

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ  
КОЛЕБАНИЙ  
РОТОРА ТУРБОМАШИНЫ  
В T-FLEX Анализ

Методические указания

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

САМАРА  
Издательство Самарского университета  
2024

УДК 629.7.036.3

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

Рецензент к-т техн. наук, доц. *Л. В. Родионов*

**Моделирование колебаний ротора турбомашин в T-FLEX Анализ:** метод. указания / сост. *В.С. Мелентьев, А.С. Гвоздев, А.М. Уланов.* – Самара: Изд-во Самарского университета, 2024. – 73 с.: ил.

Предложено задание, направленное на изучение процесса моделирования динамики роторов газотурбинного двигателя или турбонасосного агрегата методом конечных элементов в инженерной системе «T-FLEX Анализ». Рассмотрены объёмная и оболочечная модели ротора. Приведён пример определения собственных частот и форм колебаний ротора, и выделения из них критических частот.

Методические указания предназначены для Института двигателей и энергетических установок и рекомендованы для обучения бакалавров (ФГОС-3+) по направлению подготовки 24.03.05 «Двигатели летательных аппаратов» в 6, 7, 8 семестрах по дисциплинам «Основы динамики и прочности», «Динамика и прочность двигателей», «Цифровые двойники в двигателестроении»; специалистов (ФГОС-3+, ОСУС) по направлению подготовки 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» в 8 семестре по дисциплине «Динамика и прочность авиационных двигателей».

Разработано на кафедре конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов.

© Самарский университет,  
2024

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ЗАДАНИЕ	5
2 ОБЪЁМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РОТОРА	8
2.1 Создание файла модели	8
2.2 Создание геометрии ротора	8
2.3 Частичная параметризация геометрии ротора	14
2.4 Подготовка КЭ модели и проведение модального расчёта	22
3. ОБОЛОЧЕЧНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РОТОРА	30
3.1 Создание оболочечной геометрии ротора	30
3.2 Подготовка оболочечной КЭ модели и проведение модального расчёта	37
ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ	40
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	41
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	42
ПРИЛОЖЕНИЕ. Варианты 1-30	43

## ВВЕДЕНИЕ

Знание критических частот вращения ротора очень важно для обеспечения вибрационной прочности авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и турбонасосных агрегатов (ТНА) ракетных двигателей. В современной практике конструирования для расчёта критических частот вращения ротора применяется метод конечных элементов и основанные на нем пакеты программ, в частности, T-FLEX Анализ. Основываясь на знаниях, полученных при изучении пакета T-FLEX Анализ, курсов по основам метода конечных элементов, по динамике и прочности авиационных ГТД или ТНА, студент может построить конечно-элементные модели ротора, рассчитать его критические частоты вращения и исследовать влияние на эти частоты различных параметров конструкции ротора. Применение различных типов конечных элементов (объёмных и оболочечных) способствует как более глубокому пониманию метода конечных элементов и пакета программ T-FLEX Анализ, так и повышению точности расчётов.

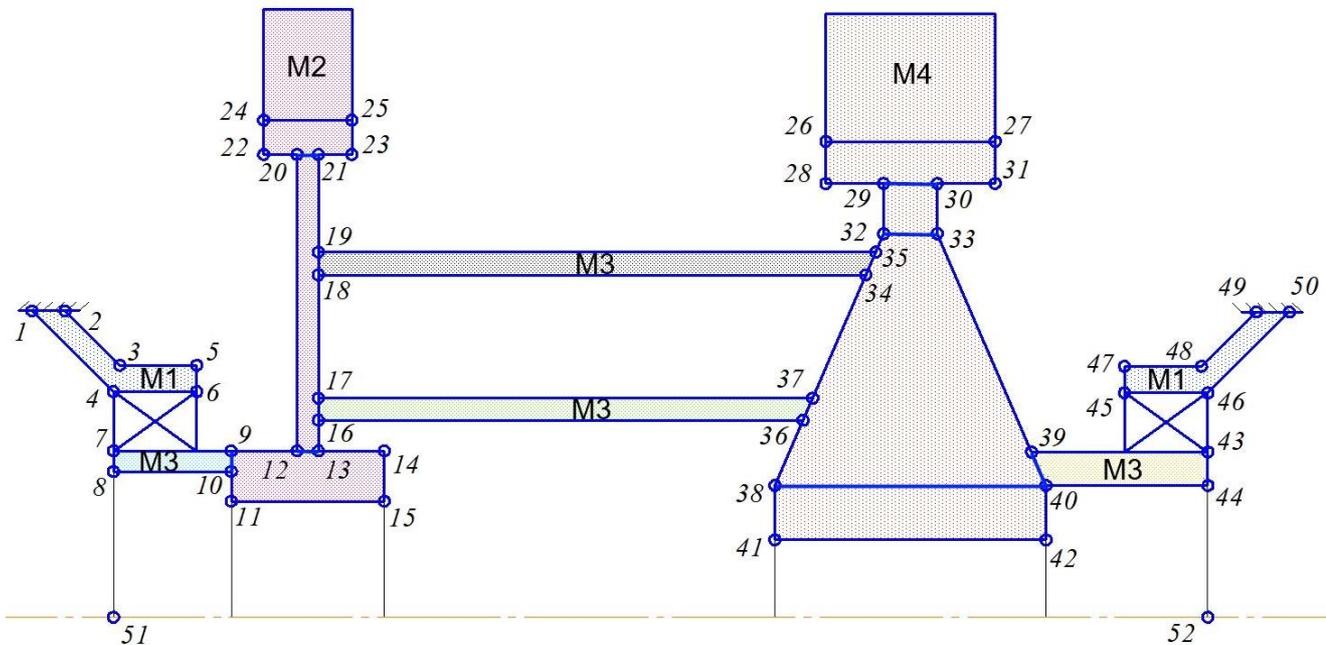
T-FLEX Анализ (аналог ANSYS Mechanical, Nastran) использует метод конечных элементов и позволяет рассчитать деформацию конструкции и напряжения в ней, в том числе и в движении. С помощью T-FLEX CAD быстро создается полностью параметризованная модель изделия. Также геометрия может быть импортирована из популярных CAD-систем.

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 ЗАДАНИЕ

1. Построить объёмную и оболочечную конечно-элементные модели ротора в пакете T-FLEX Анализ согласно своему варианту и рассчитать его первые три критические частоты вращения. Варианты геометрических параметров ротора заданы в Приложении. Пример задания приведен на рис. 1.1. Пример моделирования описан в разделах 2 (объёмная модель ротора) и 3 (оболочечная модель ротора).

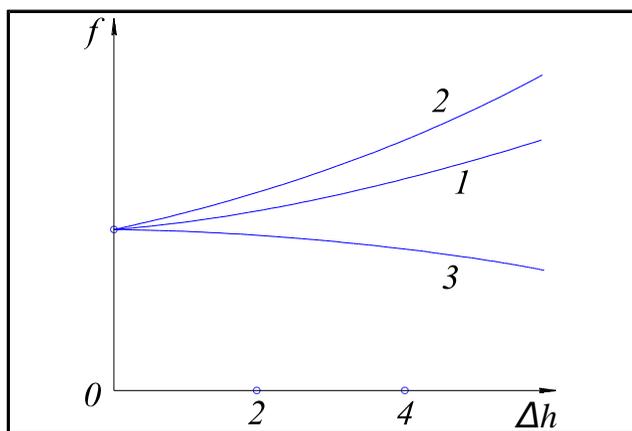
2. Описать построение геометрии модели, применяемые конечные элементы и граничные условия. Привести собственные частоты найденных изгибных форм колебаний и сами формы. При выводе форм ротор расположить в плоскости OXY.



M1, M2, M3, M4 – номера материалов деталей

Рисунок 1.1 - Пример варианта геометрических параметров ротора

3. Провести исследование влияния на первую и вторую критическую частоту вращения ротора жёсткости его отдельных участков: проставок (валов), носков вала и опор. Жёсткости участков изменяются за счёт увеличения или уменьшения их толщин. Расчёты выполняются для двух увеличений толщины каждого участка отдельно ( $\Delta h_1 = 2$  мм,  $\Delta h_2 = 4$  мм). Результаты расчёта оформить в виде таблицы и графика (рис.1.2). Сделать вывод о влиянии жёсткости валов и податливости опор на величины критических частот вращения.



1, 2, 3 – номера проставок

Рисунок 1.2 - Графики зависимости резонансной частоты от толщины проставок

## 2 ОБЪЁМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РОТОРА

### 2.1 Создание файла модели

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

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, «Ротор 3D»;

### 2.2 Создание геометрии ротора

Поскольку ротор является составной конструкцией, собранной из отдельных деталей, выполненных из разного материала, при создании его модели необходимо детали из разных материалов создавать в виде отдельных тел.

Из таблицы 2.1 возьмите координаты точек 1, 2, 3, 4, 5, 6, относящихся к опорам, сделанным из материала 1 (см. рис. 1.2). Координата Z для всех точек здесь и далее равна нулю.

Выберите плоскость «Вид сверху» и создайте на ней 3D-профиль одной опоры, используя команду «Чертить»  панели 3D Модель. Используйте один из изученных ранее методов, например, через вспомогательные прямые , как показано на рис. 2.1. Добавьте осевую линию . При необходимости используйте размеры . Нажмите «Завершить»  на панели «Управление».

Таблица 2.1 - Координаты точек для построения поперечного сечения ротора

№ точки	Координаты		№ точки	Координаты	
	X, мм	Y, мм		X, мм	Y, мм
1	470,3	135,1	26	-265,4	266,2
2	438,8	135,1	27	-345,4	266,2
3	387,8	110,3	28	-265,4	241,2
4	387,8	95	29	-290,4	241,2
5	347,8	110,3	30	-320,4	241,2
6	347,8	95	31	-345,4	241,2
7	387,8	80	32	-290,4	231,2
8	387,8	65	33	-320,4	231,2
9	257,8	80	34	-286,4	216,2
10	257,8	65	35	-285,2	211,2
11	257,8	50	36	-260,5	116,2
12	240,3	80	37	-259,2	111,2
13	225,3	80	38	-255,4	76,6
14	207,8	80	39	-353,4	96,2
15	207,8	50	40	-355,4	76,6
16	225,3	111,2	41	-255,4	56,2
17	225,3	116,2	42	-355,3	56,2
18	225,3	211,2	43	-525,3	96,2
19	225,3	216,2	44	-525,3	76,6
20	240,3	251,2	45	-485,3	111,2
21	225,2	251,2	46	-525,4	111,2
22	257,8	251,2	47	-485,3	126,5
23	207,8	251,2	48	-525,4	126,5
24	257,8	266,2	49	-576,3	151,2
25	207,8	266,2	50	-607,8	151,2

Создайте тело операцией «Вращение» панели «Операции». Угол поворота составляет 360 градусов. В качестве оси вращения используйте созданную осевую линию.

Аналогично постройте вторую опору по точкам 45, 46, 47, 48, 50. Поскольку на рабочей плоскости «Вид сверху» уже существует 3D профиль первой опоры, нужно разделить элементы построения (линии), относящиеся к разным телам. Для этого контуры разных 3D профилей нужно окрасить в разные цвета, используя инструмент «Цвет»  панели «Стиль» вкладки «Рабочая плоскость». По умолчанию выбран чёрный цвет . Измените цвет на любой другой. Постройте 3D профиль второй опоры. После завершения черчения  появится диалоговое окно с вопросом «Создать для каждого цвета линий изображения отдельный профиль?». Выберите ответ «Да». Создайте тело операцией «Вращение» . Переименуйте полученные тела согласно таблице 2.2.

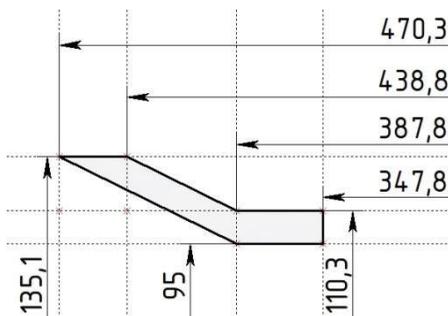


Рисунок 2.1 – 3D-профиль первой опоры

Таблица 2.2 - Номера ключевых точек для построения 3D-профилей, составляющих поперечное сечение ротора

Номера			Наименование тела
3D-профиля	ключевых точек	материала	
1	1, 2, 3, 4, 5, 6	1	Первая опора (левая)
2	45, 46, 47, 48, 49, 50	1	Вторая опора (правая)
3	9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 20, 21, 22, 23, 24, 25	2	Диск компрессора
4	7, 8, 9, 10	3	Носок вала компрессора
5	16, 17, 36, 37	3	Проставка меньшего диаметра
6	18, 19, 34, 35	3	Проставка большего диаметра
7	39, 40, 43, 44	3	Носок вала турбины
8	26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37 38, 39, 40, 41, 42	4	Диск турбины

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». Кликните на название скопированного материала и измените его имя на «1 Материал опор» на вкладке «Вид». Далее перейдите на вкладку «Физические свойства» и отредактируйте поля «Плотность», «Модуль упругости» и «Коэффициент Пуассона» согласно таблице 2.3. Аналогично создайте оставшиеся четыре материала. Сохраните документ .

Таблица 2.3 – Свойства материалов

Номер и название материала	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Модуль упругости, Н/м <sup>2</sup>	Коэффициент Пуассона
1 Материал опор	7600	$2 \cdot 10^{11}$	0,3
2 Материал РК компрессора	4500	$1,2 \cdot 10^{11}$	0,3
3 Материал валов	7800	$2 \cdot 10^{11}$	0,3
4 Материал РК турбины	8000	$2 \cdot 10^{11}$	0,3
5 Материал жёстких тел	0,1	$2 \cdot 10^{15}$	0,3

Кликните два раза на теле «Первая опора» в древе построения модели (или воспользуйтесь любым другим способом), чтобы открыть окно параметров тела. В поле «материал» выберите  материал «1 Материал опор». Аналогично выберите материал 1 для второй опоры.

Продолжайте создавать  тела вращения , переименовывать их и назначать материалы согласно рис. 1.2 и таблицам 2.2 и 2.3. При создании 3D-профилей создавайте отдельные отрезки  для мест присоединения валов. Например, линия 1-21 должна состоять из пяти отрезков : 13-16, 16-17, 17-18, 18-19, 19-21. Для подшипников выберите материал «5 Материал жёстких тел». Подшипники в данном случае являются

просто связью между ротором и статором, поэтому их масса принимается равной нулю (через околонулевую плотность), а жёсткость должна быть на несколько порядков выше, чем у соединяемых деталей, чтобы оказывать минимальное влияние на их собственные формы. Сохраните документ .

Для создания лопатки компрессора начертите  3D-профиль на передней поверхности обода диска компрессора, образованной поворотом вокруг оси ротора линии 22-24 (см. рис. 1.2). Высота лопатки составляет 100 мм (расстояние от центра ротора до конца лопатки 366,2 мм, см. рис. 2.2), а толщина 6 мм (по 3 мм вправо и влево от оси). Чтобы привязываться к вспомогательным прямым (а не только к точке их пересечения), на панели выбора должна быть активна пиктограмма «Точка на линии построения» . Лопатка в нижней части касается кромки диска по дуге окружности. Вытолкните  3D-профиль до поверхности  (в поле «Прямое направление») с другой стороны обода диска.

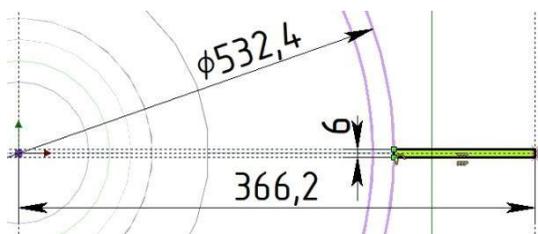


Рисунок 2.2 – 3D-профиль лопатки компрессора

Переименуйте тело лопатки как «Лопатка компрессора» и задайте ей материал «2 Материал РК компрессора». Создайте круговой массив  с равным шагом из четырёх лопаток, как показано на рис. 2.3. Переименуйте его как «Лопатки компрессора».

Аналогично создайте лопатку турбины, а затем круговой массив из четырёх лопаток, начертив 3D-профиль на передней

поверхности обода диска турбины, образованной поворотом вокруг оси ротора линии 26-28 (см. рис. 1.2). Высота лопатки составляет 120 мм (расстояние от центра ротора до конца лопатки 386,2 мм), а толщина 8 мм (по 4 мм вправо и влево от оси). Используйте материал «4 Материал РК турбины». Сохраните документ .

### 2.3 Частичная параметризация геометрии ротора

Убедившись, что исходная геометрия ротора соответствует заданию, выполните её частичную параметризацию. Т.е. добавьте возможность через таблицу параметров изменять толщины опор и валов для выполнения пункта 3 задания. Сначала воспользуйтесь инструментом «Переменные»  панели «Параметры». В открывшемся окне «Редактор переменных» выберите инструмент «Новая переменная» . Введите имя переменной, которое должно начинаться с буквы (а не цифры) и не иметь пробелов (можно использовать вместо пробела нижнее подчёркивание), например, «Утолщение\_опоры\_1». Укажите тип «Вещественная». В поле «Выражение» введите число ноль. 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».

Создайте аналогично ещё переменные по количеству параметризуемых тел. В данном случае ещё пять: для второй опоры (Утолщение\_опоры\_2), носка вала компрессора (Утолщение\_НВК) и турбины (Утолщение\_НВТ) и двух проставок (Утолщение\_Проставки\_1, Утолщение\_Проставки\_2).

Далее необходимо связать созданные переменные с геометрией модели. Найдите в древе построения 3D-профиль левой опоры, нажмите на него правой кнопкой мыши и выберите «Редактировать профиль» . Изменять требуется толщину наклонного участка. Если опора построена по точкам или

вспомогательным прямым, её нужно отредактировать. Для этого удалите верхние и вертикальные отрезки 3D-профиля, как показано на рис. 1.6. Оставьте только нижний наклонный (поз.1), горизонтальный (поз.2) и правый вертикальный (поз. 3) отрезок. Их положение меняться не будет. Постройте отрезок , параллельный наклонному отрезку (поз.4). Не забывайте соблюдать цвет линий  данного 3D-профиля.

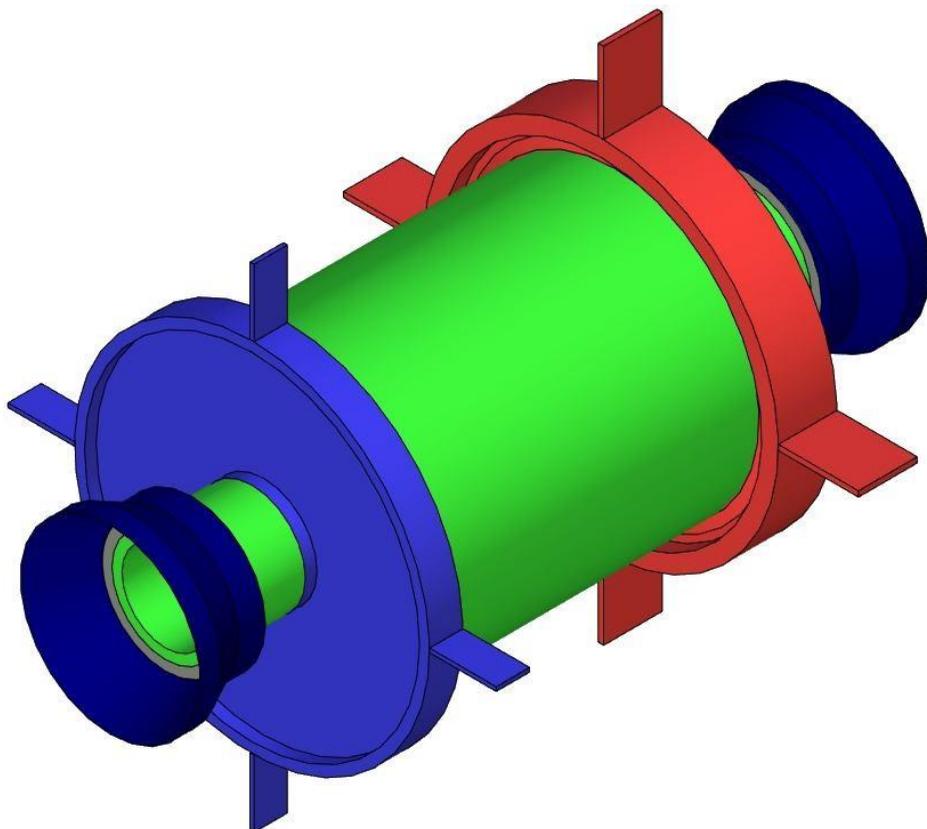


Рисунок 2.3 – Геометрия ротора с опорами

Задайте размер между отрезками поз 1 и поз. 4, равный сумме исходной толщины участка опоры (13,760601 мм) и значению

переменной «Утолщение\_опоры\_1». Проверить расстояние можно, используя инструмент «Измерить»  панели «Измерить» вкладки «Измерение». В свойствах инструмента  выберите «Измерить отношение между двумя элементами» . Постройте горизонтальные отрезки (поз. 5 и 6), как показано на рис. 2.4.

Воспользуйтесь инструментом «Обрезка» , чтобы отрезать выступающие части отрезков поз. 4, 5 и 6, как показано на рис. 2.5. Завершите редактирование . Изменяя значение переменной «Утолщение\_опоры\_1» (нажимайте «Применить» в окне «Редактора переменных», чтобы геометрия опоры перестраивалась), наблюдайте, правильно ли изменяется геометрия опоры. Для этого удобно использовать «Рёберное изображение»  с вкладки «Вид». Сохраните модель .

Аналогично отредактируйте вторую (правую) опору, используя переменную «Утолщение\_опоры\_2». Исходная толщина для неё составляет 13,756114 мм.

Далее отредактируйте  3D-профиль носка вала компрессора. Он должен утолщаться вниз. Поэтому удалите все линии, кроме верхней (поз.1 на рис. 2.6) (нижнюю горизонтальную и обе вертикальные). Постройте линию, параллельную верхней (поз.2), а затем две вертикальные (поз.3 и 4). Задайте размер между отрезками поз. 1 и поз. 2, равный сумме исходной толщины носка вала компрессора (15 мм) и значению переменной «Утолщение\_НВК». Обрежьте  выступающие части отрезков. Передвиньте концы двух отрезков (поз. 5 и 6) 3D-профиля ступицы диска компрессора, чтобы точки на их концах совпали с правой точкой на отрезке поз. 2 (обведена на рис 2.6).

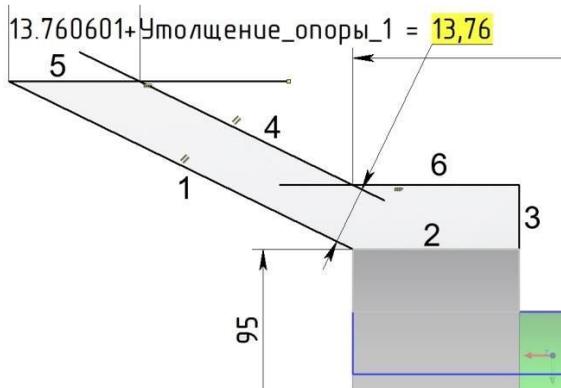


Рисунок 2.4 – Редактирование 3D-профиля левой опоры

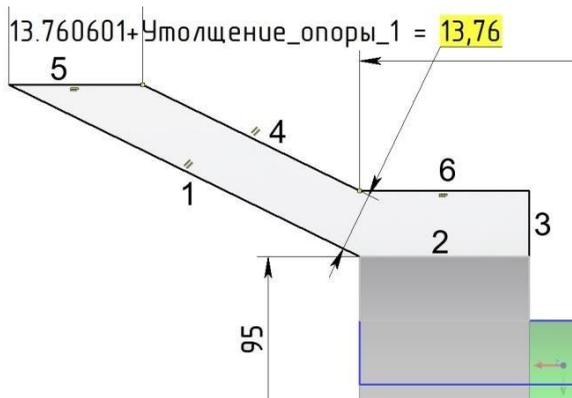


Рисунок 2.5 – Параметризированный 3D-профиль левой опоры

Далее отредактируйте носок вала турбины, используя переменную «Утолщение\_НВТ». Носок вала турбины соприкасается с диском турбины по наклонному отрезку (поз. 1 на рис. 2.5), внизу переходящему в вертикальный отрезок (поз. 2). Поэтому утолщение носка вала турбины вниз (по внутреннему диаметру) приведёт к утолщению ступицы диска турбины за счёт удлинения наклонного отрезка (поз. 1) 3D-профиля диска турбины. Однако, геометрия диска турбины по заданию не должна

изменяться, поэтому носок вала компрессора следует утолщать вверх (увеличивая наружный диаметр). Поэтому удалите наклонный отрезок, верхний отрезок и правый вертикальный отрезок. Обратите внимание на цвет удаляемого отрезка (совпадающего с отрезком поз. 1), чтобы он принадлежал 3D-профилю носка вала турбины, а не 3D-профилю диска турбины. Останется только нижний отрезок (поз. 3). Далее постройте горизонтальный отрезок (поз. 4), параллельный отрезку (поз. 3). Проведите вертикальный отрезок (поз. 5). Обрежьте  выступающие части отрезков (поз. 4 и 5).

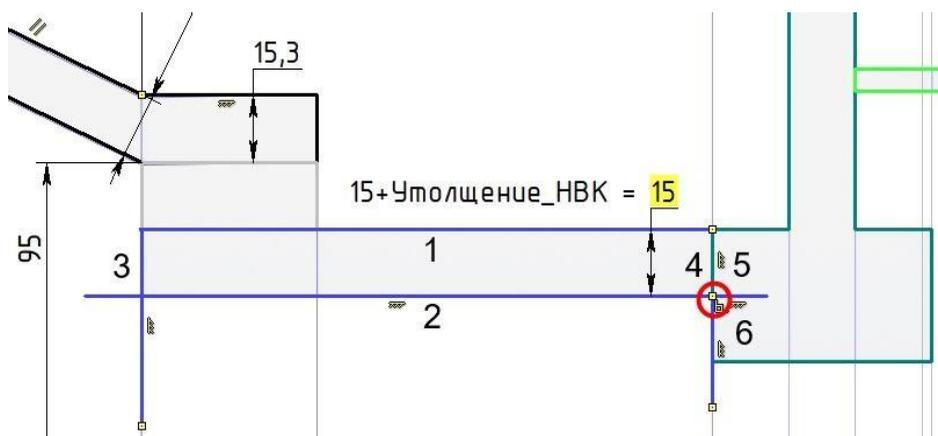


Рисунок 2.6– Редактирование 3D-профиля носка вала компрессора

Далее нужно обеспечить скольжение левого конца отрезка (поз.1) по наклонному отрезку (поз. 6) 3D-профиля турбины. Сначала измерьте исходный угол наклона отрезка (поз. 6) относительно вертикали. Здесь он составляет 13,73626 градусов. Затем удалите отрезок (поз.6) и постройте его заново от нижней точки отрезка (поз. 7) до левой точки отрезка (поз. 4). Не забывайте соблюдать цвет линий  данного 3D-профиля. Передвиньте верхний конец отрезка (поз. 1) 3D-профиля диска

турбины до левой точки отрезка (поз. 4) (обведена на рис 2.7). Далее задайте для отрезка (поз. 6) ранее измеренный угол относительно вертикали. После этого нарисуйте наклонный отрезок носка вала турбины, совпадающий с отрезком (поз.1).

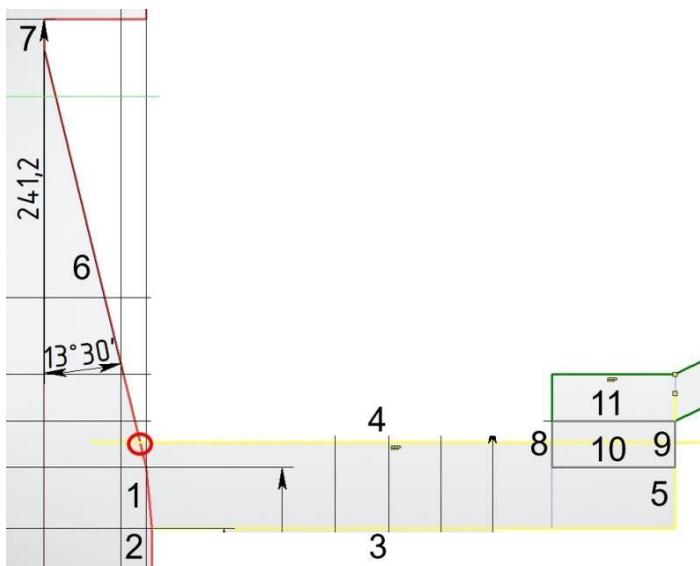


Рис. 2.7 – Редактирование 3D-профиля носка вала турбины

Осталось только отредактировать 3D-профиль правого подшипника, чтобы он находился в контакте с носком вала турбины. Для этого удалите отрезки поз. 8, 9, 10 на рис. 1.9. Затем заново создайте отрезок поз.10 так, чтобы он совпадал с отрезком поз. 4. Затем восстановите отрезки поз. 9 и 10 с запасом длины. Не забывайте соблюдать цвет линий ■ данного 3D-профиля. Обрежьте ✂ выступающие части отрезков (поз. 8, 9 и 10). И, наконец, задайте размер между отрезками поз. 3 и поз. 4, равный сумме исходной толщины носка вала турбины (19,6 мм) и значению переменной «Утолщение\_НВТ». Завершите редактирование ✓. Изменяя значение переменной

«Утолщение\_НВТ», понаблюдайте, правильно ли изменяется геометрия ротора. Сохраните модель .

Далее отредактируйте верхнюю проставку. Проставка должна утолщаться в обе стороны от средней поверхности. Поэтому постройте вспомогательную линию, проходящую через середину 3D-профиля проставки. Удалите все четыре отрезка, образующие проставку. Постройте два отрезка, параллельные вспомогательной средней линии (горизонтальные отрезки) сверху и снизу от неё так, чтобы их концы лежали с одной стороны на отрезке 3D-профиля диска компрессора, а с другой стороны на отрезке 3D-профиля диска турбины. Проводите отрезки дальше от средней линии, чем исходные. Передвиньте концы отрезков 3D-профиля диска компрессора (по которым проставка соприкасалась с диском компрессора и соседних с ними) до крайних точек горизонтальных отрезков. Не забывайте, что при удержании указателя мыши на точке, открывается список всех присоединённых к ней элементов. И что сдвигать нужно именно концы отрезков, а не узлы. Поскольку с диском турбины проставка соприкасается по наклонному участку, нужно, как и в случае с носком вала турбины, задать угол наклона отрезков 3D-профиля сверху и снизу от отрезка присоединения проставки. В данном случае эти углы верхнего отрезка равен 14,931417 градусов, а угол нижнего отрезка равен 14,574216 градусов. Для этого эти отрезки нужно будет удалить и создать заново между нужными точками концов отрезков. Сдвиньте крайние точки отрезка соприкосновения 3D-профилей проставки с диском турбины. Задайте размеры между каждым горизонтальным отрезком проставки и средней линией, равный сумме половины исходной толщины проставки ( $5/2 = 2,5$  мм) и половине значения переменной «Утолщение\_проставки\_1» ( $2,5 + \text{Утолщение\_проставки\_1}/2$ ), как показано на рис. 2.8. И, наконец, замкните геометрию 3D-профиля проставки двумя

отрезками, которыми он будет соприкасаться с диском компрессора слева (вертикальный) и диском турбины справа (наклонный).

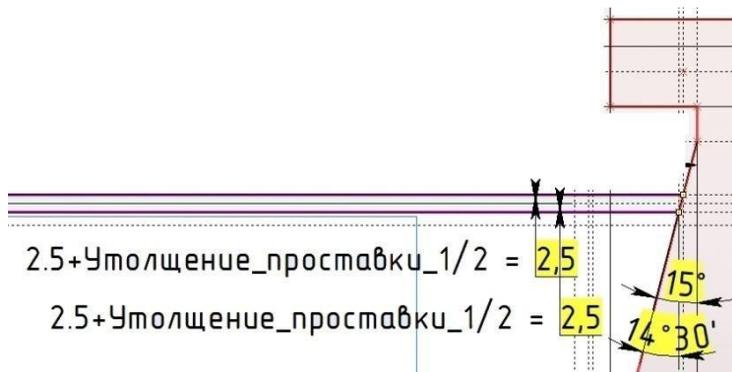


Рисунок 2.8 – Редактирование 3D-профиля проставки большего диаметра

Аналогично отредактируйте 3D-профиль нижней проставки (проставки меньшего диаметра). Её исходная толщина в данном случае 5 мм, а расстояние от оси до средней линии 113,7 мм. Угол верхнего отрезка 3D-профиля диска турбины составляет 14,574216 градусов, нижнего отрезка 6,267481 градуса.

Изменяя значения переменных «Утолщение\_проставки\_1» и «Утолщение\_проставки\_2», понаблюдайте, правильно ли изменяется геометрия ротора. При этом небольшие изменения диска турбины могут иметь место из-за переменного угла наклона полотна. Сохраните модель .

## 2.4 Подготовка КЭ модели и проведение модального расчёта

Для проведения модального расчёта 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 «Собственные частоты» . Добавьте в окно «Элемент» все тела модели (см. рис. 2.9). Завершите создание задачи .



Рисунок 2.9 – Список тел в модели

Автоматически откроется окно создания сетки конечных элементов. Оставьте основной элемент «Тетраэдр». Убедитесь, что в поле размер выбран параметр «Относительный» и выставьте его значение на 0,01. В данном случае размер ребра конечного элемента задаётся как доля от самого большого ребра прямоугольника, охватывающего всю модель. Это означает, что вдоль этого ребра разместится сто конечных элементов.

Заданный размер корректируется системой таким образом, чтобы в итоге получить все элементы сетки с ребром примерно одного размера, близким к значению, указанному в параметрах. В случае нехватки оперативной памяти допустимо увеличить значение относительного размера максимум до 0,1. Либо можно поставить значение в поле размер на «Абсолютный» и явно указать нужный средний размер конечного элемента. Значения остальных параметров оставьте по умолчанию. Завершите

создание сетки ✓. Ориентировочный вид сетки показан на рис. 2.10. Теперь на панели будет находиться вкладка «Задачи», а в ней конкретная задача «Задача\_1 (Собственные частоты)». Также папка «Задачи» появится в древе построения модели. В одной модели может быть несколько разных задач, но только одна из них является активной.

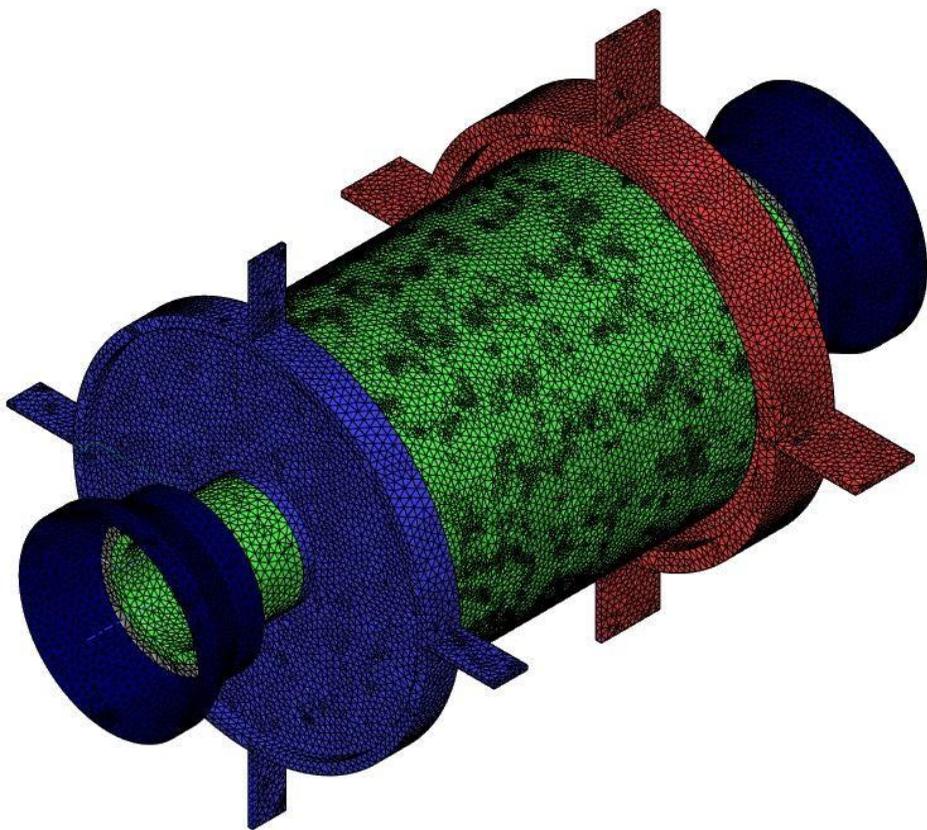


Рисунок 2.10 – Сетка конечных элементов модели ротора с опорами

В выпадающем списке инструмента «Закрепление»  на панели «Условия» вкладки «Анализ» выберите «Полное закрепление» . Укажите кольцевую наружную поверхность

первой (радиально-упорной) опоры, как показано на рис. 2.11. Затем выберите инструмент «Частичное закрепление»  и укажите кольцевую наружную поверхность второй (радиальной) опоры. Снимите галочку с направления оси X (ось ротора). В полях осей Y и Z должны стоять нули.

Воспользуйтесь инструментом «Расчёт»  на панели «Расчёт» вкладки «Анализ». В поле «Метод расчёта» оставьте «Автоматический выбор». Для начала укажите количество рассчитываемых собственных частот равным 50. Если в данном диапазоне не будет искомым критических частот (см. задание), увеличьте количество рассчитываемых собственных частот. В поле «Тип элемента» выберите «Линейная интерполяция».

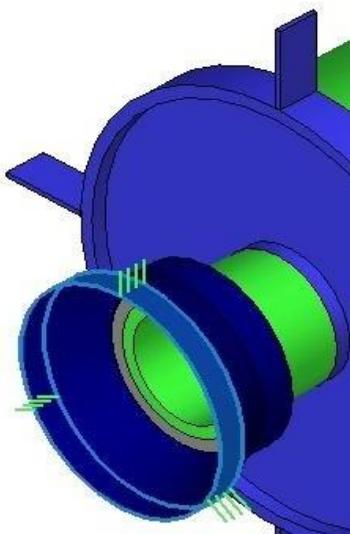


Рисунок 2.11 – Закрепление опор по наружной концентрической поверхности

Это несколько снизит точность расчёта, существенно увеличив его скорость. Остальные параметры оставьте по умолчанию. Нажмите «ОК». В открывшемся окне «Результаты» выберите «Относительные перемещения, модуль».

Откройте подпапку «Результаты» папки «Задача\_1 (Собственные частоты)». Занесите в отчёт таблицу полученных частот. Проанализируйте формы колебаний согласно заданию. Добавьте нужные формы в отчёт. Примеры формы приведён на рис. 2.12...2.18.

Термин “критическая частота” используется именно для частоты изгибных колебаний ротора в целом, чтобы отличить эту

частоту от собственных частот колебаний деталей, входящих в состав ротора. Алгоритм модального анализа для объёмной модели таков, что критические частоты рассчитываются парами, один рисунок (рис. 2.12) показывает колебания в вертикальной плоскости, другой (рис. 2.13) - в горизонтальной.

Если опоры ротора изотропны, то критические частоты в обеих плоскостях совпадают. При анизотропии опор частоты будут отличаться. Колебания ротора по второй критической частоте показаны на рис. 2.14.

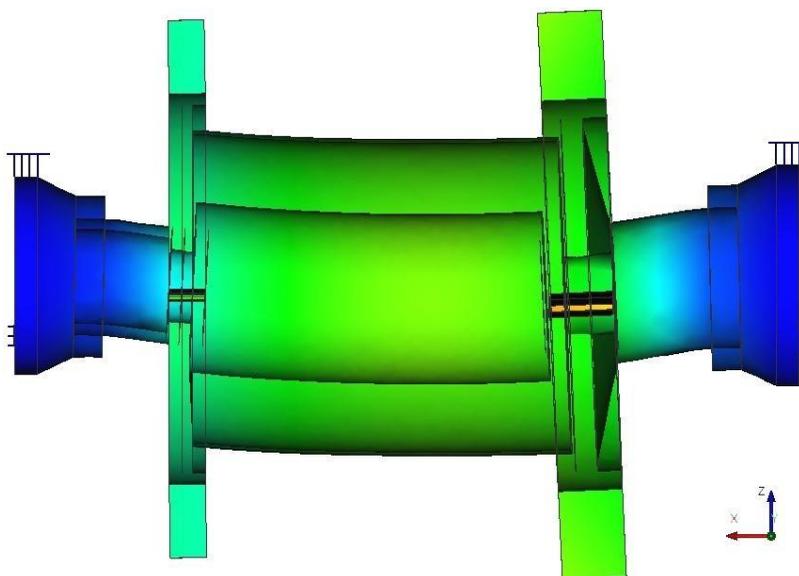


Рисунок 2.12 – Первая критическая частота, колебания в вертикальной плоскости

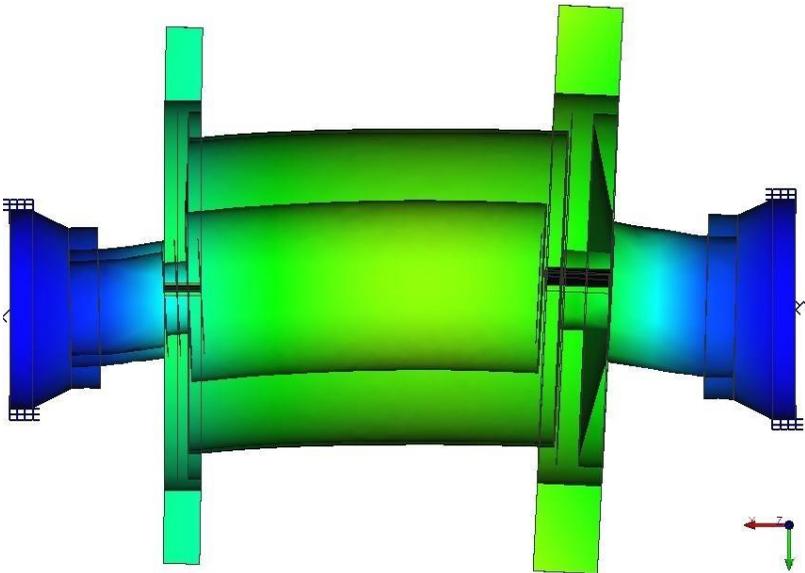


Рисунок 2.13 – Первая критическая частота, колебания в горизонтальной плоскости

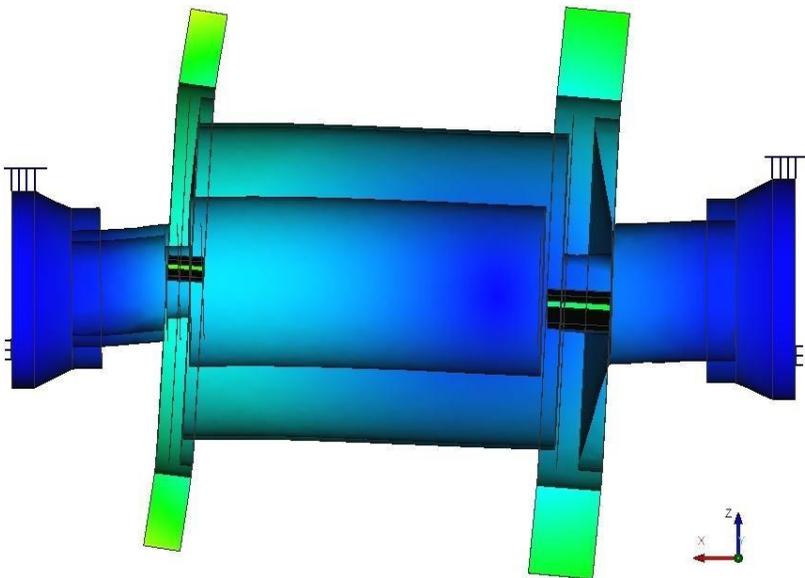


Рисунок 2.14 – Вторая критическая частота, колебания в вертикальной плоскости

Детали, входящие в состав ротора, имеют собственные частоты колебаний.

Проставки имеют осесимметричные и изгибные колебания. При осесимметричном колебании все точки поперечного сечения проставки движутся в одном направлении (на рис. 2.15 - к оси ротора, через половину периода эти точки будут двигаться от оси ротора). При изгибных колебаниях на проставке появляются узловые линии, параллельные оси ротора (рис. 2.16).

Колебания лопаток и дисков показаны на рис. 2.17 и 2.18.

Колебания деталей, входящих в состав ротора, также могут быть опасными, но для борьбы с ними необходимо работать именно с той деталью, частота колебаний которой представляет опасность. Например, для частотной отстройки проставки необходимо менять именно толщину проставки, а изменения дисков или опор не приведут ни к каким изменениям частоты колебаний проставки.

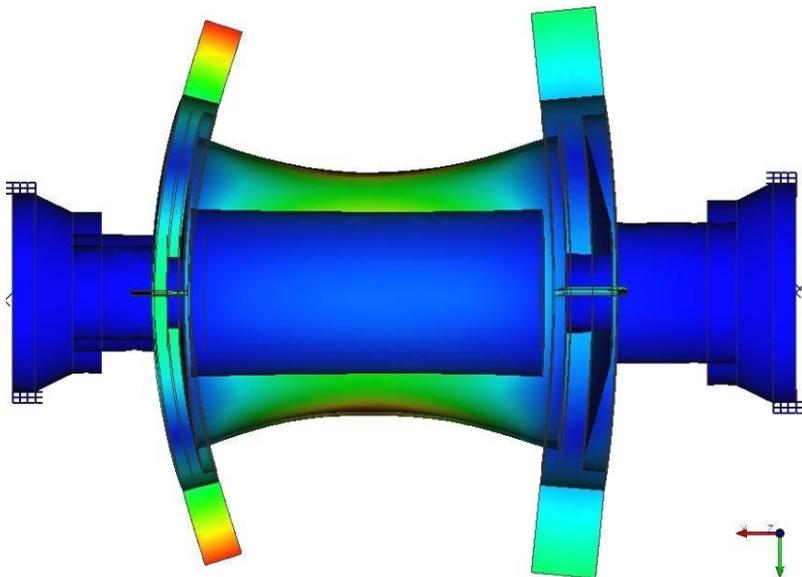


Рисунок 2.15 – Осесимметричные колебания проставки, первая форма

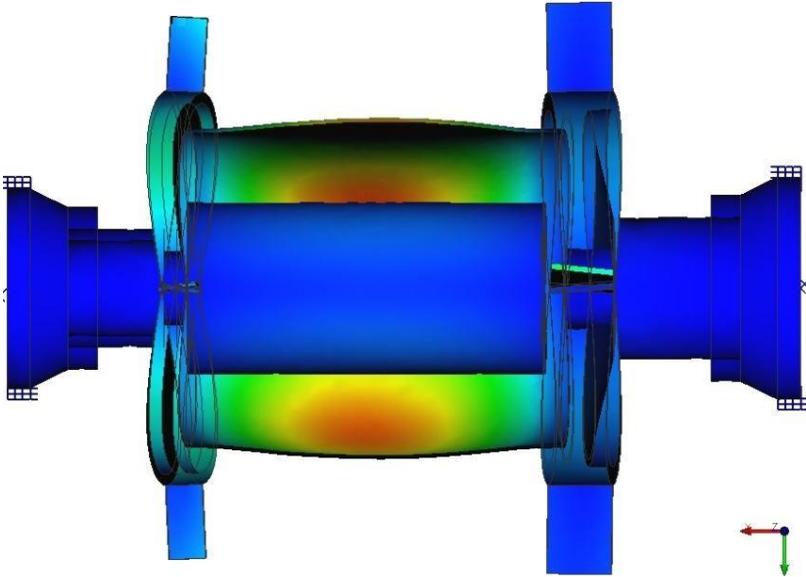


Рисунок 2.16 – Изгибные колебания проставки, форма с частотным числом, равным 2

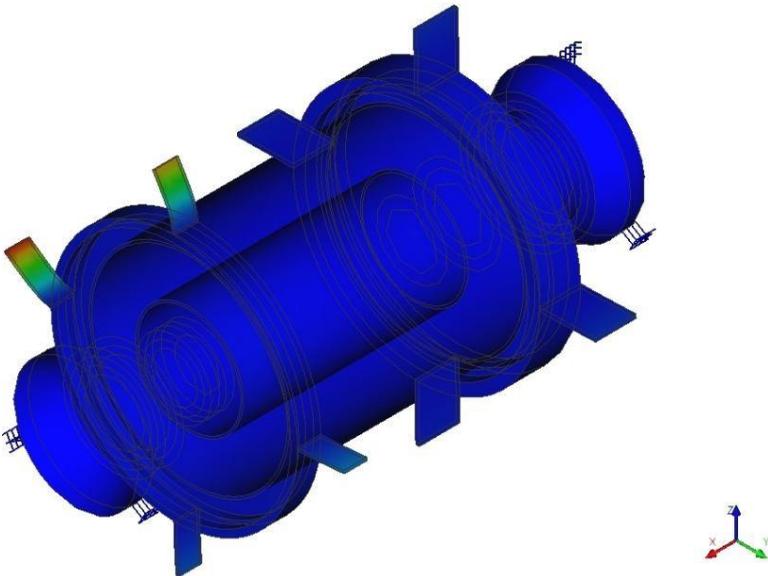


Рисунок 2.17 – Колебания лопаток компрессора, первая изгибная форма

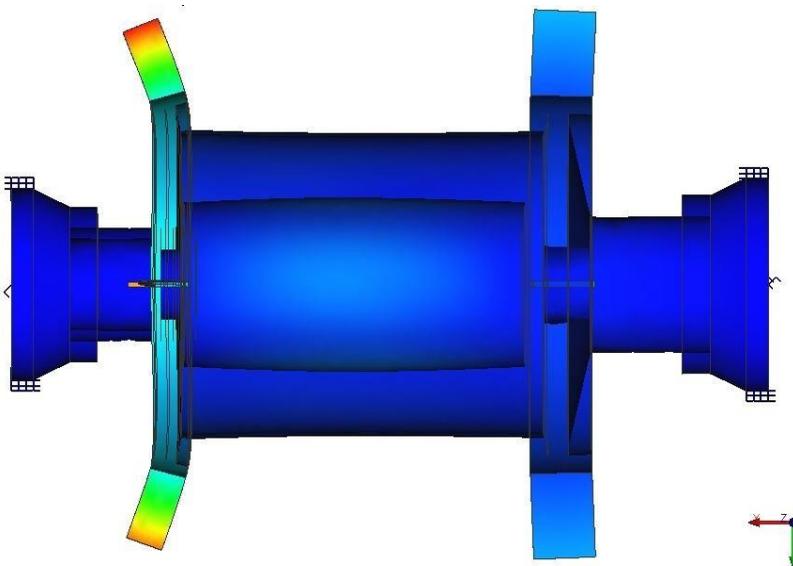


Рисунок 2.18 – Колебания диска компрессора, форма 00

Для изменения критических частот ротора в целом при частотной отстройке необходимо менять или жёсткость опор, или жёсткость вала, изменяя толщину проставок. Масса дисков также влияет на критические частоты, но профиль диска определен его расчётом на прочность, и маловероятно, что для частотной отстройки ротора будет допустимо менять профили дисков.

Выполните исследование согласно пункту 3 задания.

## 3. ОБОЛОЧЕЧНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РОТОРА

### 3.1 Создание оболочечной геометрии ротора

В оболочечной модели объёмные тела заменяются поверхностями (оболочками), которым назначаются определённые толщины и свойства материалов. По этим параметрам вычисляются масса и жёсткость конструкции. Оболочечная модель требует меньше памяти компьютера и быстрее считается, поскольку содержит гораздо меньше конечных элементов, которые на каждой поверхности расположены в один слой. Кроме того, поверхностные элементы имеют меньше узлов, чем объёмные. При наличии объёмной модели оболочечную модель удобно строить по ней, создавая оболочки из поверхностей объёмных тел (наружных, внутренних или срединных).

Скопируйте ранее созданный файл «Ротор 3D» и переименуйте копию, например, как «Ротор 2D». Не удаляйте исходный файл «Ротор 3D»! Откройте файл «Ротор 2D» в T-FLEX CAD. Удалите все созданные объёмные тела, а также 3D-профиля лопаток и связанные с ними рабочие плоскости «РП\_1» и «РП\_2». Также удалите 3D-профили подшипников.

Начните чертить  на рабочей плоскости «Вид сверху», на которой находятся 3D-профили тел объёмной модели. Окончательный вид 3D-профилей всех поверхностей оболочечной модели показан на рис. 3.1 и 3.2. Чтобы получить его, вначале постройте средние линии всех элементов, кроме подшипников, лопаток и полотна диска турбины. А именно: опор, носков валов, проставок, ступиц и ободов РК, полотна диска компрессора. При этом для элементов разной толщины нужно использовать свой цвет линии, чтобы получился отдельный 3D-профиль. Например, для каждой опоры должно быть две отдельных линии: для наклонного и горизонтального участка.

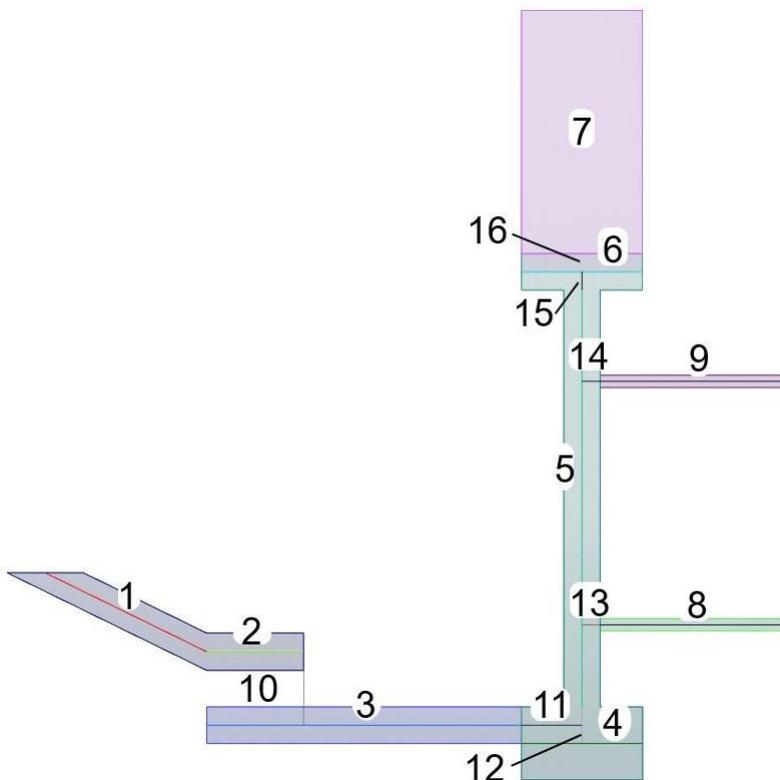


Рисунок 3.1 – 3D-профили оболочечной модели со стороны компрессора

Все построенные линии должны соприкасаться, чтобы модель получилась цельной. Поэтому нужно добавить линии: а) от средних линий валов (носков и проставок) до средних линий соответствующих дисков; б) от средних линий дисков до средних линий ступицы и обода для дисков (для РК турбины только до обода).

Полотно диска турбины имеет переменную толщину. Поэтому его средняя линия должна состоять из нескольких участков, для каждой из которых будет назначена средняя толщина данного участка. Средняя толщина может быть вычислена делением

пополам суммы толщин полотна диска в начале и конце участка. Толщину всех элементов можно измерить непосредственно по 3D-профилям исходной объёмной модели. Для данной модели параметры всех поверхностей сведены в таблицы 3.1 и 3.2.

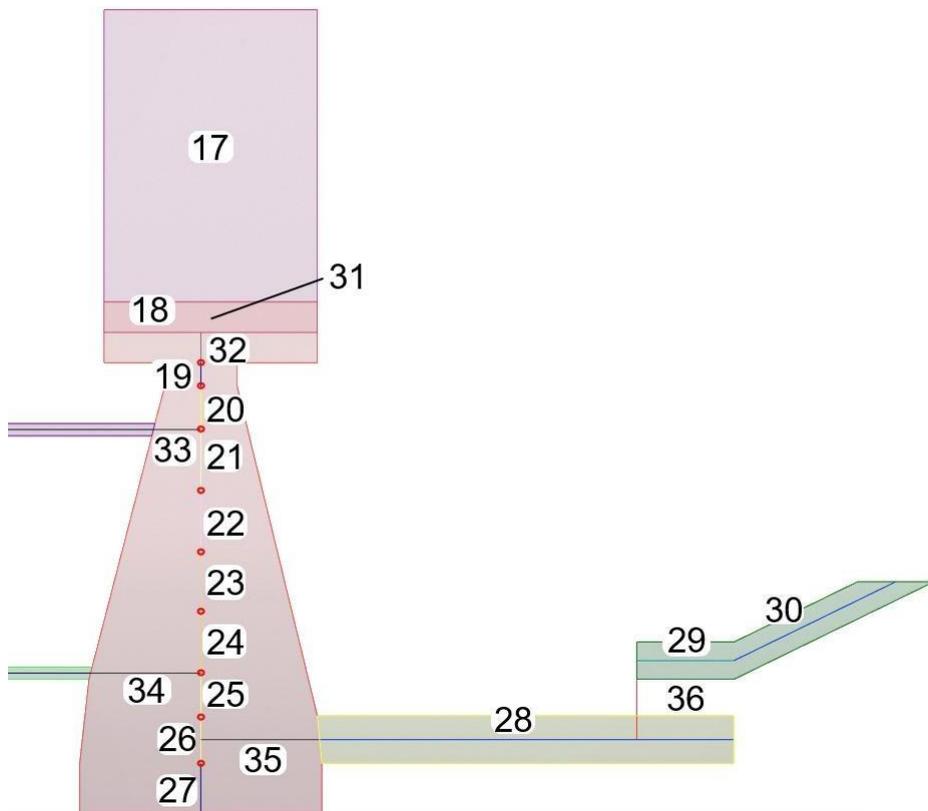


Рисунок 3.2 – 3D-профили оболочечной модели со стороны турбины

3D-профиля имеют номер согласно рис. 3.1 и 3.2 и мнемонические названия, разделённые на две группы:

«П» - 3D-профиля средних поверхностей исходных объёмных тел ротора с исходными материалами;

«С» - 3D-профиля «жестких» поверхностей, соединяющих поверхности группы «П» в единую конструкцию. Сюда же относятся и подшипники. Состоят из материала «5 Материал жестких тел».

Длина отрезков 20 и 25 составляет по 17,5 мм, длина отрезков 21, 22, 23, 24 составляет по 25 мм, длина отрезка 26 составляет 20,4 мм.

3D-профиля подшипников изображаются в виде лежащего на боку П-образного профиля, боковыми торцами соприкасающимися со средней поверхностью опоры сверху и средней поверхностью носка вала снизу, как показано на рис. 3.3.

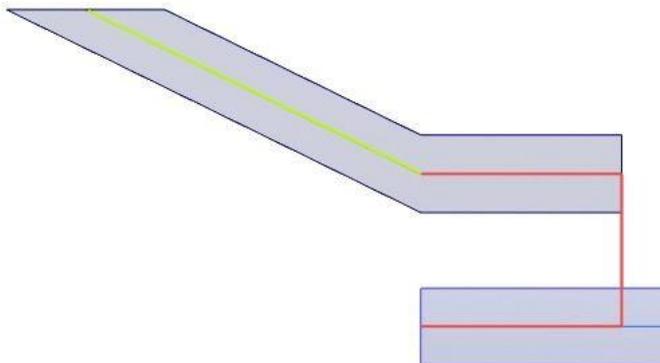


Рисунок 3.3 – 3D-профиль подшипника

3D-профиля лопаток делаются в виде прямоугольников шириной с обод соответствующего диска. Для всех лопаток данной модели расстояние от оси до втулочного сечения 266,2 мм. Расстояние до концевое сечения 366,2 мм для лопатки компрессора (высота 100 мм), для лопатки турбины – 386,2 мм (высота 120 мм). Между 3D-профилем лопатки и обода диска строится ещё один соединительный прямоугольник, являющийся отдельным 3D-профилем «жесткой» соединительной поверхности. Большинство 3D-профилей имеют по одной линии, 3D-профиль

подшипника состоит из трёх линий, 3D-профиля лопаток и их соединителей с диском имеют по четыре линии (в форме прямоугольника). Сохраните модель .

Таблица 3.1 – Характеристики поверхностей для рис. 3.1

3D-профиль		Толщина, мм	№ материала
№	Название		
1	П опоры 1 наклонный	15,3	1
2	П опоры 1 горизонтальный	13,761	1
3	П носок вала компрессора	15	3
4	П ступица компрессора	30	2
5	П полотно компрессора	15	2
6	П обод компрессора	15	2
7	П лопатка компрессора	6	2
8	П проставка малого диаметра	5	3
9	П проставка большого диаметра	5	3
10	С подшипник левый	15	5
11	С носок вала компрессора	15	5
12	С ступица компрессора	15	5
13	С проставка МД К	5	5
14	С проставка БД К	5	5
15	С обод компрессора	15	5
16	С лопатка компрессора	6	5

По очереди создайте из 3D-профилей (кроме лопаток 7, 17 и их «соединителей» 6, 31) тела (поверхности) операцией «Вращение»  панели «Операции». Угол поворота составляет 360 градусов. В качестве оси вращения используйте созданную ранее осевую линию. Рекомендуется называть поверхности по номерам и названиям 3D-профилей, например, «1 опоры 1 наклонная» или «15 обод компрессора». При переименовании сразу назначайте для

поверхностей материал, указанный в табл. 3.1 и 3.2. Рекомендуется также задать для поверхностей разные цвета в зависимости от материала: 1 – зелёный, 2 – синий, 3 – коричневый, 4 – ярко-красный, 5 – серый (по умолчанию). Окончательный вид геометрии оболочечной модели показан на рис. 3.4.

Таблица 3.2 – Характеристики поверхностей для рис. 3.2

3D-профиль		Толщина, мм	№ материала
№	Название		
17	П лопатка турбины	8	4
18	П обод турбины	25	4
19	П турбины 1	30	4
20	П турбины 2	34,6	4
21	П турбины 3	45,65	4
22	П турбины 4	58,6	4
23	П турбины 5	71,6	4
24	П турбины 6	84,6	4
25	П турбины 7	93,4	4
26	П турбины 8	97,85	4
27	П ступица турбины	100	4
28	П носок вала турбины	19,6	3
29	П опоры 2 горизонтальный	15,3	1
30	П опоры 2 наклонный	13,756	1
31	С лопатка турбины	8	5
32	С обод турбины	30	5
33	С проставка БД Т	5	5
34	С проставка МД Т	5	5
35	С носок вала турбины	19,6	5
36	С подшипник правый	15	5

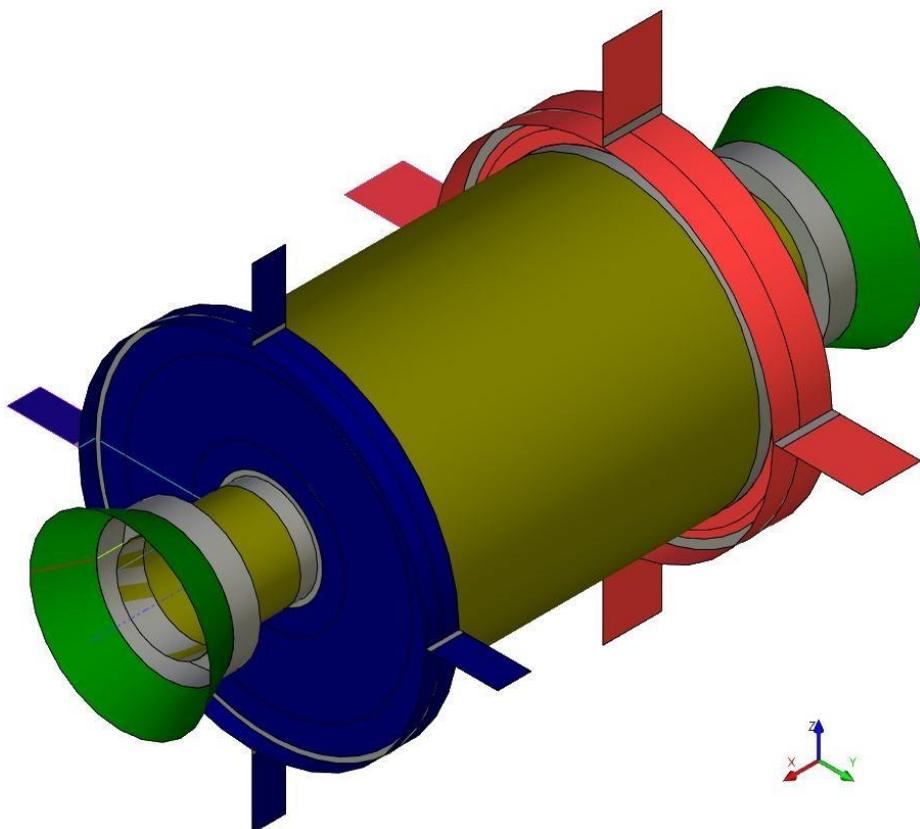


Рисунок 3.4 – Внешний вид геометрии оболочечной модели

По очереди создайте из оставшихся 3D-профилей 6, 7, 17, 31 тела (поверхности) операцией «Заполнение области»  панели «Специальные» вкладки «3D-модель». При создании поверхности в поле «Разбиение» укажите «Одна грань» . В поле «Результат» укажите «Поверхность» . Переименуйте созданные поверхности, назначьте им материал и цвет.

Создайте круговой массив  с равным шагом из четырёх лопаток компрессора (поверхности 7 и 16), как показано на рис. 2.4. Переименуйте его как «7 лопатки компрессора». Аналогично

создайте круговой массив  из четырёх лопаток турбины (поверхности 17 и 31), Переименуйте его как «17 лопатки турбины». Сохраните модель .

### 3.2 Подготовка оболочечной КЭ модели и проведение модального расчёта

Для проведения модального расчёта 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 «Собственные частоты» . Добавьте в окно «Элемент» все тела модели согласно табл. 3.1 и 3.2. В поле «Толщина» задайте толщину каждой пластины. Ниже выбирайте «Теория толстых пластин», поскольку для большинства оболочек, толщина вполне соизмерима с длиной. А для некоторых, например, на диске турбины, толщина и вовсе больше длины. Завершите создание задачи . Автоматически откроется окно создания сетки конечных элементов. Для разбивки используется конечный элемент «Треугольник». 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. 3.5.

В выпадающем списке инструмента «Закрепление»  на панели «Условия» вкладки «Анализ» выберите «Полное закрепление» . Укажите кольцевую наружную линию первой (радиально-упорной) опоры по аналогии с рис. 2.11. Затем выберите инструмент «Частичное закрепление»  и укажите кольцевую наружную линию второй (радиальной) опоры. Снимите галочку с направления оси X (ось ротора). В полях осей Y и Z должны стоять нули.

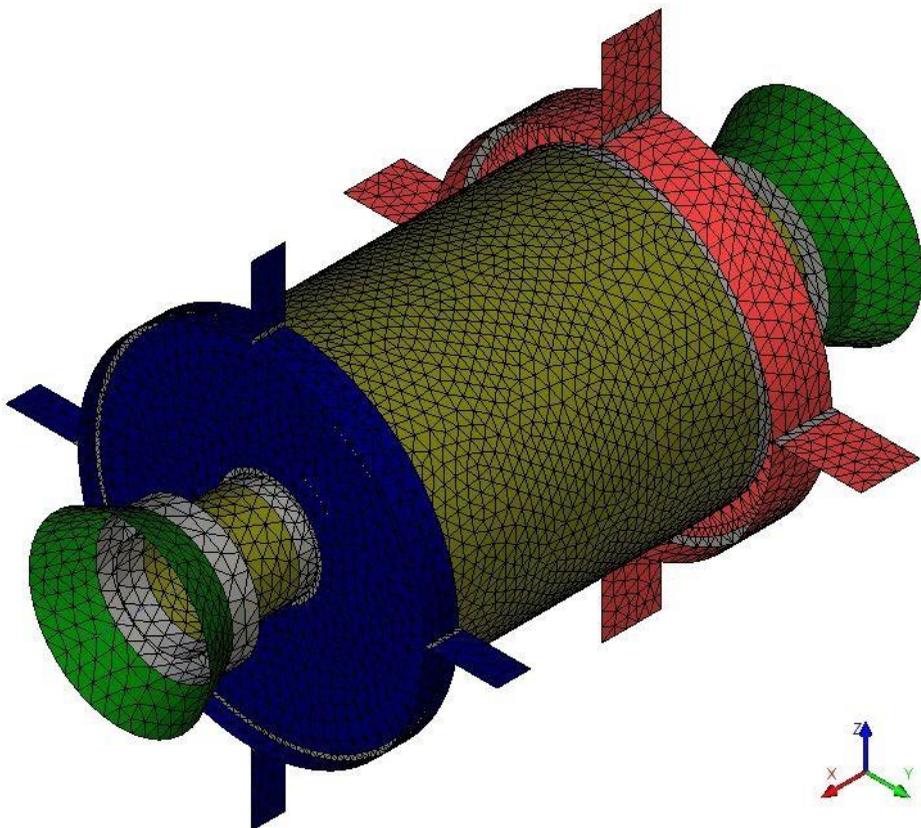


Рисунок 3.5 – Сетка конечных элементов для оболочечной модели

Воспользуйтесь инструментом «Расчёт» . Для начала укажите количество рассчитываемых собственных частот равным 50. Если в данном диапазоне не будет искомым критических частот (см. задание), увеличьте количество рассчитываемых собственных частот. В поле «Тип элемента» выберите «Линейная интерполяция». Остальные параметры оставьте по умолчанию. Нажмите «ОК». В открывшемся окне «Результаты» выберите «Относительные перемещения, модуль».

Откройте подпапку «Результаты» папки «Задача\_1 (Собственные частоты)». Занесите в отчёт таблицу полученных частот. Проанализируйте формы колебаний согласно заданию. Добавьте нужные формы в отчёт.

Выполните исследование согласно пункту 3 задания.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Выполните расчёт первых пяти критических частот ротора с условно недеформированными рабочими колёсами. Для этого примите модуль упругости материалов 2 и 4 дисков и лопаток ротора равным  $2 \cdot 10^{15}$  Па. Сравните частоты первых трёх критических частот ротора с определёнными ранее.

2. Проведите исследование влияния на критические частоты вращения ротора модуля упругости материала опор (материал 1) в диапазоне от  $1 \cdot 10^{11}$  до  $3 \cdot 10^{11}$  Па.

3. Изменяя толщины элементов ротора (для чётных вариантов — толщины опор, для нечётных вариантов — толщины валов), выполните частотную отстройку вверх на 10% для первой критической частоты с минимальным изменением массы конструкции. Отстройка сначала выполняется для оболочечной модели, а затем проверяется для объёмной модели. Сделайте вывод о достигнутых результатах.

4. Сравните частоты колебаний лопаток для оболочечной и объёмной модели. Причина различия в том, что в оболочечной модели лопатки соединяются с дисками по линии, а в объёмной модели – по поверхности, что обеспечивает большую жёсткость. Чтобы увеличить точность моделирования, замените в оболочечной модели поверхность лопатки на П-образный профиль (в направлении оси ротора), нижними концами касающийся поверхности диска, а сверху имеющим жёсткую перемычку. Толщина каждой поверхности и расстояние между поверхностями равно половине толщины лопатки.

5. Подготовьте демонстрацию работы в VR-среде. Разнесите детали ротора, изучите в VR-среде сетку конечных элементов, покажите изменение геометрии за счёт параметров.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе изучены две модели для определения собственных форм и частот колебаний ротора ГТД (ТНА) в T-FLEX: объёмная и оболочечная. Проведено сравнение трудоёмкости построения, точности и скорости решения этих моделей. Рассмотрены все этапы моделирования:

- создание частично параметризированной геометрии;
- назначение материалов телам;
- назначение толщин поверхностям;
- построение сетки конечных элементов;
- задание граничных условий (связей и закреплений);
- проведение расчёта собственных форм и частот;
- анализ результатов (поиск критических частот ротора, исследование влияния на их величины толщин элементов ротора, частотная отстройка)

Используя полученные знания и навыки работы в T-FLEX CAD и Анализ, возможно выполнить расчёт собственных форм и частот колебаний роторов проектируемых двигателей.

## 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. 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).

4. Работа в САЕ-пакете ANSYS MECHANICAL: конструкционный анализ методом конечных элементов: метод. указания / сост. А.О. Шкловец, В.С. Мелентьев. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2018. – 73 с.: ил.

5. Гвоздев, А. С. Изучение конструкции авиационных двигателей и энергетических установок с совместным использованием пакетов ANSYS, ADAMS и SolidWorks [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / А. С. Гвоздев, В. С. Мелентьев ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Самара, 2013. - on-line

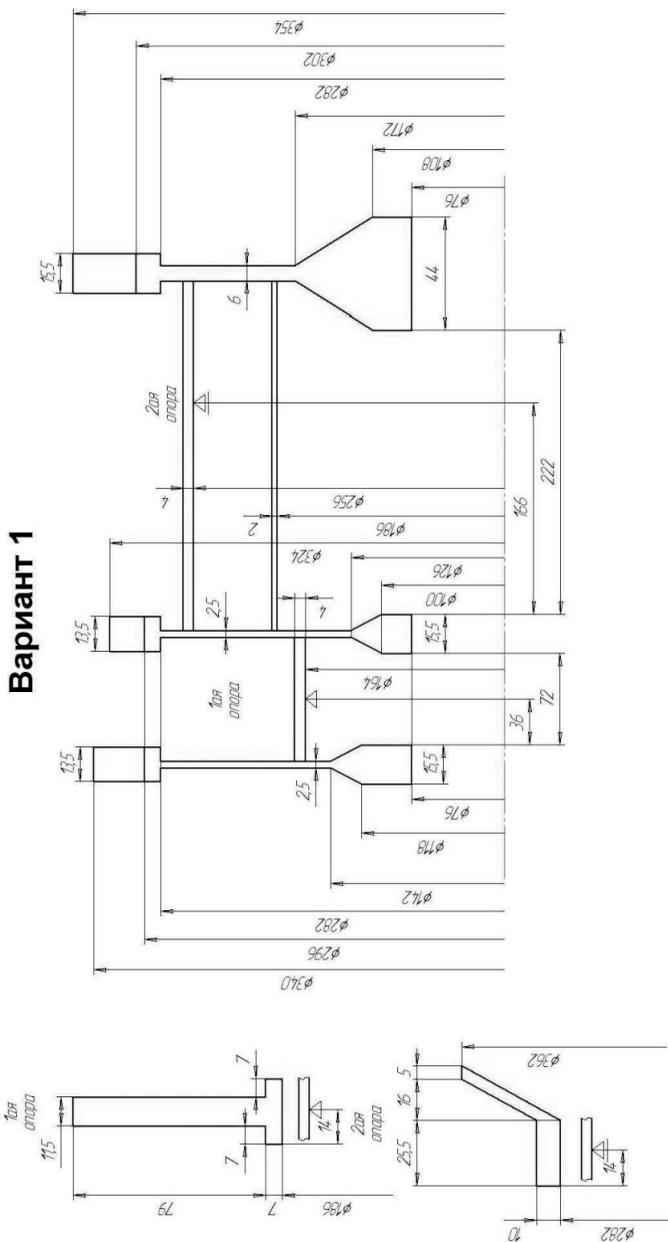
6. Численное моделирование вынужденных колебаний роторов ГТД : учеб. пособие / [А. И. Ермаков и др.]. – Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012. – 87 с.: ил.

7. T-FLEX Анализ: статические прочностные расчёты конструкций: метод. указания / сост. Т.Г. Костюченко, А.А.

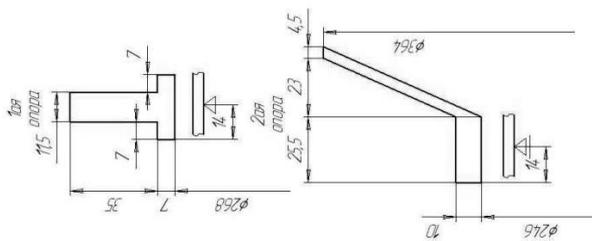
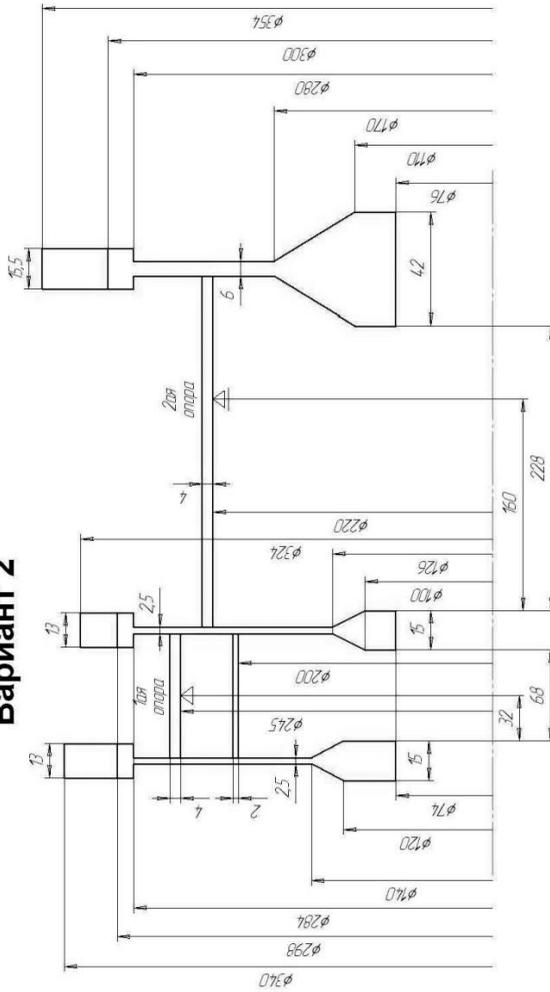
Игнатовская. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – 32 с.: ил.

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

## ПРИЛОЖЕНИЕ. Варианты 1-30.

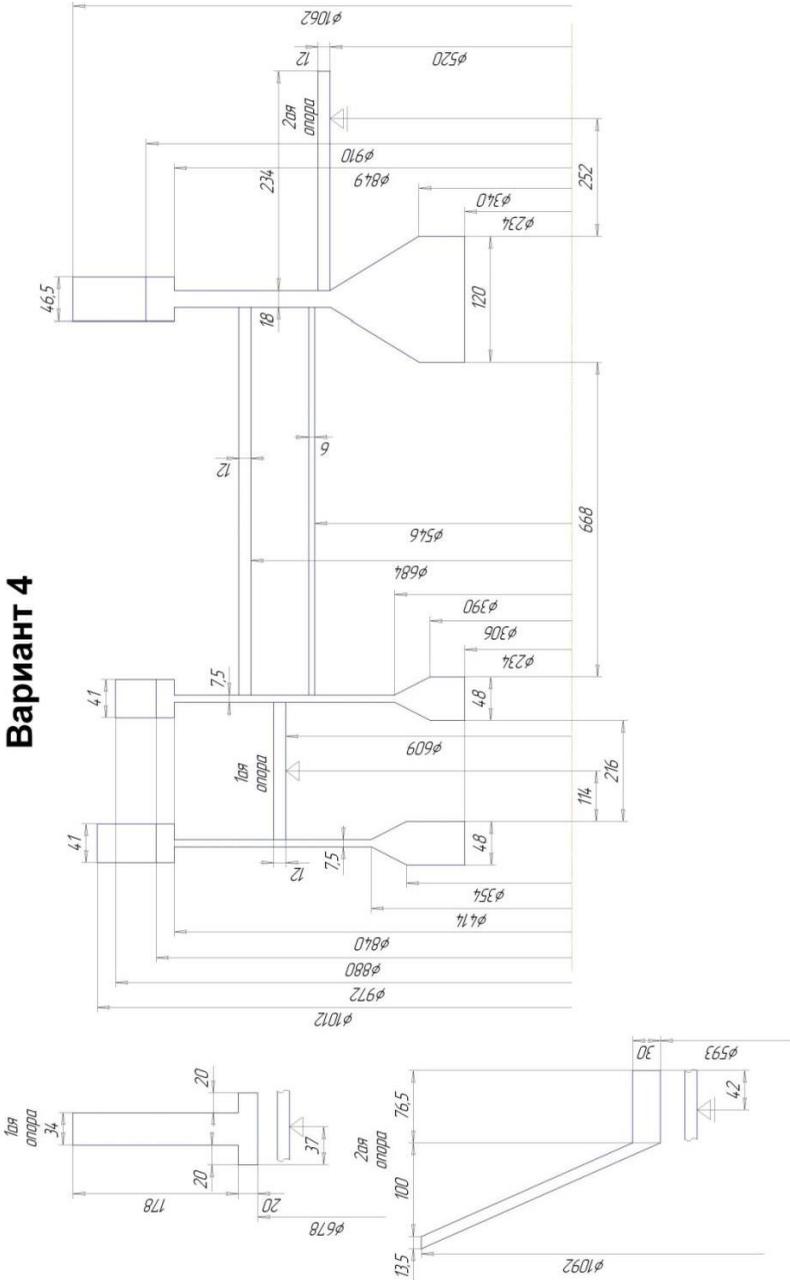


## Вариант 2





# Вариант 4



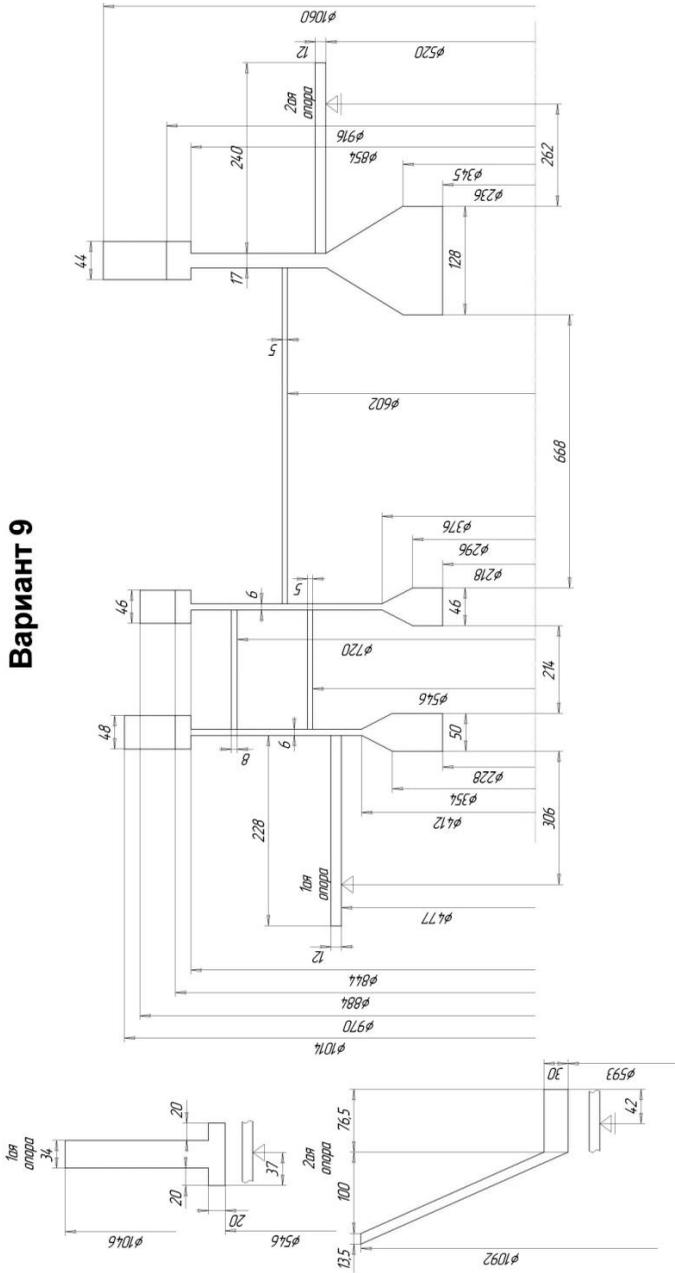




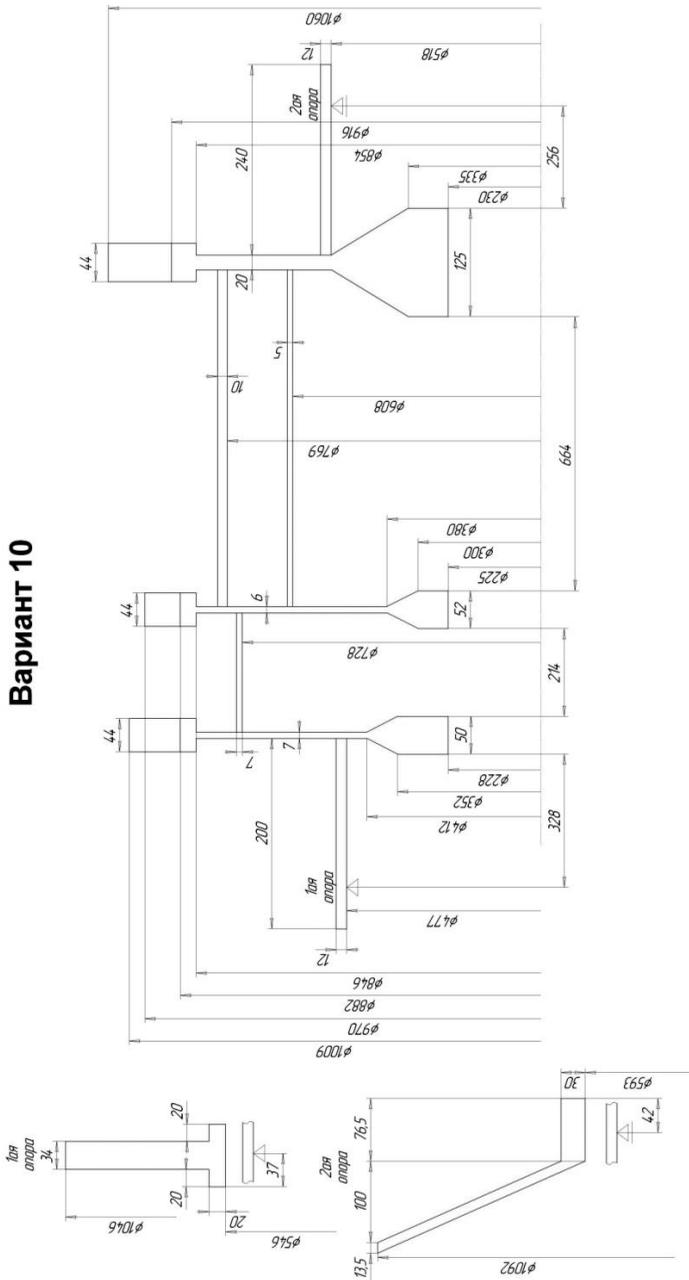




# Вариант 9



# Вариант 10

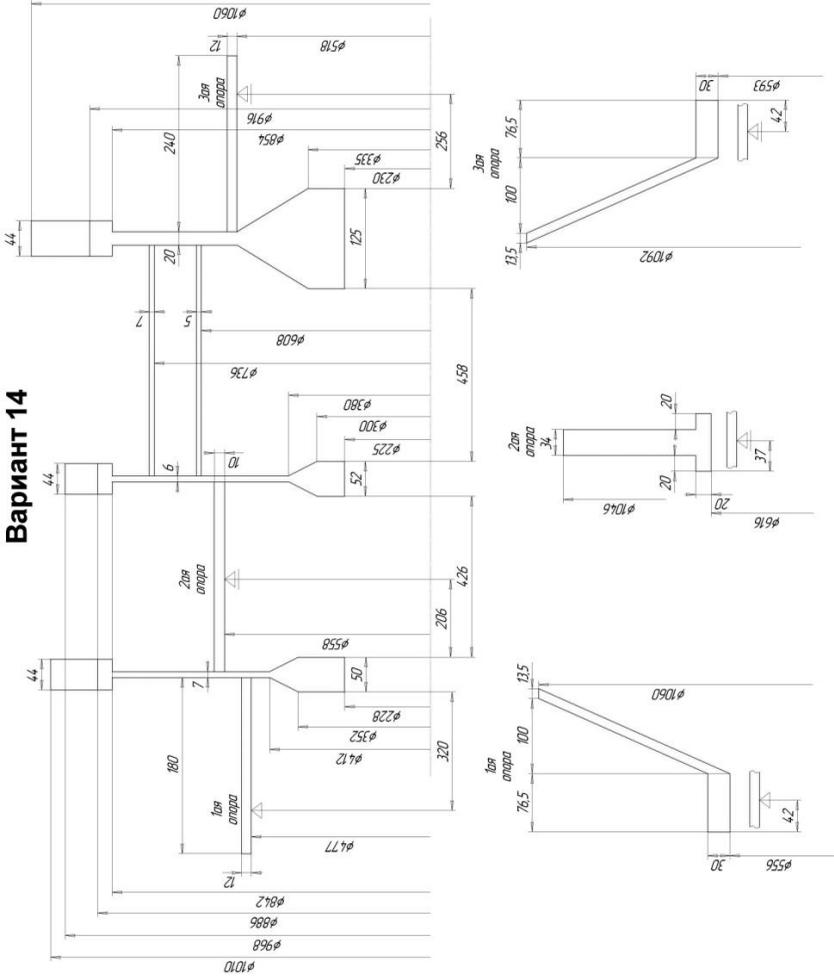




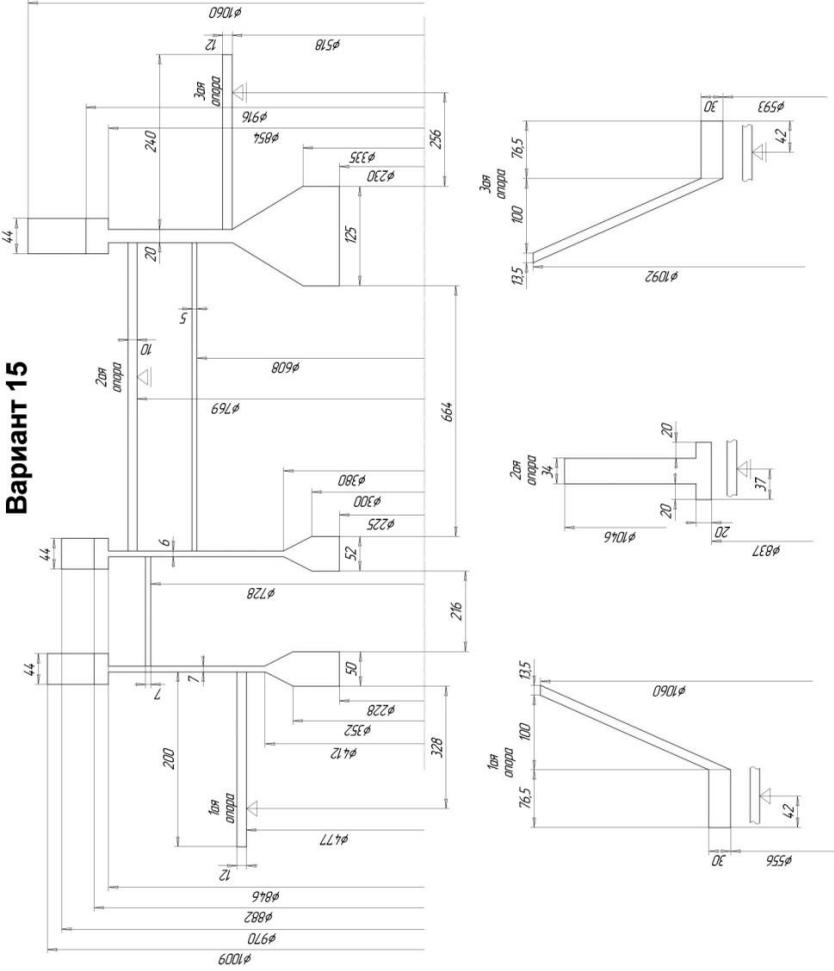




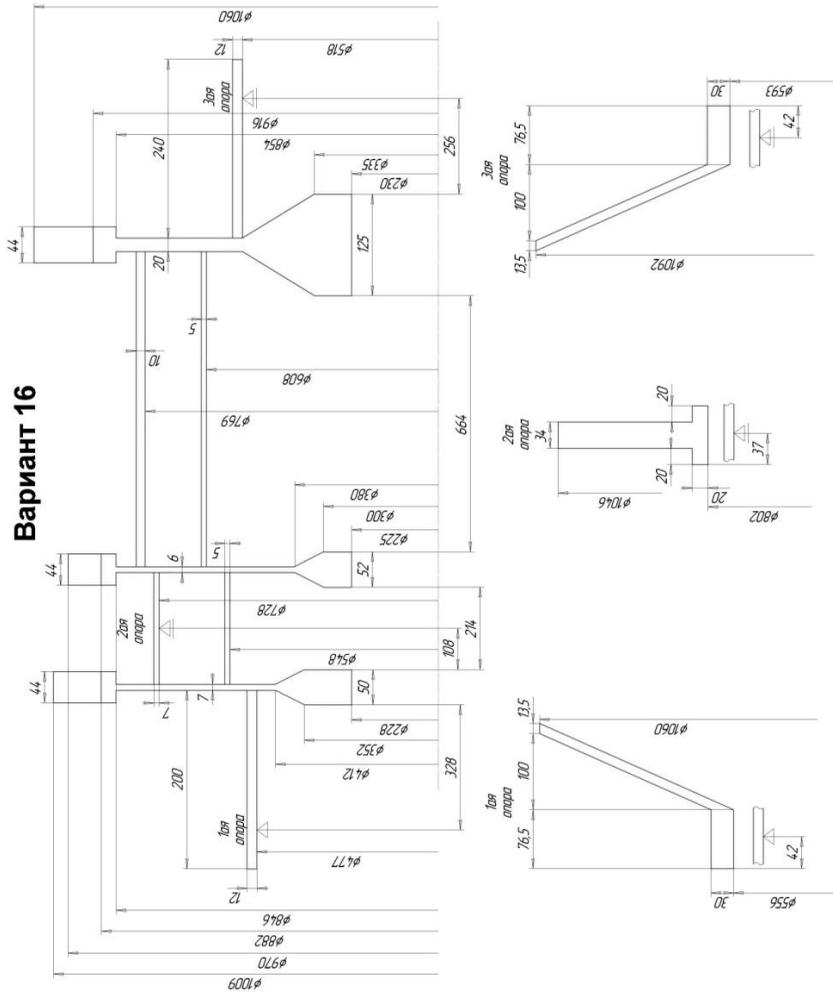
# Вариант 14



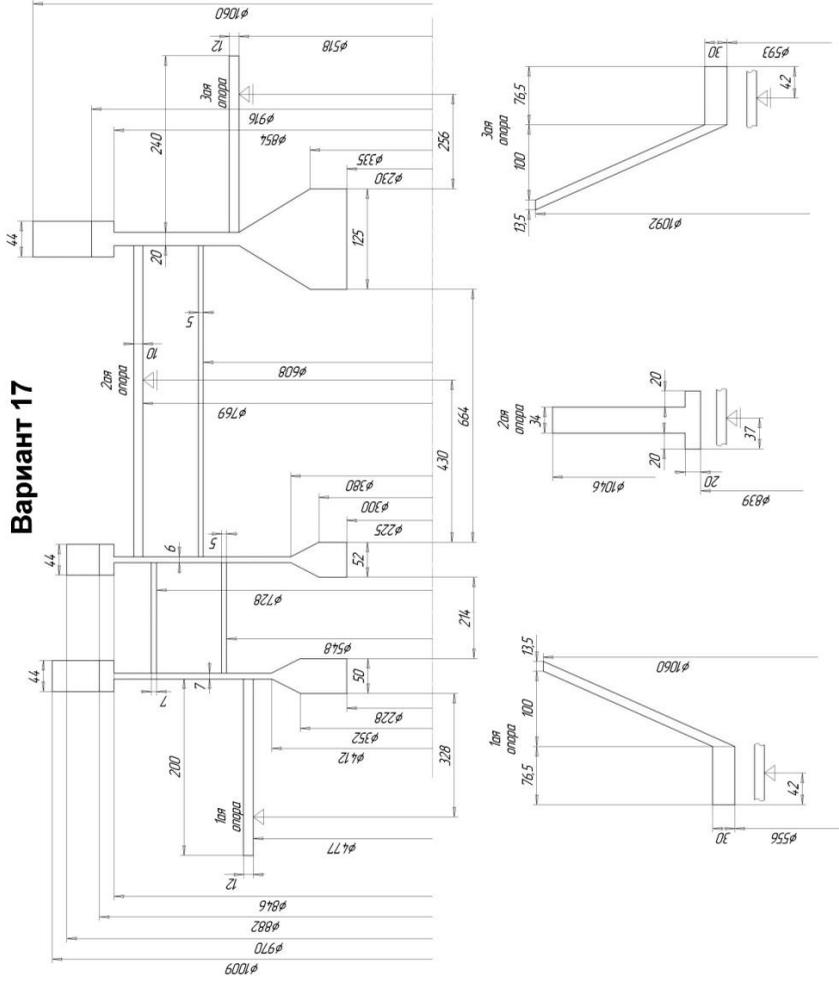
# Вариант 15



# Вариант 16

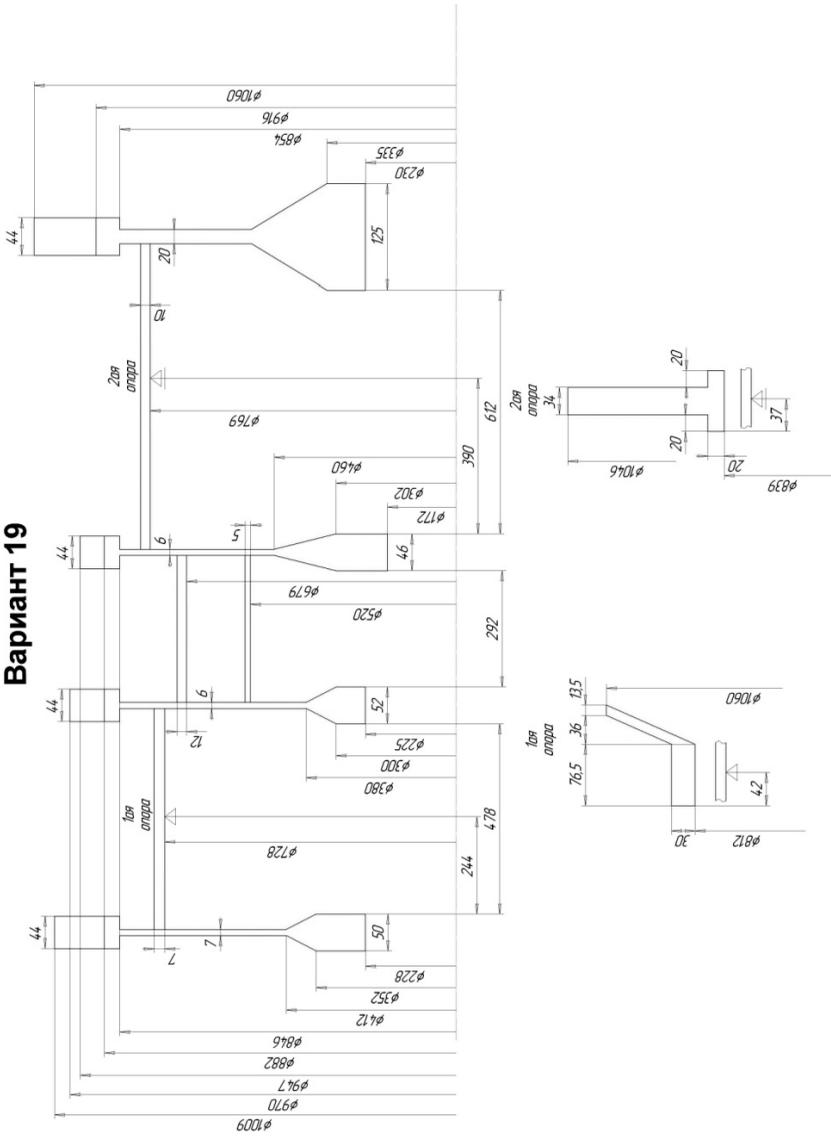


# Вариант 17

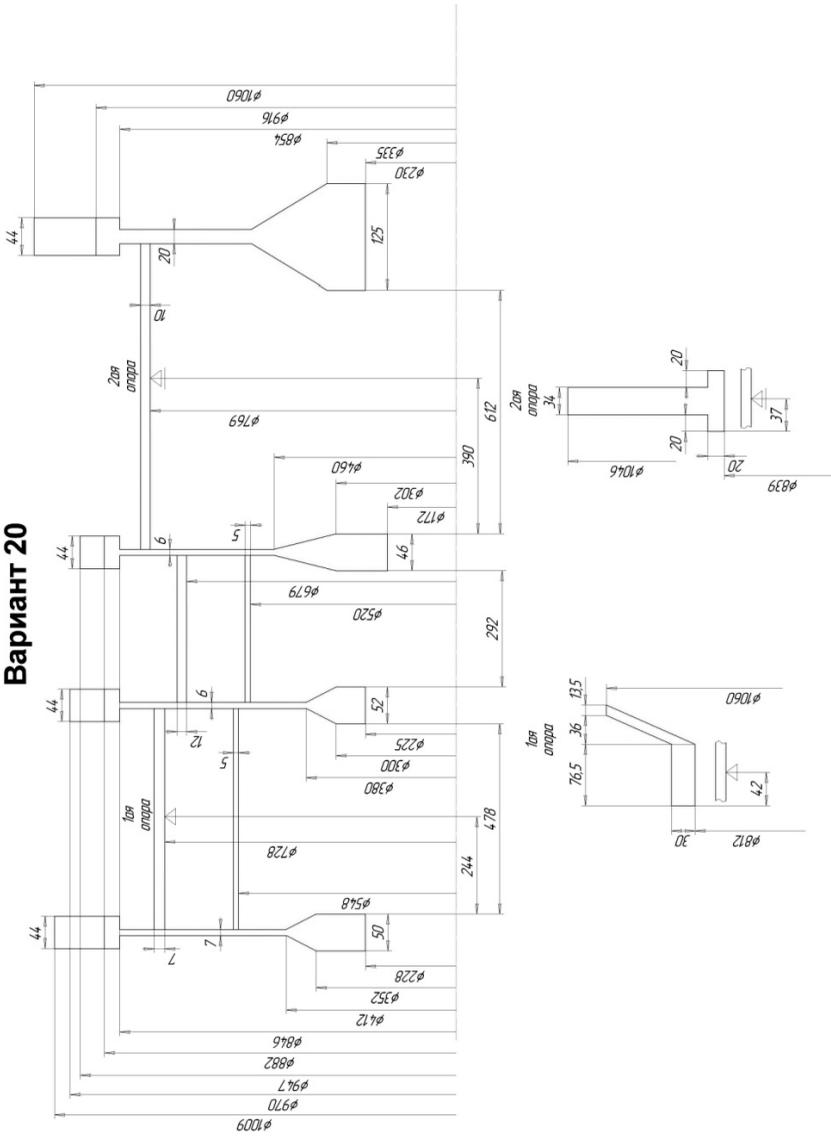




# Вариант 19

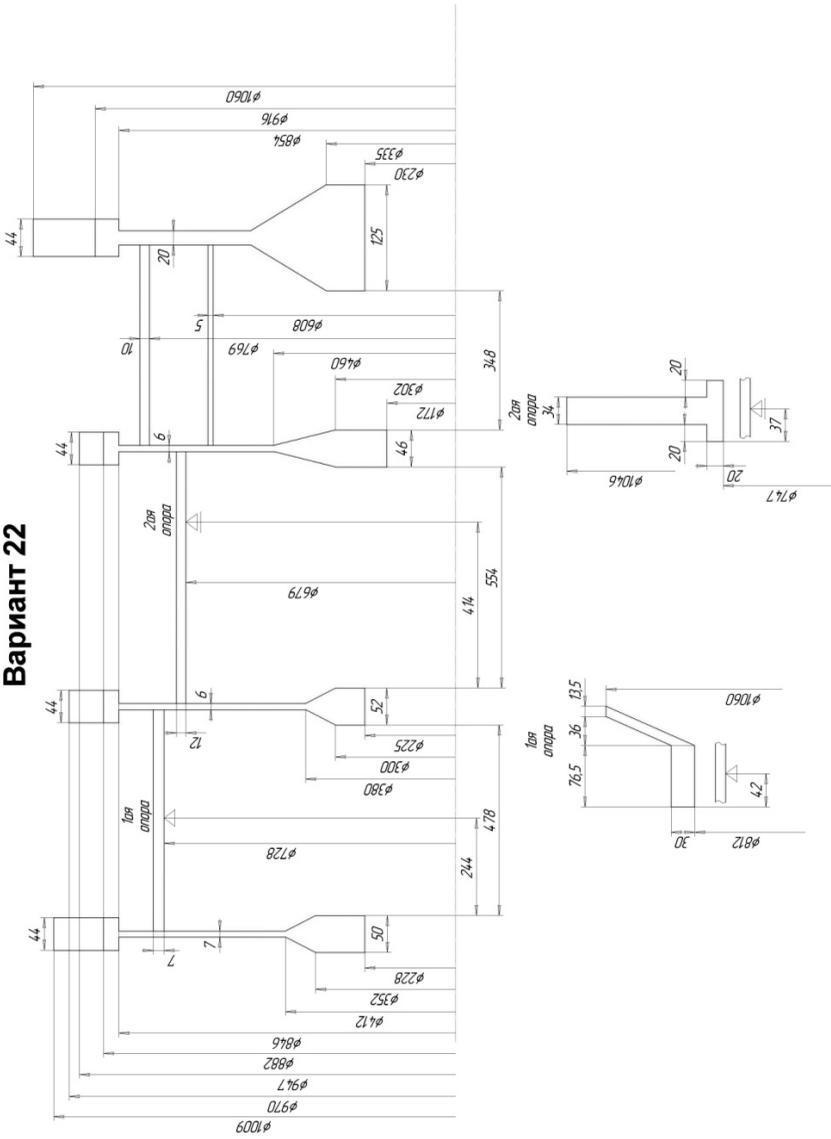


# Вариант 20

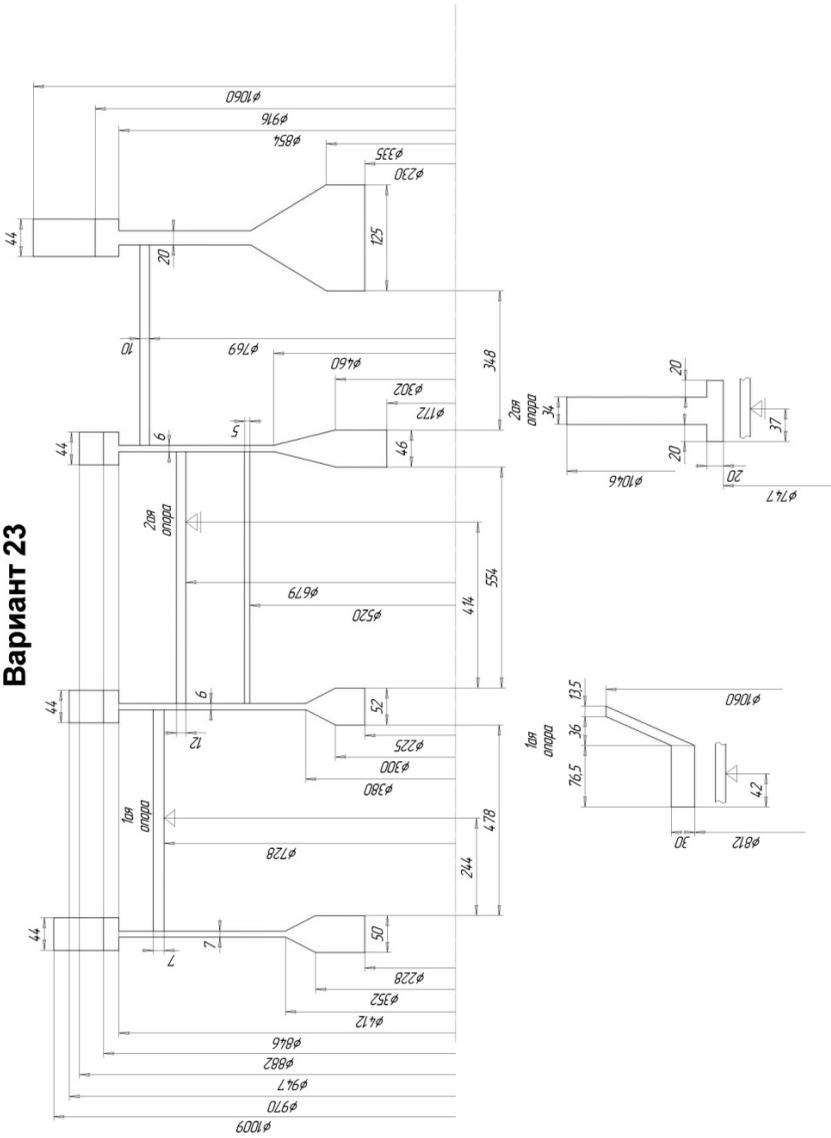




# Вариант 22

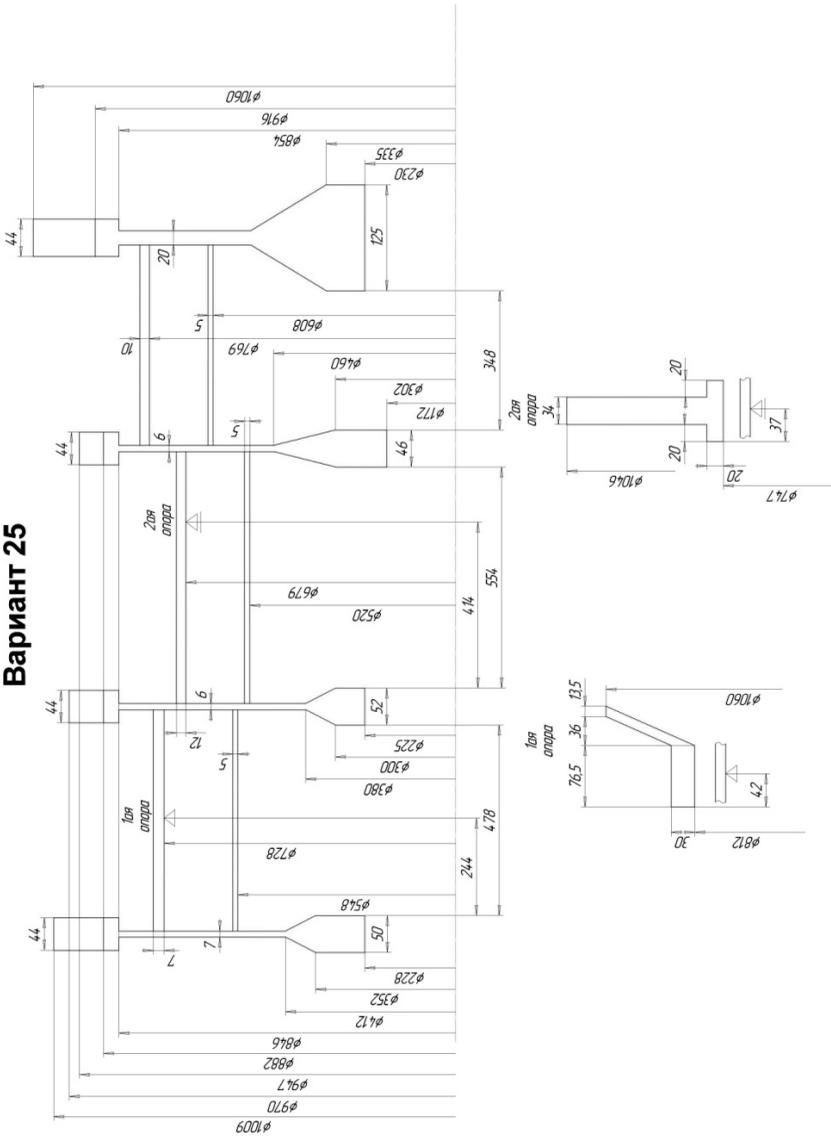


# Вариант 23

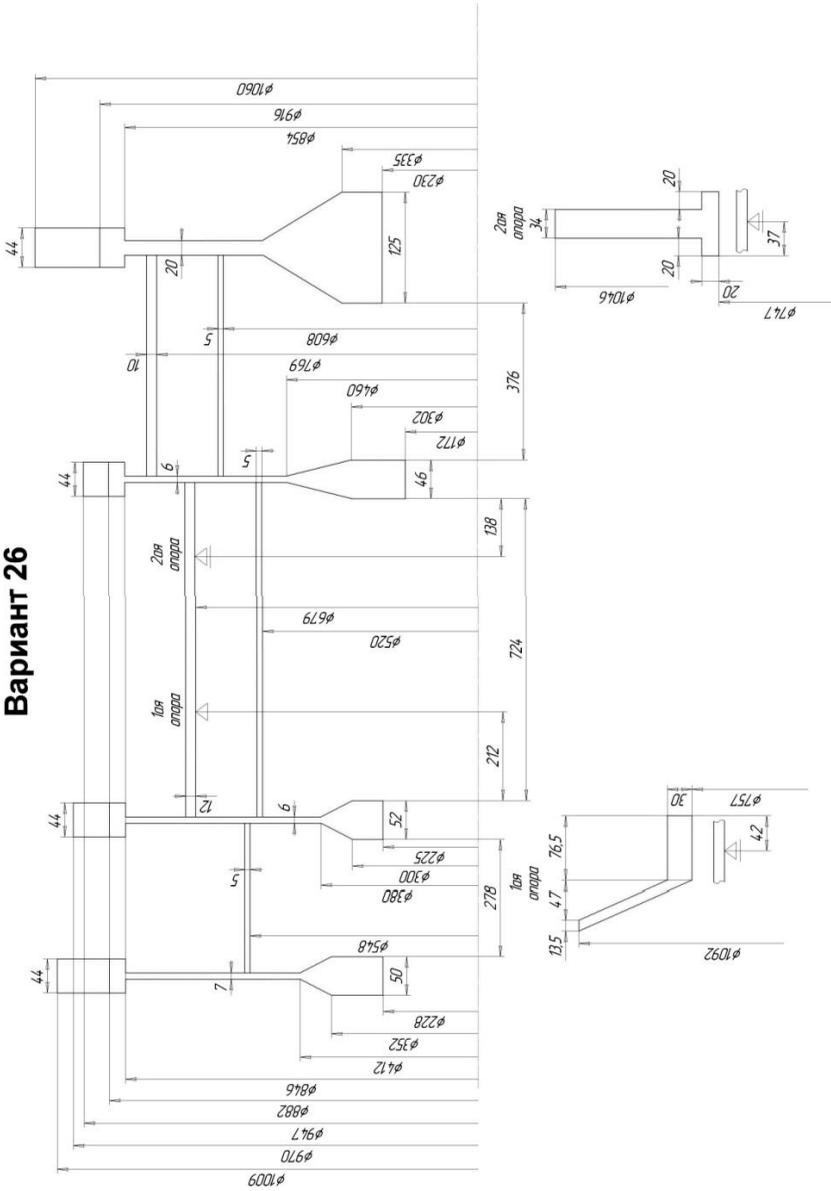




# Вариант 25

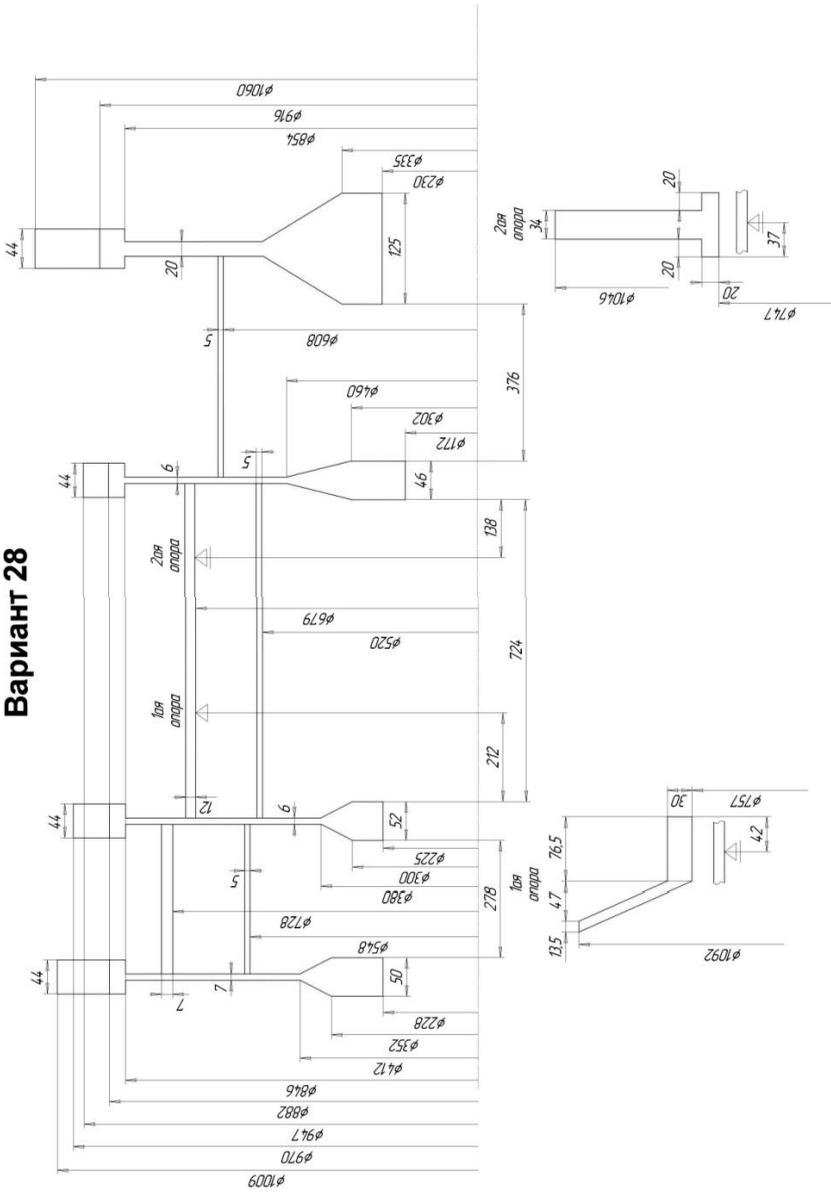


# Вариант 26

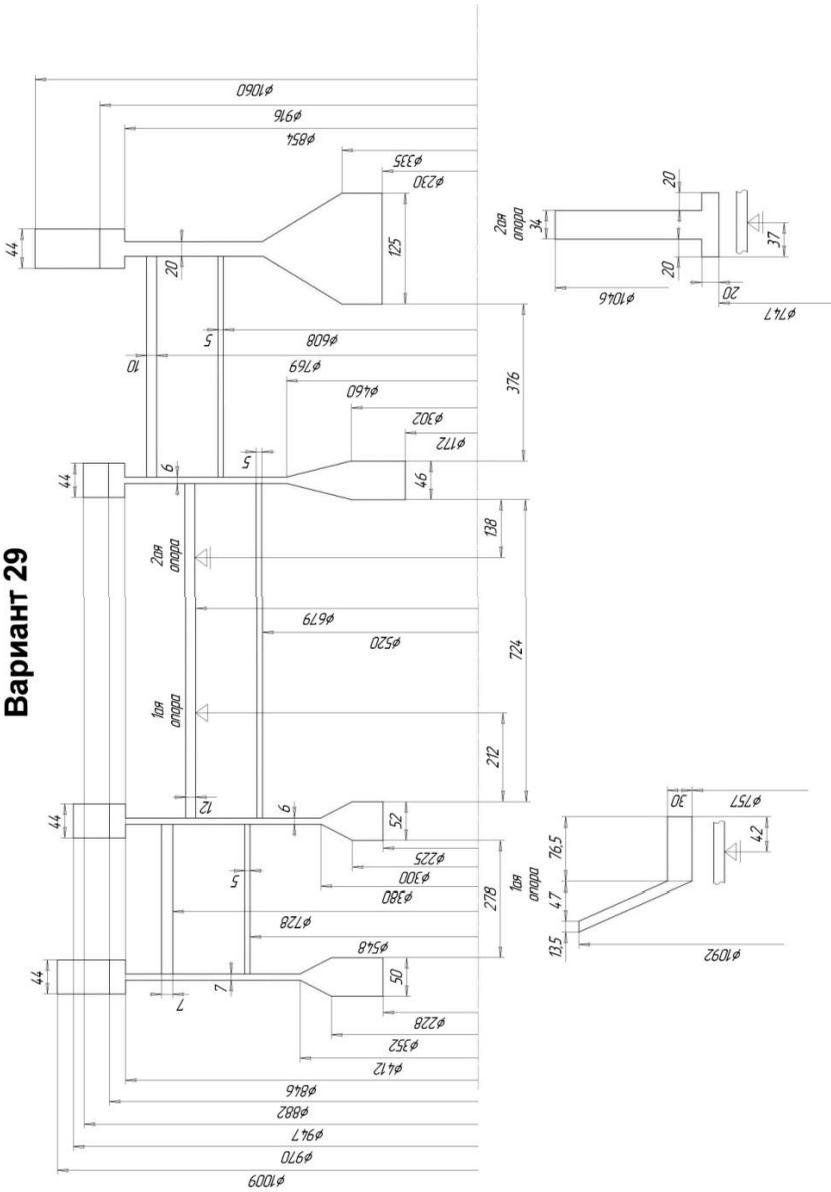




# Вариант 28



# Вариант 29



# Вариант 30

