1 значение 1,2. Сохраните документ .


Если лопатка строится по нескольким 3D-профилям, то аналогично создайте рабочие плоскости «Среднего сечения» и «Периферийного сечения». А затем добавьте 3D-профиля среднего и периферийного сечения на соответствующие плоскости. Центры тяжести всех трёх профилей должны лежать на оси Z .

Далее воспользуйтесь инструментом «По сечениям»  панели «Операции» вкладки «3D модель». Укажите последовательно 3D-профиля сечений пера лопатки (втулочное → среднее → периферийное). Они добавятся на вкладку «Сечения» вкладки «Основные параметры». Далее нужно указать начальные точки для каждого сечения (они подсвечиваются на экране жёлтыми квадратами ) , причём на каждом сечении они должны находиться в одном месте. Если это не так, перейдите на вкладку «Соответствия» и укажите для каждого сечения начальную точку  самостоятельно. Также у каждого сечения есть направление (наружу и внутрь). Оно обозначается стрелкой  . Они также должны быть направлены одинаково. Изменить направление сечения можно щелчком на стрелке .




Для короткой лопатки, с одинаковой толщиной по высоте и без закрутки, такой как в турбине ТНА, можно вытолкнуть  профиль вверх на высоту лопатки H .


Начертите  на рабочей плоскости «Вид сверху» отрезок  , совпадающий с осью Y . В дальнейшем он будет играть роль оси вращения. Завершите создание 3D-профиля  . Сохраните документ .


2.3 Формирование конечно-элементной модели лопатки

Откройте окно управления материалами детали . На вкладке «Документ» окна материалы в поле «Имя» должен находиться материал «Сталь», из которого сделаны все тела детали по умолчанию. Кликните на название материала «Сталь». Далее перейдите на вкладку «Физические свойства». Введите свойства материала лопатки из задания. Например, задайте в поле «Плотность» 7800 кг/м^3 , в поле «Коэффициент Пуассона» $0,3$, в поле «Модуль упругости» $200000000000 \text{ Н/м}^2$, в поле «Предел текучести» 850000000 Н/м^2 .

Давления на корытце лопатки обычно вычисляются для четырех участков, так как в курсовой работе по ТРЛМ рассчитываются пять сечений. Их может быть как меньше, так и больше. От одного участка для лопатки турбины ТНА до 20 участков для больших лопаток вентиляторов.

Создайте рабочие плоскости  на заданных расстояниях по оси Z, например, смещением  рабочей плоскости «Вид сверху». Можно использовать ранее созданные рабочие плоскости  сечений пера лопатки.

Разделение можно проводить любым известным методом. Например, через 3D-профиля. В каждой из рабочих плоскостей создайте 3D-профиль в виде длинного отрезка , проходящего перед корытцем лопатки, как показано на рис. 2.7.

Разделите корытца лопатки на поверхности заданной высоты, используя инструмент «Разделение граней» . Выберите метод разделения «Проецирование по нормали». В поле «Разделяемые объекты» укажите нужную грань корытца лопатки, а в поле «Разделяющие объекты» укажите нужный 3D-профиль. При необходимости выберите метод «Проецирование по направлению» и укажите в поле «Направление» нужную рабочую плоскость. В данной модели это «Вид слева».

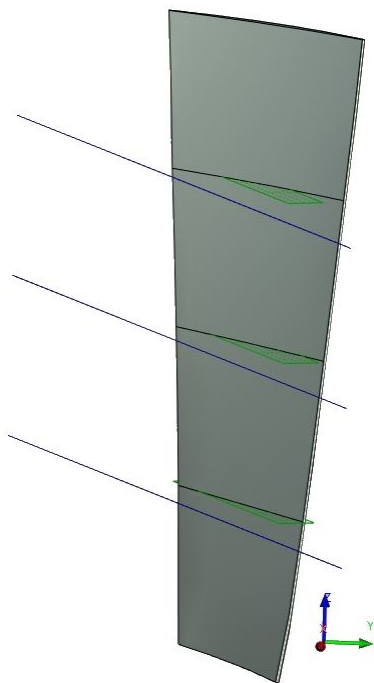







Рисунок 2.7 – 3D-профиля для разделения корытца лопатки

Для разбиения геометрии лопатки сеткой конечных элементов перейдите на вкладку «Анализ». Выберите пиктограмму «Создать задачу»  на панели «Задача». И в выпадающем списке выберите «Конечно-элементный анализ» . На вкладке «Задача» в поле «Тип» выберите «Статическая прочность» . Добавьте в окно «Элемент» тело лопатки. Завершите создание задачи . Автоматически откроется окно создания сетки конечных элементов. Для разбивки используется конечный элемент «Тетраэдр». При наличии больших вычислительных мощностей можно использовать конечный элемент «Криволинейный тетраэдр».

Убедитесь, что в поле размер выбран параметр «Относительный» и выставьте его значение на 0,01. Значения остальных параметров оставьте по умолчанию. Завершите создание сетки . Ориентировочный вид сетки показан на рис. 2.8.

2.4 Формирование нагрузок и граничных условий

Выполните расчёт газовой нагрузки. А именно, значения давлений на четырех участках лопатки и направляющие косинусы для указания направления действия давления.

Погонная окружная нагрузка равна:

$$P_{Г.У.i} = \frac{-2 \cdot \pi \cdot R_i \cdot c_{1ai} \cdot \rho_{1i} \cdot (c_{2ui} - c_{1ui})}{Z_{Л}}$$

Погонная осевая нагрузка равна:

$$P_{Г.а.i} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_i \cdot [(P_{1i} - P_{2i}) + \rho_{1i} \cdot c_{1ai}^2 - \rho_{2i} \cdot c_{2ai}^2]}{Z_{Л}} ;$$

$Z_{Л}$ – число лопаток.


Суммарная погонная нагрузка равна:

$$P_{Г.П.i} = \sqrt{P_{Г.а.i}^2 + P_{Г.У.i}^2}$$

Определите направляющие косинусы для приложения нагрузки:

$$\cos(\alpha) = P_{Г.а.i} / P_{Г.П.i}$$

$$\cos(\beta) = P_{Г.У.i} / P_{Г.П.i}$$

Определите значения давлений, действующих на каждый участок лопатки. Для этого необходимо знать длину сплайна b_i , моделирующего корытце на нужном участке. Её можно измерить, используя инструмент «Измерить»  панели «Измерить» вкладки «Измерение».

Затем вычисляется давление на поверхность:

$$P_i = P_{Г.П.i} / b_i$$

Значения давлений и направляющих косинусов по участкам для данной модели сведены в табл. 2.3, где Z – координата начала участка. Модель лопатки с нагрузками и закреплениями показана на рис. 2.8.

Таблица 2.3 – Параметры газовой нагрузки

№ сечения	Z , мм	P_i , кПа	$\cos\alpha$ к X	$\cos\beta$ к Y
1	336,500	300	-0,578	0,816
2	371,125	270	-0,612	0,861
3	405,750	230	-0,723	0,874
4	440,375	200	-0,903	0,916

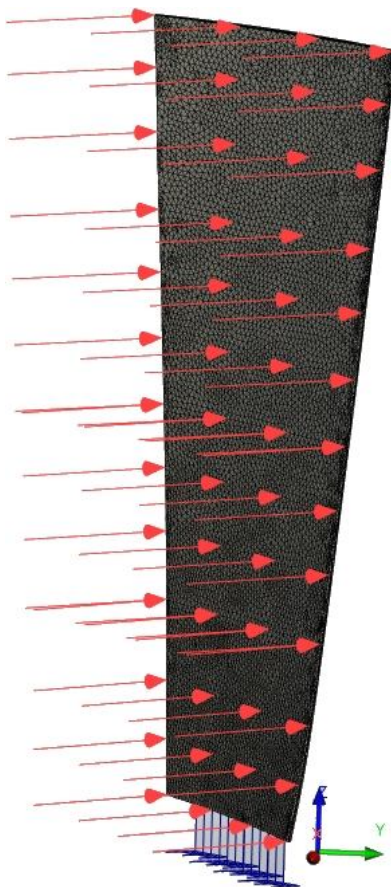









Рисунок 2.8 – КЭ модель пера лопатки с граничными условиями


Воспользуйтесь инструментом «Давление»  (подменю инструмента «Сила» ) панели «Условия» вкладки «Анализ». Выберите нужный участок корытца лопатки. Тип нагрузки «Равномерная». В поле «Значение» введите величину давления на данном участке. В окне «Направление» уберите галочку «По нормали» и задайте значения направляющих косинусов. Завершите создание давления .

Исходя из значений косинусов, проверьте направление действия давления. Оно должно быть от корытца к спинке. В случае несогласованности систем координат, в которой построена лопатка, и в которой рассчитывалась нагрузка, это может быть нарушено. В таком случае допускается изменить знаки косинусов.

Воспользуйтесь инструментом «Вращение» . Выберите перо лопатки, созданный выше отрезок (совпадающий с осью Y) в качестве оси вращения и в поле «Угловая скорость» введите значение угловой скорости из задания.

В выпадающем списке инструмента «Закрепление»  на панели «Условия» вкладки «Анализ» выберите «Полное закрепление» . Укажите нижнюю (втулочную) поверхность лопатки. Завершите создание закрепления .

2.5 Расчет напряженно-деформированного состояния

Воспользуйтесь инструментом «Расчёт» . В поле «Метод расчёта» оставьте «Автоматический выбор». В поле «Тип элемента» выберите «Линейная интерполяция». Остальные параметры оставьте по умолчанию. Нажмите «ОК». В открывшемся окне «Результаты» выберите нужные параметры. Прежде всего это суммарные перемещения, эквивалентные напряжения и коэф. запаса.

2.6 Визуализация результатов расчёта

Откройте подпапку «Результаты» папки «Задача_1 (Статическая прочность)». Выведите картины распределения суммарных перемещений, эквивалентных напряжений и коэф. запаса по статической прочности. Сделайте скриншоты. Занесите в отчёт максимальные значения. Сравните полученное значение максимального коэф. запаса с допустимыми (минимальный 1,6, максимальный 3). Сделайте вывод о прочности. Если нормы прочности не удовлетворяются, по согласованию с преподавателем:


- либо осуществите доводку лопатки до нормативных запасов прочности, изменяя его форму и материал;
- либо приведите рекомендации по изменению конструкции лопатки.


2.7 Расчет частот колебаний лопатки

При расчете точек для построения резонансной диаграммы необходимо учитывать эффект влияния нагружения лопатки центробежными и газодинамическими силами, а также воздействие температуры. Температурное воздействие учитывается изменением свойств материала. Точки диаграммы строятся, исходя из допущения, что газодинамические нагрузки и температура рабочего тела, измеряются линейно по оборотам.

Сам расчет ведется в два этапа. На первом проводится статический расчет с включенной опцией расчета нагружения. Затем задается тип расчета – модальный.

Для проведения расчёта кликните на задачу по расчёту статической прочности лопатки в древе построения модели правой кнопкой мыши и выберите в выпадающем списке «Копировать задачу». В параметрах копирования задачи выберите «Создать независимую копию сетки». Кликните на созданную копию, чтобы сделать данную задачу активной. Затем кликните на неё правой

кнопкой мыши и выберите пункт «Изменить». Измените тип задачи на «Собственные частоты» .

Воспользуйтесь инструментом «Расчёт» . В поле «Метод расчёта» оставьте «Автоматический выбор». В поле «Тип элемента» выберите «Линейная интерполяция». В поле «Количество собственных частот» укажите заданное преподавателем значение, например, «10». Остальные параметры оставьте по умолчанию. Нажмите «ОК». В открывшемся окне «Результаты» выберите «Относительные перемещения, модуль».

Откройте подпапку «Результаты» папки «Задача_2 (Собственные частоты)». Занесите в отчёт таблицу полученных частот. Проанализируйте формы колебаний согласно заданию. Добавьте нужные формы в отчёт.

Переведите частоту вращения рабочего колеса в Гц. Сравните её с собственными частотами. Если частота вращения совпадает с собственной частотой с расхождением менее 5%, то такая собственная частота является опасной.

Далее умножьте частоту вращения на число лопаток рабочего колеса. Такая частота называется кратной. Сравните кратную частоту с собственными частотами. Если кратная частота совпадает с собственной частотой с расхождением менее 5%, то такая собственная частота также является опасной.

Выполните исследование зависимости первой собственной частоты лопатки от её толщины. Толщина лопатки изменяется переменной δ_1 в диапазоне от 1 до 2,2 с шагом в 0,2. Постройте график исследуемой зависимости. Сделайте выводы.

Есть ли у лопатки опасные частоты?

Используя результаты исследования, выполните частотную отстройку, либо укажите, что опасные частоты не обнаружены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе изучен процесс прочностного моделирования рабочего колёса ГТД (ТНА) в T-FLEX. Для удобства отдельно рассчитаны лопатка и диск рабочего колеса. Однако, используя данную методику можно рассчитывать рабочее колесо целиком, что особенно актуально, когда они выполнены как единое целое (блиск).

Рассмотрены все этапы моделирования:

- создание частично параметризированной геометрии;
- задание свойств материалов;
- назначение материалов телам;
- построение сетки конечных элементов;
- задание граничных условий (связей и закреплений);
- проведение расчёта собственных форм и частот;
- проведение расчёта перемещений и напряжений;
- проведение расчётов коэф. запаса;
- анализ результатов (заключение о соблюдении норм прочности, мероприятия по изменению конструкции, частотная отстройка, исследование влияния геометрии лопатки на опасную собственную частоту, поиск разрушающих оборотов)

Используя полученные знания и навыки работы в T-FLEX CAD и Анализ, возможно выполнить расчёт собственных форм и частот, напряжений и деформаций рабочих колёс ГТД и ТНА.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лабораторный практикум по динамике и прочности авиационных ГТД с использованием пакета ANSYS. Часть 1: учеб. пособие ; учеб. пособие / А. И. Ермаков, А. М. Уланов. – Самара : Издательство СГАУ, 2006. – 126 с.

2. Мелентьев В. С. Порядок выполнения расчётной работы по дисциплине «Основы метода конечных элементов» : электрон. метод. указания / В. С. Мелентьев, А. С. Гвоздев, А. М. Уланов. – Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т), 2013. – Электрон. и граф. дан. (10,6 Мбайт). – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

3. T-FLEX Анализ: статические прочностные расчёты конструкций: метод. указания / сост. Т.Г. Костюченко, А.А. Игнатовская. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – 32 с.: ил.

4. Моделирование и расчёт методом конечных элементов: лаб. практ. / сост. Т.Г. Кличенков. – Владимир: Изд-во Владимирского государственного университета, 2013. – 38 с.: ил.

5. Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей / Под ред. Д.В.Хрони́на. – М.: Машиностроение, 1989. – 568 с.

6. Уланов А. М. Расчёт прочности авиационных двигателей : электрон. учеб. пособие / А. М. Уланов – Самара : Изд-во Самарского университета, 2017. – Электрон. и граф. дан. (8,91 Мбайт). – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).