



**ЦИАМ**

Центральный институт авиационного  
моторостроения имени П.И. Баранова

## Формирования требований к платформам для эскизного проектирования на примере Демонстратора ЦД

**Сальников Антон Владелинович**

Начальник отдела «Цифровое  
сопровождение жизненного цикла ГТД»



## Содержание

- **Проблемы эскизного проектирования**
- *Использование блок-схемы изделия*
- *Применение подхода на примере демонстратора ЦД*

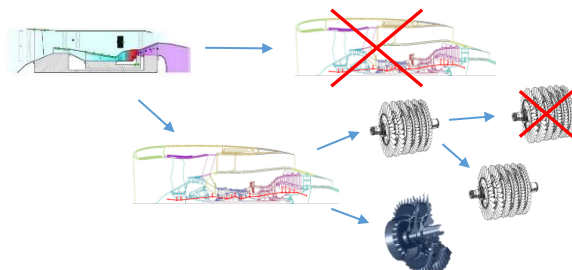
# Проблемы эскизного проектирования

## Основные составляющие

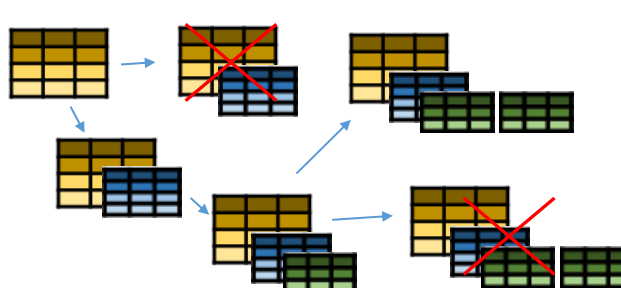


## Развитие в процессе проектирования

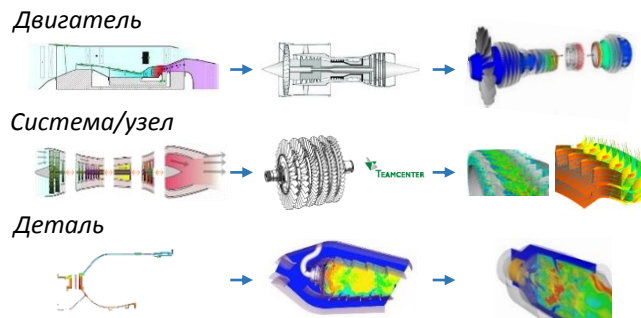
### Конкретизация конструкции



### Конкретизация требований



### Эволюция CAD и CAE моделей



## Требования к ЦП

- Связь составляющих
- Версионность конструкции
- Версионность требований
- Версионность моделей
- Хранение истории изменений с учетом связей
- Персонализация ответственности
- Конструктор требований
- Конструктор двигателя
- Конструктор расчетных цепочек

Основная задача платформы - оперативно отвечать на вопрос:

*Кто где когда и зачем что-то сделал*

## Содержание

- *Проблемы эскизного проектирования*
- ***Использование блок-схемы изделия***
- *Применение подхода на примере демонстратора ЦД*

# Использование блок-схемы изделия (преобразование документов)

Создание перечня типовых конструктивных элементов

Преобразование документов в элемент базы данных

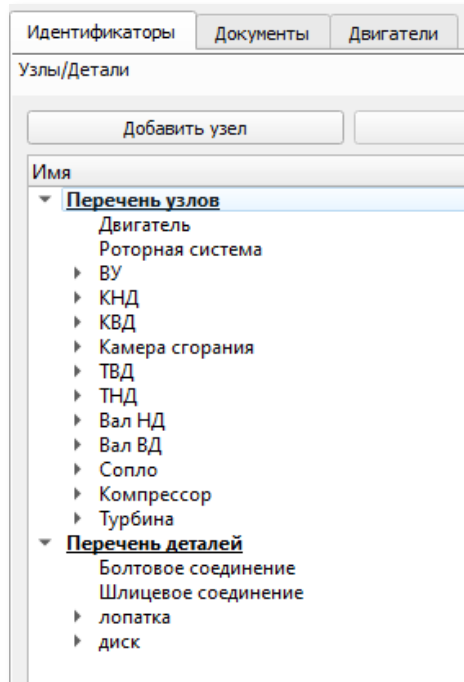
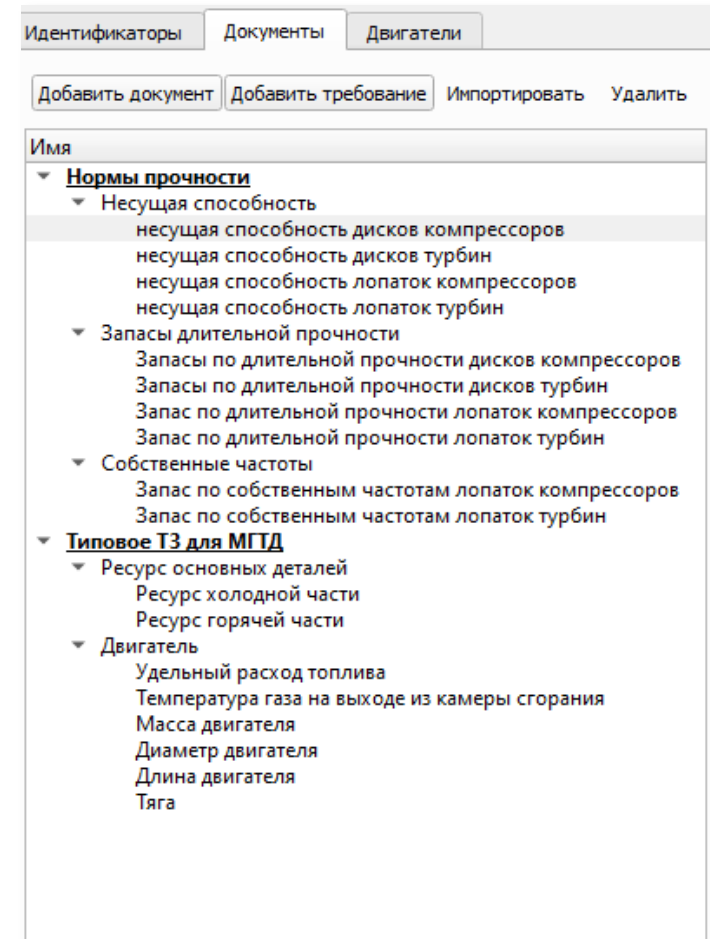


Таблица 1 – Основные расчетные данные демонстрационного двигателя ТРД-35

Режим работы/технические данные	Параметр	Обозначение и размерность	Значение параметра
Расчетный режим N=0, M=0, МСА, $\sigma_{\text{вх}} = 1,0$	Тяга, кгс	R, кгс	35
	Удельный расход топлива	$C_R$ , кг/(кгс×ч)	<1,4
	Температура газа на выходе из камеры сгорания	$T^*$ , К	<1250
Габаритные размеры двигателя	диаметр	D, мм	150
	длина	L, мм	< 520
Сухая масса двигателя		$M_{\text{дв}}$ , кг	≤ 13
Ресурс	Холодная часть	циклы	>10 000
	Горячая часть		>8 000



# Использование блок-схемы изделия (преобразование документов)

## Связь требования с типовыми конструктивными элементами

Идентификаторы

Документы

Двигатели

Добавить документ

Добавить требование

Импортировать

Удалить

Имя

Нормы прочности

Несущая способность

несущая способность дисков компрессоров

несущая способность дисков турбин

несущая способность лопаток компрессоров

несущая способность лопаток турбин

Запасы длительной прочности

Запасы по длительной прочности дисков компрессоров

Запасы по длительной прочности дисков турбин

Запас по длительной прочности лопаток компрессоров

Запас по длительной прочности лопаток турбин

Собственные частоты

Запас по собственным частотам лопаток компрессоров

Запас по собственным частотам лопаток турбин

Типовое ТЗ для МГД

Ресурс основных деталей

Ресурс холодной части

Ресурс горячей части

Двигатель

Удельный расход топлива

Температура газа на выходе из камеры сгорания

Масса двигателя

Диаметр двигателя

Длина двигателя

Тяга

Имя:

Номер раздела:  Страница раздела:

Название:

Описание:

Рекомендуемое значение: 

Меньше

кг

Сохранить

Восстановить

Этапы жизненного цикла

Удалить

Категории

Удалить

Узлы, Системы, Детали и т. п.:

Двигатель

Идентификаторы

Документы

Двигатели

Узлы/Детали

Добавить узел

Имя

Перечень узлов

Двигатель

Роторная система

ВУ

КНД

КВД

Камера сгорания

ТВД

ТНД

Вал НД

Вал ВД

Сопло

Компрессор

Турбина

Перечень деталей

Болтовое соединение

Шлицевое соединение

лопатка

диск

## Использование блок-схемы изделия (преобразование документов)

## Связь требования с типовыми конструктивными элементами

Идентификаторы

Документы

Двигатели

Добавить документ

Добавить требование

Импортировать

Удалить

Имя

- Нормы прочности
  - Несущая способность
    - несущая способность дисков компрессоров
    - несущая способность дисков турбин
    - несущая способность лопаток компрессоров
    - несущая способность лопаток турбин
  - Запасы длительной прочности
    - Запасы по длительной прочности дисков компрессоров
    - Запасы по длительной прочности дисков турбин
    - Запас по длительной прочности лопаток компрессоров
    - Запас по длительной прочности лопаток турбин
  - Собственные частоты
    - Запас по собственным частотам лопаток компрессоров
    - Запас по собственным частотам лопаток турбин
- Типовое ТЗ для МГТД
  - Ресурс основных деталей
    - Ресурс холодной части
    - Ресурс горячей части
  - Двигатель
    - Удельный расход топлива
    - Температура газа на выходе из камеры сгорания
    - Масса двигателя
    - Диаметр двигателя
    - Длина двигателя
    - Тяга

несущая способность дисков компрессоров

Имя:

несущая способность дисков компрессоров

Номер раздела:

0

Страница раздела:

0

Название:

Описание:

Рекомендуемое значение:

Больше

1.3

Сохранить

Восстановить

Этапы жизненного цикла

1Проектирование

Удалить

Категории

1Прочность Несущая способность

Удалить

Узлы, Системы, Детали и т. п.:

Компрессор

Рабочее колесо

диск

КВД

Рабочее колесо

диск

Рабочее колесо блиск

диск

Рабочее колесо ЦБК

диск

КНД

Рабочее колесо

диск

Рабочее колесо блиск

диск

Рабочее колесо ЦБК

диск

Идентификаторы

Документы

Двигатели

Узлы/Детали

Добавить узел

Имя

▼ **Перечень узлов**

Двигатель

Роторная система

▶ ВУ

▶ КНД

▶ КВД

▶ Камера сгорания

▶ ТВД

▶ ТНД

▶ Вал НД

▶ Вал ВД

▶ Сопло

▶ Компрессор

▶ Турбина

▼ **Перечень деталей**

Болтовое соединение

Шлицевое соединение

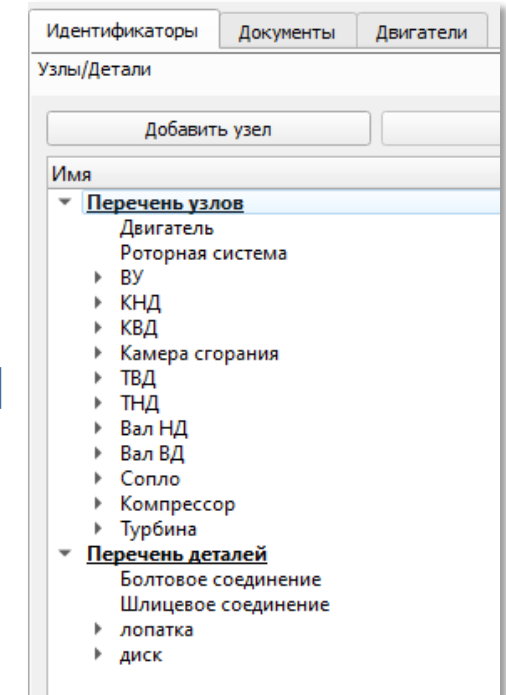
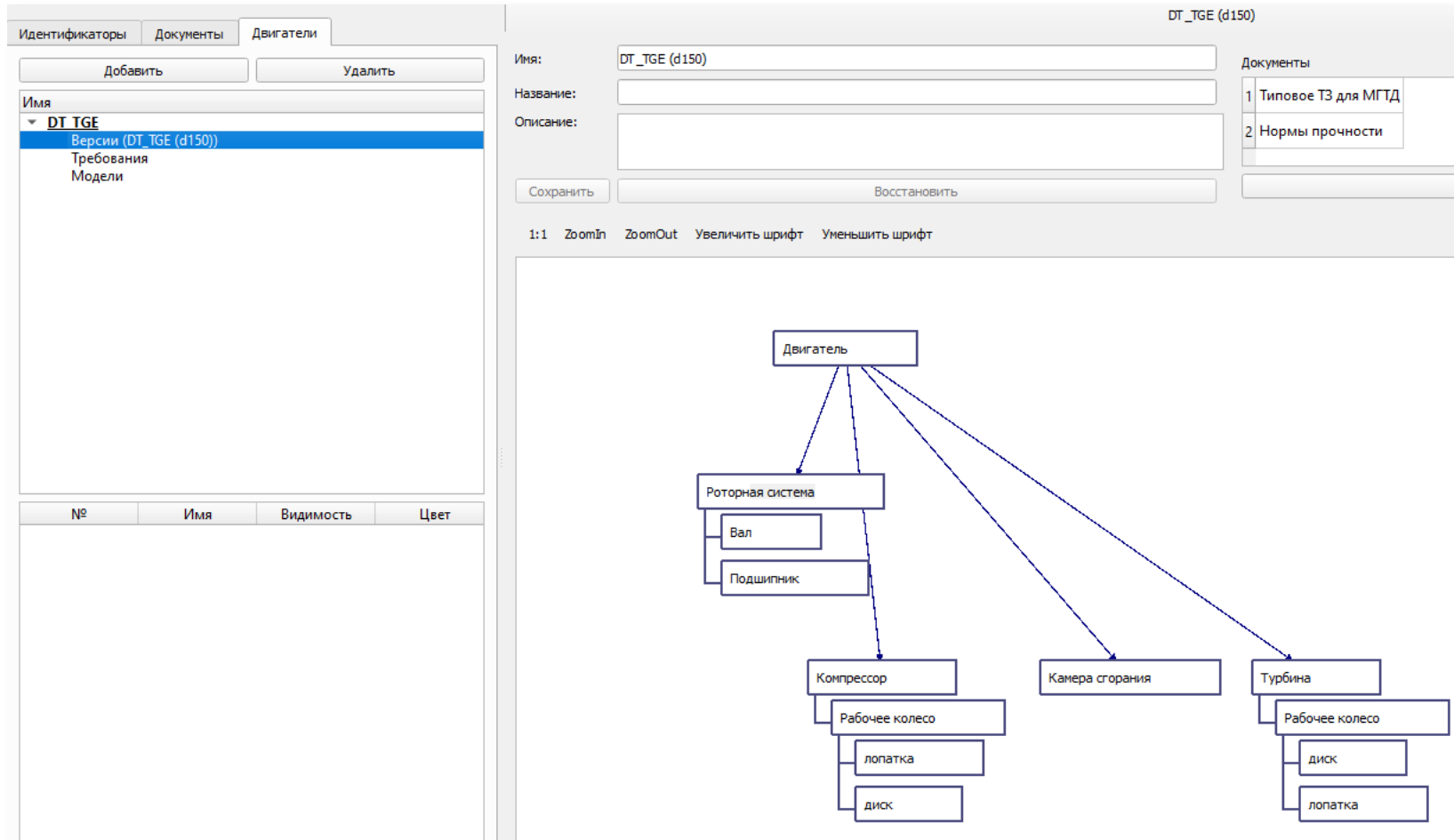
▶ лопатка

▶ диск



# Использование блок-схемы изделия (конструктор двигателя)

## Сборка схемы двигателя





# Использование блок-схемы изделия (автоматизированное создание МТ)

Автоматизированное создание МТ для всего изделия, исходя из собранной схемы



Идентификаторы | Документы | Двигатели

Добавить документ | Добавить требование | Импортировать | Удалить

Или

- Нормы прочности
  - Несущая способность
    - несущая способность дисков компрессоров
    - несущая способность дисков турбин
    - несущая способность лопаток компрессоров
    - несущая способность лопаток турбин
  - Запасы длительной прочности
    - Запасы по длительной прочности дисков компрессоров
    - Запасы по длительной прочности дисков турбин
    - Запас по длительной прочности лопаток компрессоров
    - Запас по длительной прочности лопаток турбин
  - Собственные частоты
    - Запас по собственным частотам лопаток компрессоров
    - Запас по собственным частотам лопаток турбин
- Типовое ТЗ для МГТД
  - Ресурс основных деталей
  - Ресурс холодной части
  - Ресурс горячей части
- Двигатель
  - Удельный расход топлива
  - Температура газа на выходе из камеры сгорания
  - Масса двигателя
  - Диаметр двигателя
  - Длина двигателя
  - Тяга

Двигатель											
Наименование	Документ	Узел	ПодУзел	Деталь	ПодДеталь	Этап ЖЦ	Категория	Подкатегория	Значение	Размерность	
Удельный расход топлива	Типовое ТЗ для МГТД	Двигатель							<1,4	кг/(кгс*ч)	
Температура газа на выходе из камеры сгорания	Типовое ТЗ для МГТД	Двигатель							<1250	К	
Масса двигателя	Типовое ТЗ для МГТД	Двигатель							<13	кг	
Диаметр двигателя	Типовое ТЗ для МГТД	Двигатель							=150	мм	
Длина двигателя	Типовое ТЗ для МГТД	Двигатель							<520	мм	
Тяга	Типовое ТЗ для МГТД	Двигатель							=35	Кгс	

Роторная система

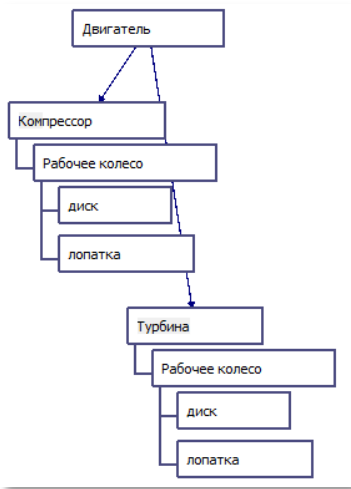
Камера сгорания

Компрессор

Турбина

# Использование блок-схемы изделия (автоматизированное создание МТ)

Автоматизированное создание МТ для всего изделия, исходя из собранной схемы



Идентификаторы | Документы | Двигатели

Добавить документ | Добавить требование | Импортировать | Удалить

Имя

Нормы прочности

Несущая способность несущая способность дисков компрессоров несущая способность дисков турбин несущая способность лопаток компрессоров несущая способность лопаток турбин

Запасы длительной прочности Запасы по длительной прочности дисков компрессоров Запасы по длительной прочности дисков турбин Запас по длительной прочности лопаток компрессоров Запас по длительной прочности лопаток турбин

Собственные частоты Запас по собственным частотам лопаток компрессоров Запас по собственным частотам лопаток турбин

Типовое ТЗ для МГД

Ресурс основных деталей Ресурс холодной части Ресурс горячей части

Двигатель

Удельный расход топлива Температура газа на выходе из камеры сгорания Масса двигателя Диаметр двигателя Длина двигателя Тага



Двигатель											
Наименование	Документ	Узел	ПодУзел	Деталь	ПодДеталь	Этап ЖЦ	Категория	Подкатегория	Значение	Размерность	
Удельный расход топлива	Типовое ТЗ для МГД	Двигатель							<1.4	кг/(кгс*ч)	
Температура газа на выходе из камеры сгорания	Типовое ТЗ для МГД	Двигатель							<1250	К	
Масса двигателя	Типовое ТЗ для МГД	Двигатель							<13	кг	
Диаметр двигателя	Типовое ТЗ для МГД	Двигатель							=150	мм	
Длина двигателя	Типовое ТЗ для МГД	Двигатель							<520	мм	
Тага	Типовое ТЗ для МГД	Двигатель							=35	Кгс	

Компрессор											
Рабочее колесо											
Наименование	Документ	Узел	ПодУзел	Деталь	ПодДеталь	Этап ЖЦ	Категория	Подкатегория	Значение	Размерность	
Ресурс холодной части	Типовое ТЗ для МГД	Компрес...	Рабочее колесо						>10000	Циклы	

лопатка											
Наименование	Документ	Узел	ПодУзел	Деталь	ПодДеталь	Этап ЖЦ	Категория	Подкатегория	Значение	Размерность	
несущая способность лопаток компрессоров	Нормы прочности	Компрес...	Рабочее колесо	лопат...		Проектирова...	Прочно...	Несущая способность	>2		

диск											
Наименование	Документ	Узел	ПодУзел	Деталь	ПодДеталь	Этап ЖЦ	Категория	Подкатегория	Значение	Размерность	
несущая способность дисков компрессоров	Нормы прочности	Компрес...	Рабочее колесо	диск		Проектирова...	Прочно...	Несущая способность	>1.3		

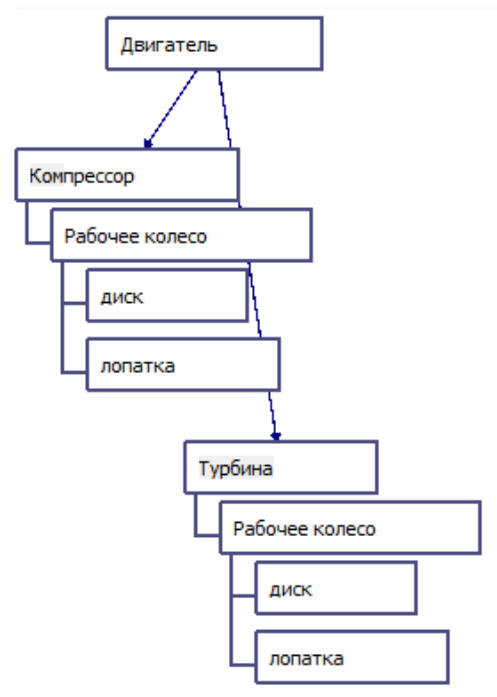
Турбина											
Рабочее колесо											
Наименование	Документ	Узел	ПодУзел	Деталь	ПодДеталь	Этап ЖЦ	Категория	Подкатегория	Значение	Размерность	
Ресурс горячей части	Типовое ТЗ для МГД	Турбина	Рабочее колесо						>8000	циклы	

лопатка											
Наименование	Документ	Узел	ПодУзел	Деталь	ПодДеталь	Этап ЖЦ	Категория	Подкатегория	Значение	Размерность	
несущая способность лопаток турбин	Нормы прочности	Турбина	Рабочее колесо	лопат...		Проектирова...	Прочно...	Несущая способность	>3		

диск											
Наименование	Документ	Узел	ПодУзел	Деталь	ПодДеталь	Этап ЖЦ	Категория	Подкатегория	Значение	Размерность	
несущая способность дисков турбин	Нормы прочности	Турбина	Рабочее колесо	диск		Проектирова...	Прочно...	Несущая способность	>1.4		

# Использование блок-схемы изделия (автоматизированное создание МТ)

## Автоматизированное создание МТ для отдельных узлов



Документы	
1	Типовое ТЗ для МГТД
2	Нормы прочности

Компрессор										
Рабочее колесо										
Наименование	Документ	Узел	ПодУзел	Деталь	ПодДеталь	Этап ЖЦ	Категория	Подкатегория	Значение	Размерность
Ресурс холодной части	Типовое ТЗ для МГТД	Компрес...	Рабочее колесо						> 10000	Циклы
лопатка										
Наименование	Документ	Узел	ПодУзел	Деталь	ПодДеталь	Этап ЖЦ	Категория	Подкатегория	Значение	Размерность
несущая способность лопаток компрессоров	Нормы прочности	Компрес...	Рабочее колесо	лопат...		Проектирова...	Прочно...	Несущая способность	> 2	
диск										
Наименование	Документ	Узел	ПодУзел	Деталь	ПодДеталь	Этап ЖЦ	Категория	Подкатегория	Значение	Размерность
несущая способность дисков компрессоров	Нормы прочности	Компрес...	Рабочее колесо	диск		Проектирова...	Прочно...	Несущая способность	> 1.3	

Постановка задачи оптимизации РК компрессора

Турбина										
Рабочее колесо										
Наименование	Документ	Узел	ПодУзел	Деталь	ПодДеталь	Этап ЖЦ	Категория	Подкатегория	Значение	Размерность
Ресурс горячей части	Типовое ТЗ для МГТД	Турбина	Рабочее колесо						> 8000	циклы
лопатка										
Наименование	Документ	Узел	ПодУзел	Деталь	ПодДеталь	Этап ЖЦ	Категория	Подкатегория	Значение	Размерность
несущая способность лопаток турбин	Нормы прочности	Турбина	Рабочее колесо	лопат...		Проектирова...	Прочно...	Несущая способность	> 3	
диск										
Наименование	Документ	Узел	ПодУзел	Деталь	ПодДеталь	Этап ЖЦ	Категория	Подкатегория	Значение	Размерность
несущая способность дисков турбин	Нормы прочности	Турбина	Рабочее колесо	диск		Проектирова...	Прочно...	Несущая способность	> 1.4	

Постановка задачи оптимизации РК турбины

# Использование блок-схемы изделия (управление расчетными цепочками)

Связь конструктивных элементов и расчетных цепочек:

- Модели
- Связи
- Результаты вычислений (одного, нескольких или оптимизации)

Идентификаторы | Документы | Двигатели

Добавить | Удалить

Имя

DT\_TGE

Версии (DT\_TGE (Компрессор))

Требования

Модели

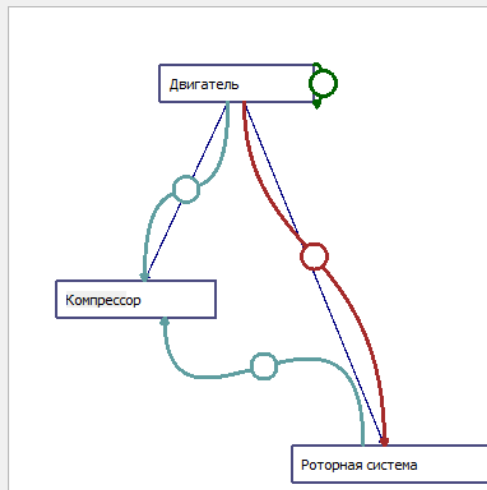
Имя: DT\_TGE (Компрессор)

Название:

Описание:

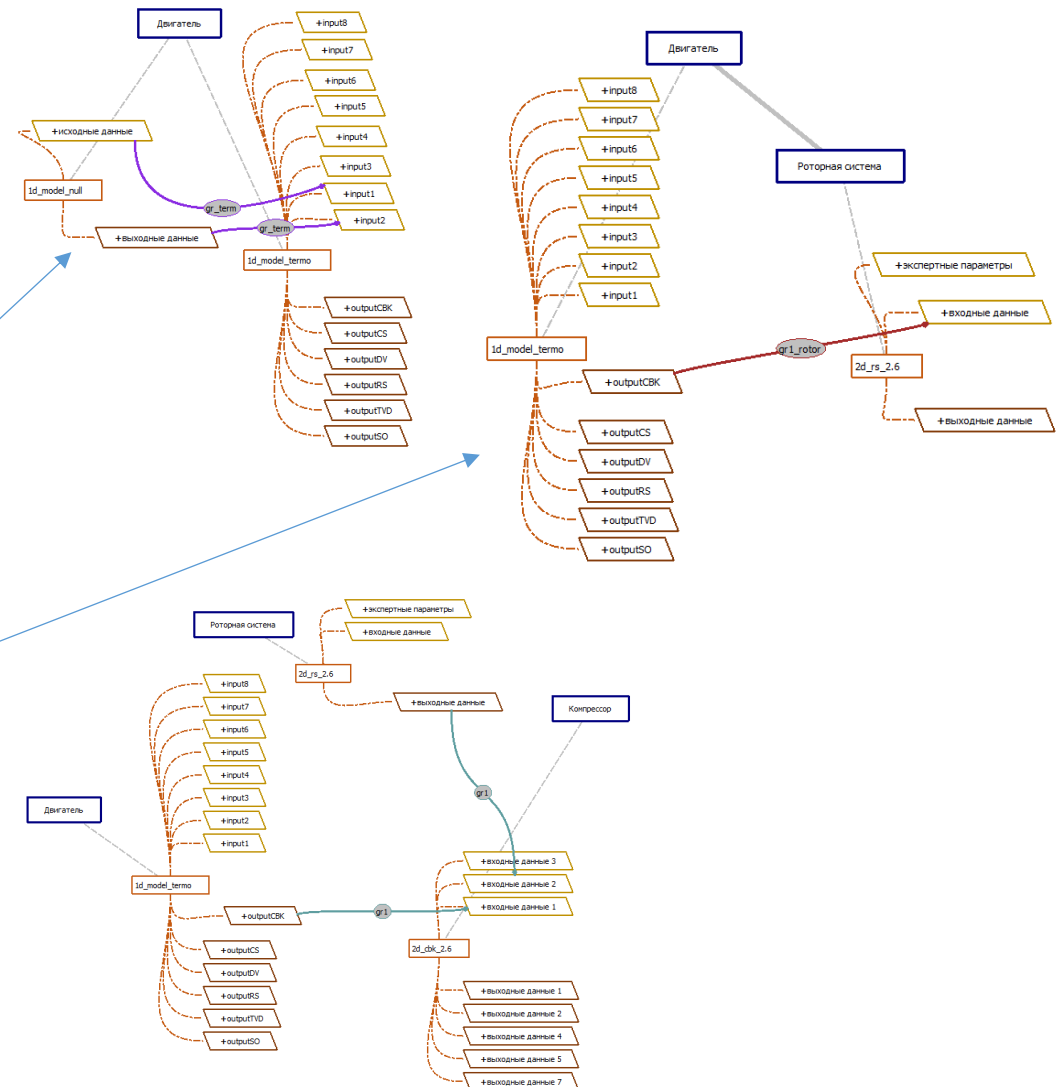
Сохранить | Восстановить

1:1 | ZoomIn | ZoomOut | Увеличить шрифт | Уменьшить шрифт



№	Имя	Видимость	Цвет
22	1_term	true	#006400
23	2_rotor_system	true	#a52a2a
24	3_comp	true	#5f9ea0

Отображение последовательности вычислений в виде слоев



## Использование блок-схемы изделия (управление расчетными цепочками)

## Связь моделей/результатов и элементов схемы двигателя

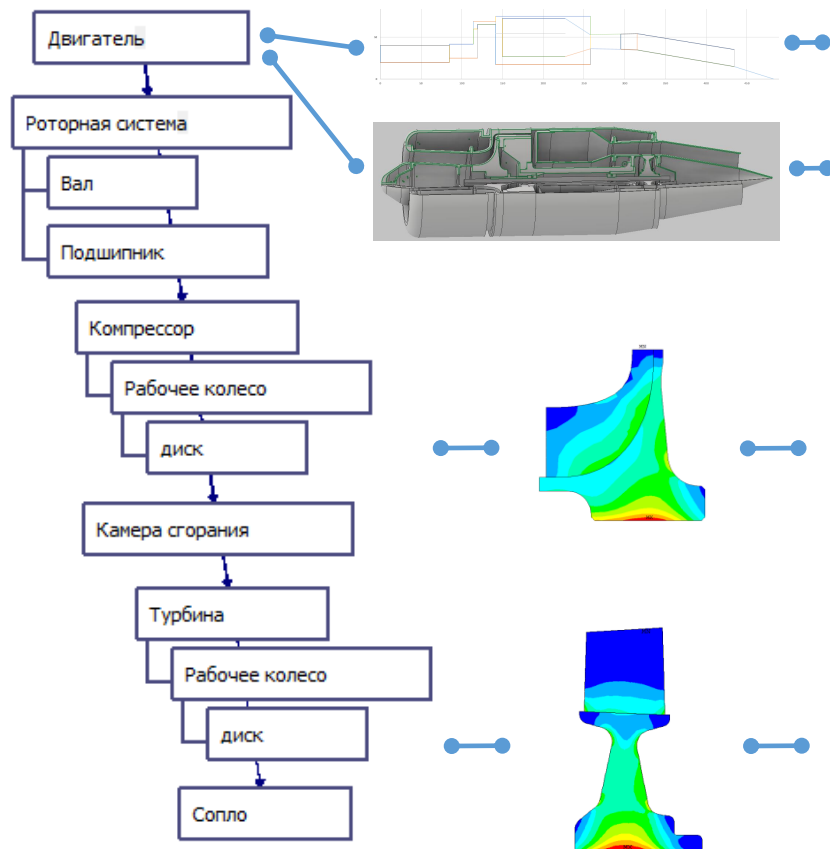
The screenshot displays the DT\_TGE (d150) software interface, which is used for engine design and analysis. The interface is divided into several sections:

- Top Bar:** Contains tabs for "Идентификаторы" (Identifiers), "Документы" (Documents), and "Двигатели" (Engines).
- Left Panel:**
  - Buttons:** "Добавить" (Add) and "Удалить" (Delete).
  - Имя (Name):** DT\_TGE
  - Версии (DT\_TGE (Компрессор)) (Versions):** A list of versions with columns for "№" (Number), "Имя" (Name), "Видимость" (Visibility), and "Цвет" (Color).
 

№	Имя	Видимость	Цвет
22	1_term	true	#006400
23	2_rotor_system	true	#a52a2a
24	3_comp	true	#5f9ea0
- Right Panel:**
  - Имя (Name):** DT\_TGE (Компрессор)
  - Название (Title):**
  - Описание (Description):**
  - Buttons:** "Сохранить" (Save) and "Восстановить" (Restore).
  - Zoom Controls:** "1:1", "ZoomIn", "ZoomOut", "Увеличить шрифт" (Increase font size), and "Уменьшить шрифт" (Decrease font size).
- Central Area:**
  - Hierarchical Tree:** A tree structure showing the engine components. The root is "Двигатель" (Engine), which branches into "Роторная система" (Rotor system), "Компрессор" (Compressor), "Камера сгорания" (Combustion chamber), "Турбина" (Turbine), and "Сопло" (Nozzle). Further sub-components include "Вал" (Shaft), "Подшипник" (Bearing), "Рабочее колесо" (Impeller), and "Диск" (Disk).
  - 3D Model:** A 3D rendering of the engine assembly, showing the internal components and the external casing.
  - Graphs:** Several graphs are displayed, including a pressure ratio vs. mass flow rate graph, a temperature vs. mass flow rate graph, and a power vs. mass flow rate graph.

# Использование блок-схемы изделия (автоматическая проверка требований)

Связь требований, моделей и результатов – автоматизация процесса проверки



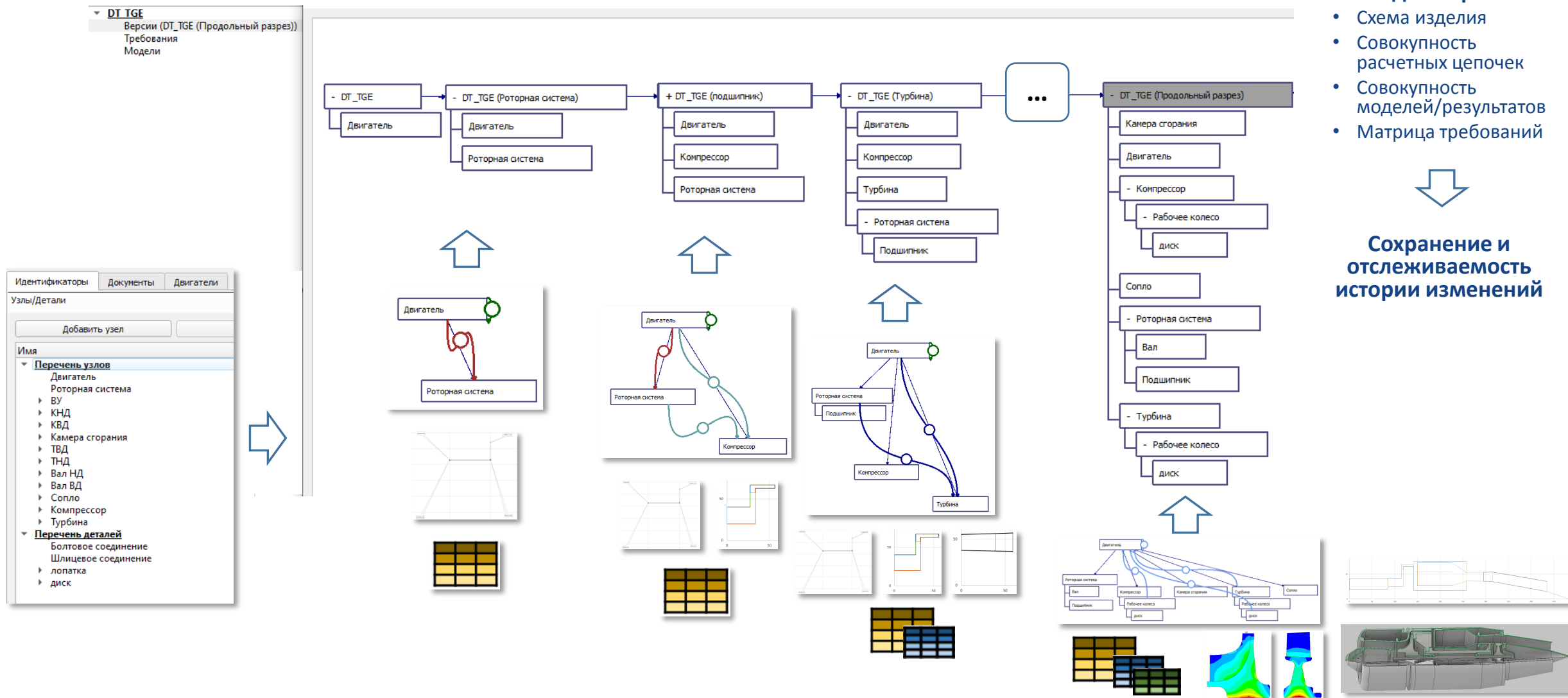
Двигатель												
Наименование	Документ	Узел	ПодУзел	Деталь	ПодДеталь	Этап ЖЦ	Категория	Подкатегория	Значение	Размерность		Утверждено
Удельный расход топлива	Типовое ТЗ для МГТД	Двигатель					Расход топлива	Расход топлива	<1.4	кг/(кгс*ч)	Чат С П Г 1.1225	✓
Масса двигателя	Типовое ТЗ для МГТД	Двигатель					Весовые показатели	Весовые показатели	<13	кг	Чат С П Г 12.3347	✓
Диаметр двигателя	Типовое ТЗ для МГТД	Двигатель					Конструкция	Конструкция	≈150	мм	Чат С П Г	
Длина двигателя	Типовое ТЗ для МГТД	Двигатель					Конструкция	Конструкция	<520	мм	Чат С П Г 516.7	✓
Тага	Типовое ТЗ для МГТД	Двигатель							≈35	Кгс	Чат С П Г	

Компрессор												
Рабочее колесо												
диск												
Наименование	Документ	Узел	ПодУзел	Деталь	ПодДеталь	Этап ЖЦ	Категория	Подкатегория	Значение	Размерность		Утверждено
Ресурс холодной части	Типовое ТЗ для МГТД	Компрес...	Рабочее колесо	диск			Прочность	Прочность	>10000	Циклы	Чат С П Г 14860	✓
несущая способность дисков компрессоров (KB1)	Нормы прочности	Компрес...	Рабочее колесо	диск		Проектирова...	Прочность	Несущая способность	>1.4		Чат С П Г 1.8223	✓

Турбина												
Рабочее колесо												
диск												
Наименование	Документ	Узел	ПодУзел	Деталь	ПодДеталь	Этап ЖЦ	Категория	Подкатегория	Значение	Размерность		Утверждено
Ресурс горячей части	Типовое ТЗ для МГТД	Турбина	Рабочее колесо	диск			Прочность	Прочность	>8000	циклы	Чат С П Г 8149	✓
несущая способность дисков турбин (KB1)	Нормы прочности	Турбина	Рабочее колесо	диск		Проектирова...	Прочность	Несущая способность	>1.4		Чат С П Г 1.602	✓
несущая способность дисков турбин (KB2)	Нормы прочности	Турбина	Рабочее колесо	диск			Прочность	Прочность	>1.4		Чат С П Г 1.4035	✓

## Использование блок-схемы изделия (управление версиями)

## Реализация последовательностей шагов проектирования в виде цепочки версий



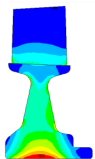
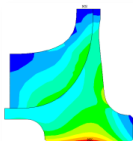
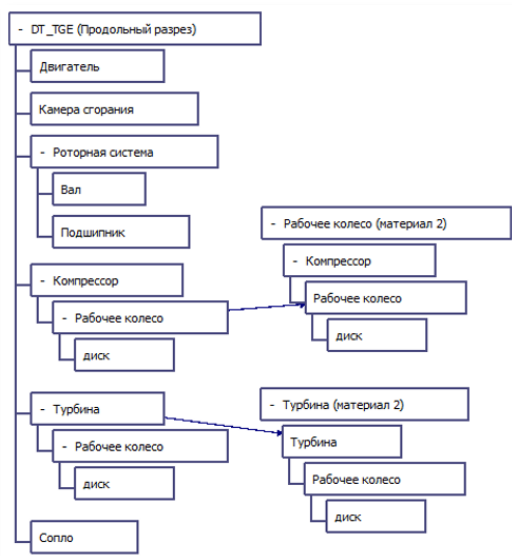
# Использование блок-схемы изделия (управление версиями)

Возможность копирования версии и её содержимого:

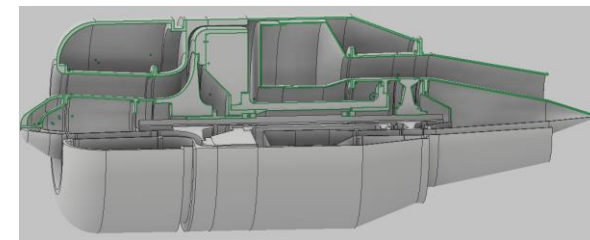
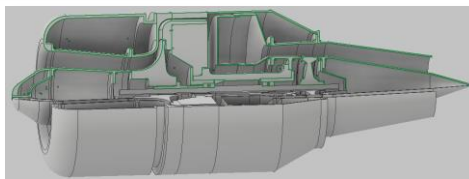
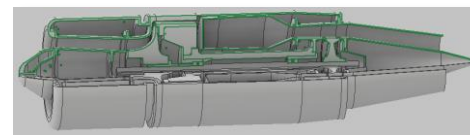
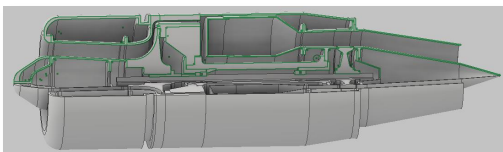
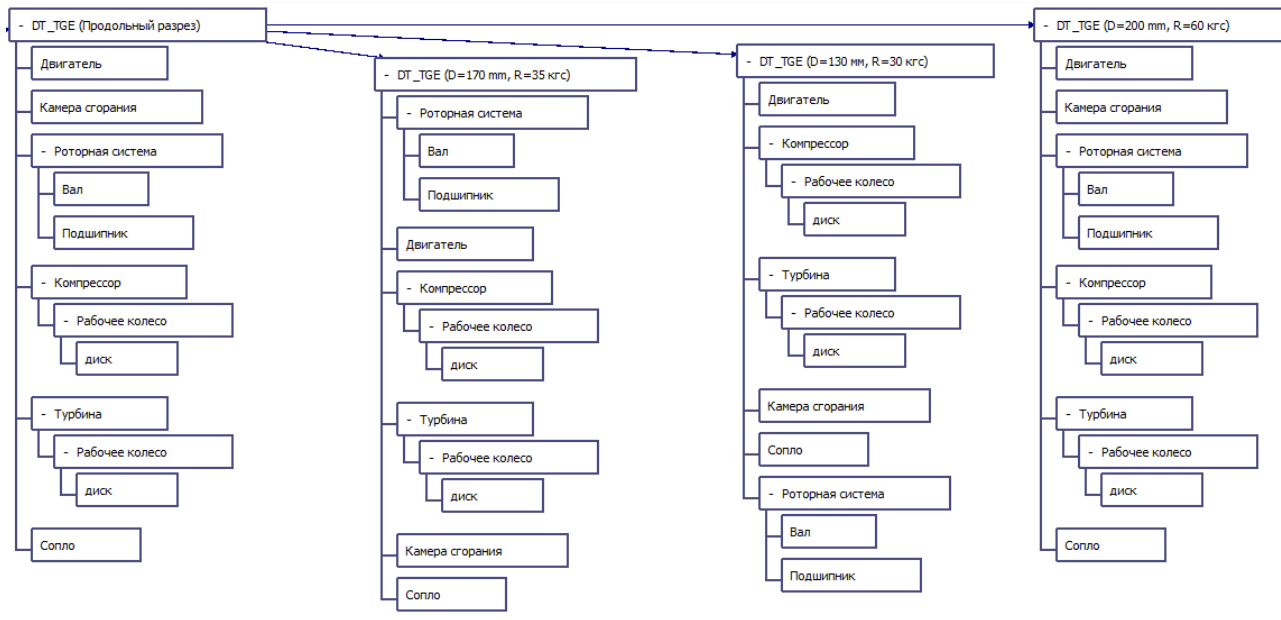
- Схема
- Модели
- Расчетные цепочки
- Матрицы требований



## Локальные исследования



## Глобальные исследования





## Содержание

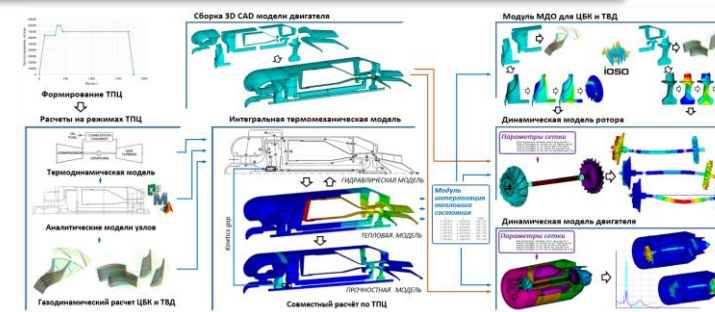
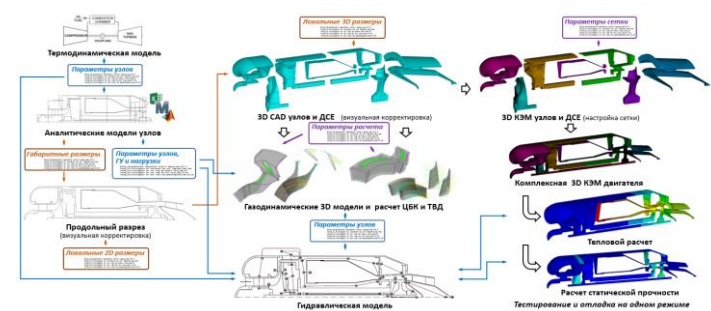
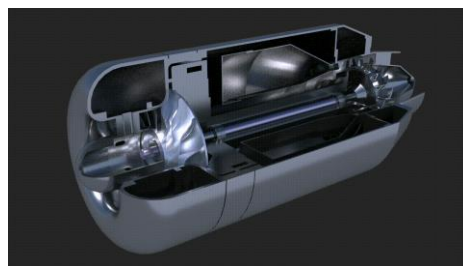
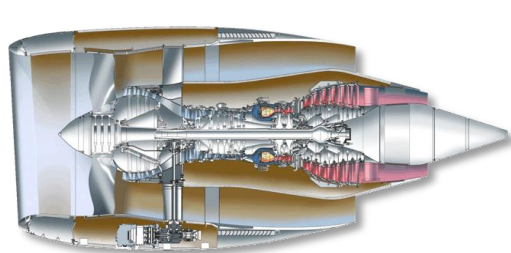
- *Проблемы эскизного проектирования*
- *Использование блок-схемы изделия*
- ***Применение подхода на примере демонстратора ЦД***

# Демонстратор цифрового двойника ГТД

*Полноценный ЦД ГТД – 6-10 лет.*

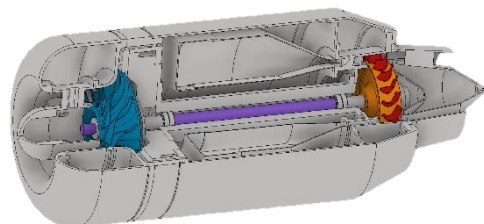
*Демонстратор ЦД (экспериментальный ТРД тягой 35 кгс, упрощенной конструкции) – 2-4 года*

**Цели создания** – формирование в короткие сроки НТЗ в области применения технологии ЦД (и смежных с ней технологий) в течение жизненного цикла ГТД (разработка, испытания, производство, эксплуатация)

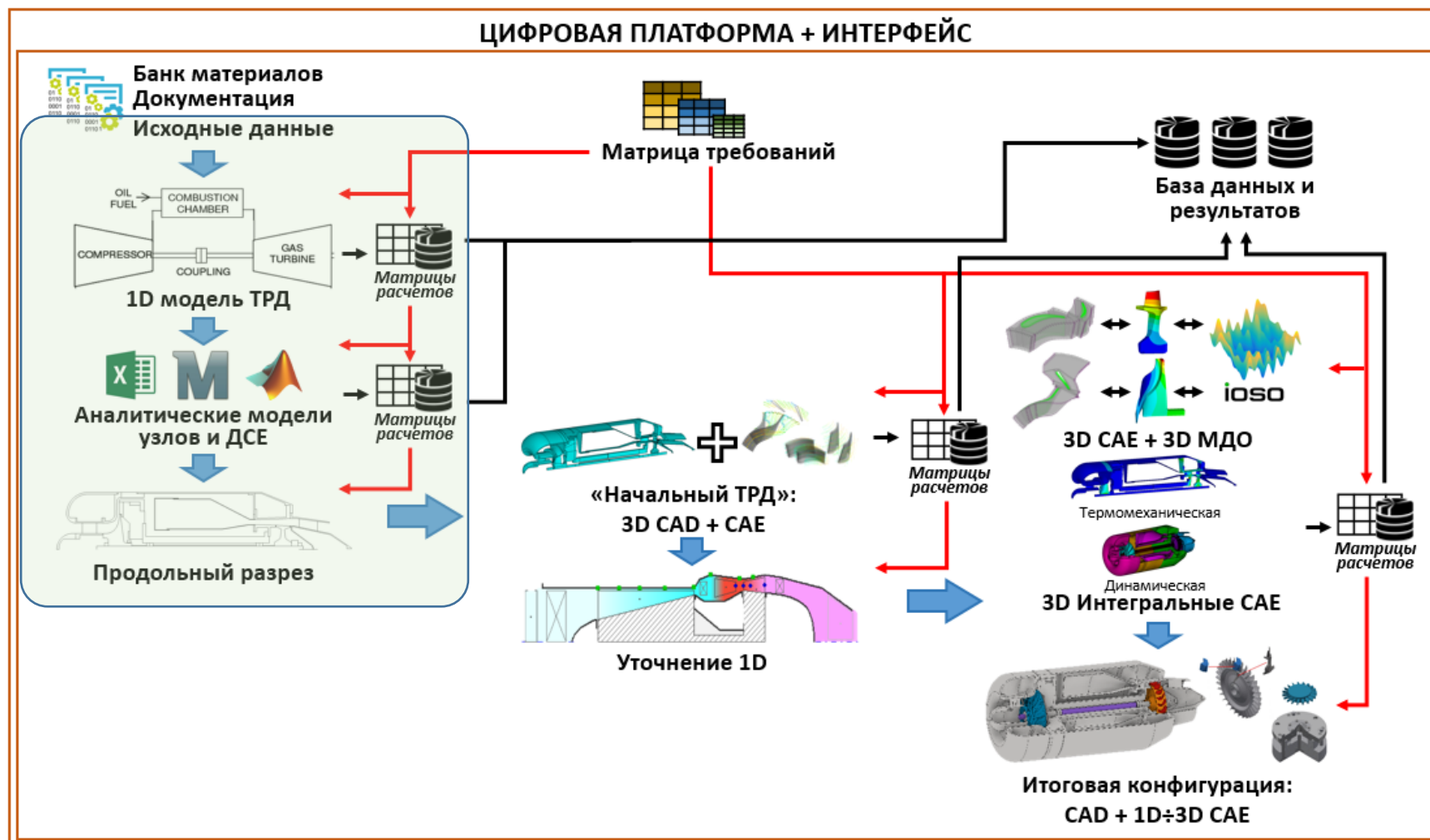


**Полная автоматизация и параметризация**

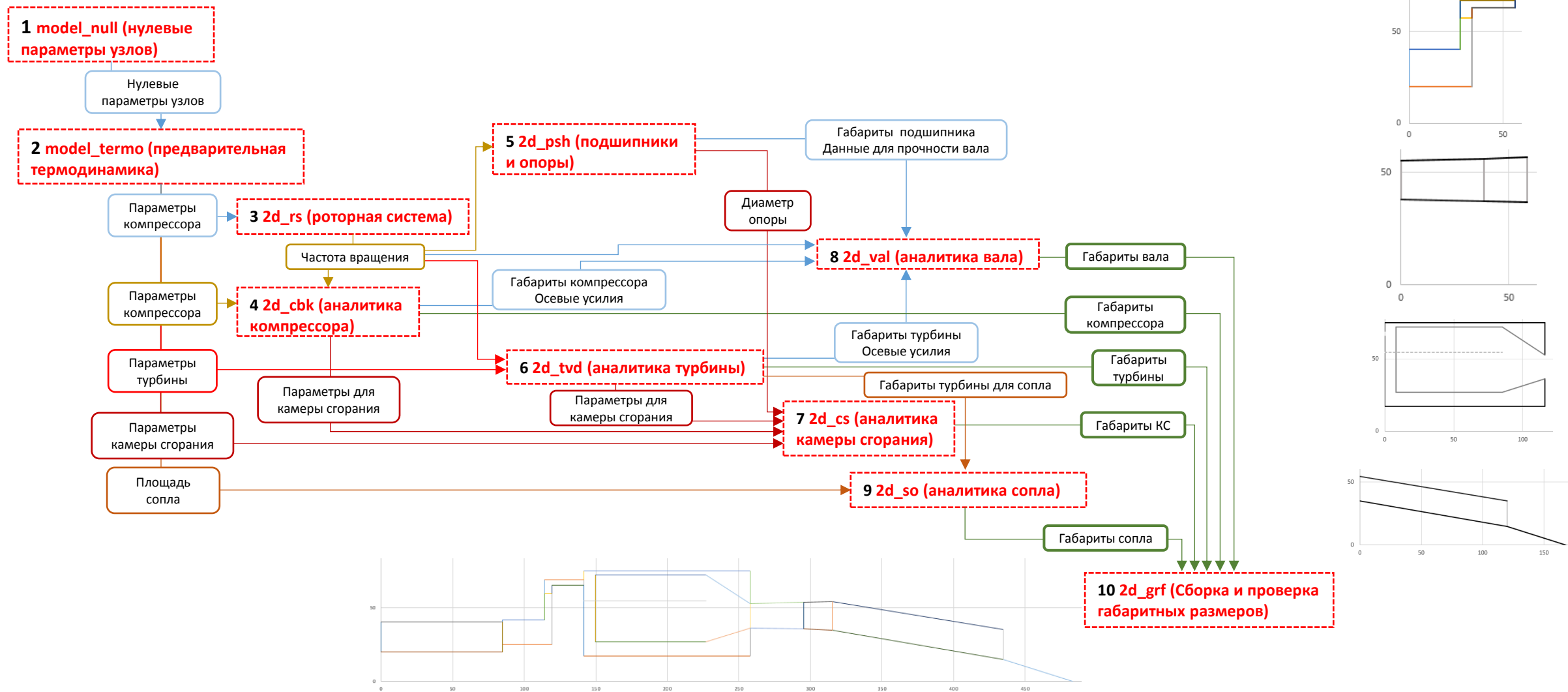
# Демонстратор цифрового двойника ГТД



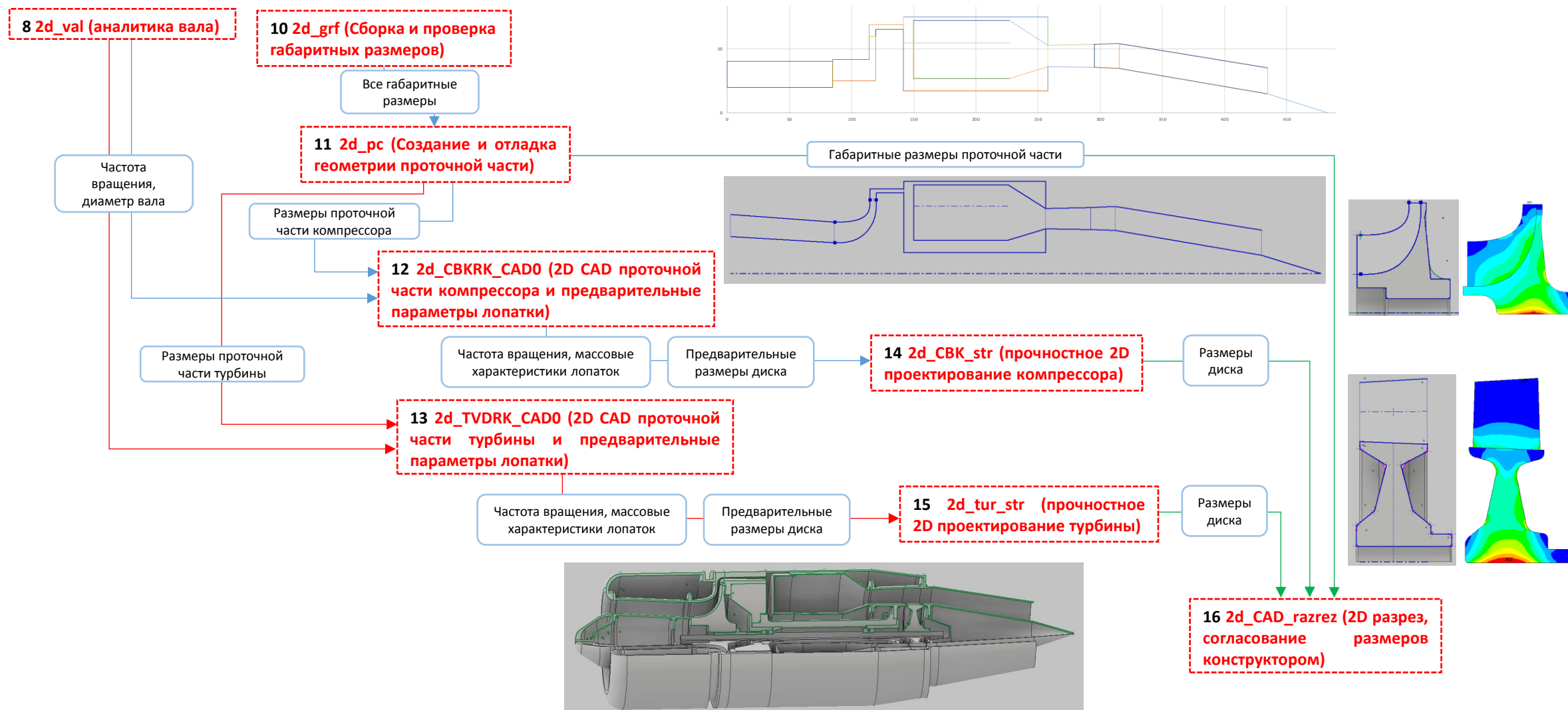
1d\_model\_null  
1d\_model\_termo  
2d\_rs\_2.6  
2d\_cbk\_2.6  
2p\_psh  
2d\_tvd  
2d\_cs  
2d\_val  
2d\_so\_2.6  
2d\_grf\_2.6  
2d\_pc  
2d\_CBK RK\_CAD0  
2d\_cbk\_str  
2d\_TVDRK\_CAD0  
2d\_tvd\_str  
2d\_raz



# Структура демонстратора цифрового двойника ГТД

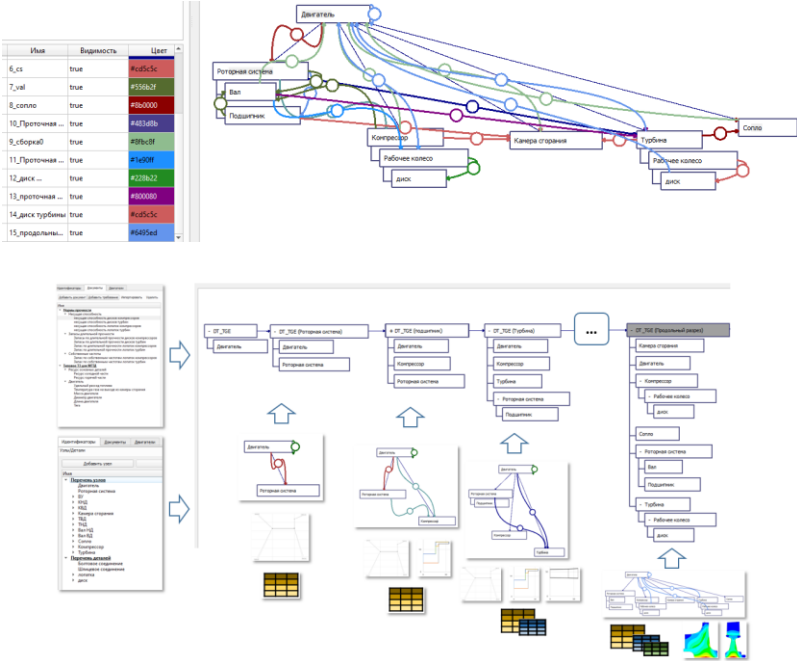


# Структура демонстратора цифрового двойника ГТД



# Применение подхода на примере демонстратора ЦД

- 1. Обработка документов
- 2. Реализация логики эскизного проектирования в платформе (1-2 часа)
- 3. Разработка конструкции для  $D=150\text{мм}$ ,  $R=35\text{ кгс}$  (30 минут)
- 4. Копирование версий и проведение глобальных исследований (15 минут)



Диаметр, мм	Тяга, кгс	Масса, кг	Длина, мм	
150	35	12.8	545	
170	35	14.4	485	
130	30	10.4	534	
200	60	19.2	539	

# Выводы

Использование схемы конструкции изделия вышеописанным образом позволяет:

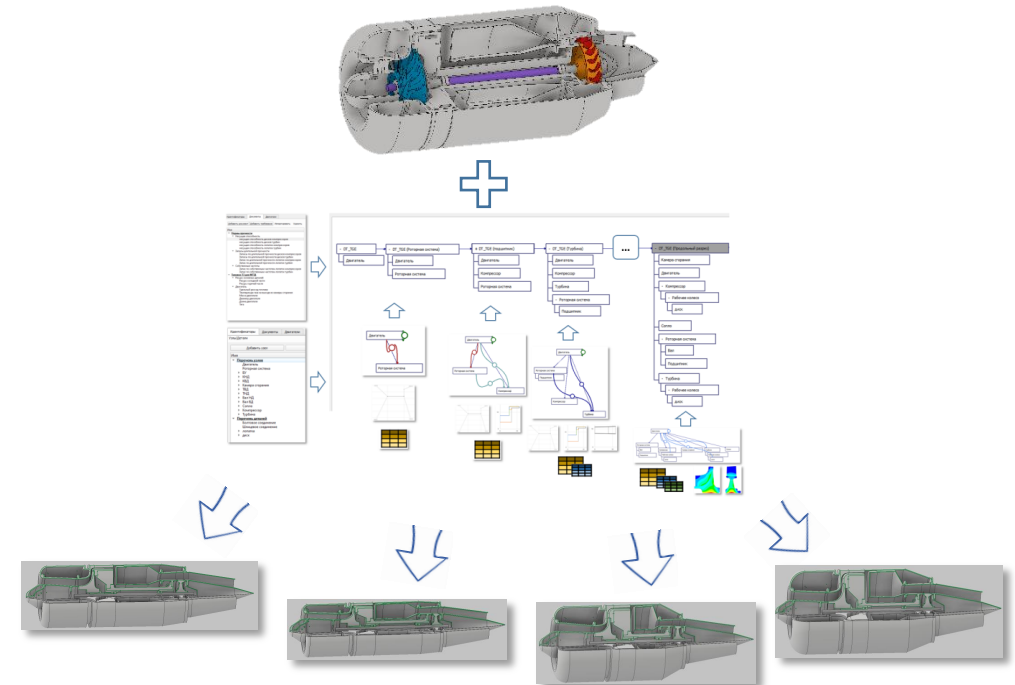
- Логически соединить через типовые конструктивные элементы требования, модели, расчетный цепочки и анализируемую схему конструкции
- Автоматизировать процесс сборки и проверки матриц требований
- Автоматизировать постановку задач оптимизации для узлов/деталей
- Реализовать версиюность, что дает возможность прослеживать историю изменений конструкции, моделей и требований



- Прозрачность и удобство управление этапами аван. и эскизного проектирования
- Уменьшение времени и трудоемкости

Демонстратор ЦД + Описанный подход =

- Платформа для обучения
- Платформа для проектирования малоразмерных ГТД
- Платформа для тестирования отечественного ПО





# Спасибо за внимание!

**ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова»**

111116, Россия, Москва,  
ул. Авиамоторная, 2  
**[www.ciam.ru](http://www.ciam.ru)**

**Тел.:** +7 (499) 763 61 67  
**E-mail:** [info@ciam.ru](mailto:info@ciam.ru)