

Конкурсная работа на участие в «Авиастроитель года» по итогам 2023 года  
в номинации: «Лучший инновационный проект»

«Разработка элементов цифрового двойника  
модернизированного двигателя АИ-222-25»

Авторы: Сальников А.В., Кинзбургский В.С., Корлюк Ю.А., Милешин В.И.,  
Нигматуллин Р.З., Кожемяко П.Г., Васильев А.Ю., Тарасенко А.Н.,  
Татарников Д.А., Иванченко Н.Ю., Иванов И.И., Мясников В.Ю.,  
Стародубцев В.В., Минаев А.А., Марченко И.В., Андреева Н.С.,  
Ананьев В. В., Чепига С.А., Мещеряков В.Ю.

ФАУ «ЦИАМ им П.И. Баранова» совместно с ПК «Салют» АО «ОДК»

Ключевые слова: Цифровой двойник, матрица требований, динамическая модель, термомеханическая модель, компрессор, камера сгорания, турбина, виртуальные испытания, термодинамическая модель, оптимизация

## ВВЕДЕНИЕ

Внедрение технологии цифровых двойников [1] (ЦД) в жизненный цикл (ЖЦ) газотурбинного двигателя (ГТД) позволяет в рамках единой цифровой среды интегрировать требования, предъявляемые к изделию, компьютерные модели (КМ), используемые для прогнозирования выполнения этих требований и многообразие реальных данных, получаемых в процессе испытаний, производства и эксплуатации изделия. Такой подход [2] позволяет аккумулировать весь накопленный опыт проектирования и доводки двигателей, повышает прозрачность и понимание того, что происходит с ГТД на различных этапах его ЖЦ, сократит время разработки и сертификации, а также снизит себестоимость производства и эксплуатации изделия.

Для корректной и оперативной работы цифровой двойник ГТД должен учитывать и включать в себя основные расчетные цепочки, которые используются на предприятии - разработчике ГТД при моделировании авиационного двигателя, реализовывать в своей структуре общепринятую логику и последовательность запуска различных компьютерных моделей, а также форматы передаваемых между КМ данных.

Важной характерной чертой цифрового двойника является получение оперативного отклика на изменения, которые могут происходить с изделием в процессе его жизненного цикла. Для этого необходимо внутри цифрового двойника формализовать и автоматизировать работу компьютерных моделей и использовать согласованные единые форматы передаваемых данных. Также актуальной задачей является параметризация по возможности наибольшего количества компьютерных моделей и САД/САЕ расчетных цепочек, что значительно ускорит время и снизит трудоемкость вычислений, связанных с внесением изменений в конструкцию деталей и

узлов двигателя, а также исследованием различных условий эксплуатации ГТД.

Другим подходом к оперативному получению отклика и наилучшей интерпретацией процессов, происходящих с изделием в реальном времени, является разработка интегральных комплексных моделей всего двигателя и автоматизация работы этих моделей. Примером таких моделей могут быть динамическая, термомеханическая и газодинамическая модели двигателя целиком.

Разработка интегральных моделей является весьма трудоемким процессом, сложность которого обусловлена необходимостью сбора большого количества исходных данных, самим созданием моделей, отладкой, запуском на расчет и требовательностью к имеющимся вычислительным ресурсам. Однако их автоматизация и применение в рамках цифрового двойника позволяет значительно расширить область исследований и повышает степень достоверности моделирования, так как рассматривает двигатель, как единый объект с учетом взаимного влияния узлов.

## **1 Описание общей схемы взаимодействия разрабатываемых элементов цифрового двойника модернизированного двигателя АИ-222-25**

В процессе разработки элементов цифрового двойника разработано большое количество компьютерных моделей разного уровня сложности и областей применения. Осуществлена формализация и автоматизация запуска этих моделей, параметризация некоторых моделей и их трансформация в типовые расчетные шаблоны. Также сформированы связи между моделями. Поэтому с целью структурирования этого трудоемкого процесса работа была разбита на несколько этапов.

На первом этапе осуществлена разработка газодинамических 3D моделей основных узлов двигателя (КНД, КВД, КС, ТВД и ТНД). Осуществлена автоматизация процедуры их запуска, а также согласованы и приведены к единому виду форматы создаваемых ими данных, предназначенных для использования в других моделях. Также осуществлена верификация и валидация (в тех случаях, где имелись экспериментальные данные) данных моделей с целью их использования для цифрового сопровождения испытаний и проведения виртуальных экспериментов в рамках цифрового двойника.

На втором этапе для всех рабочих колес разработаны 3D CAD/CAE прочностные шаблоны, позволяющие автоматически перестраивать расчетные модели и осуществлять серию стандартных инженерных расчетов, связанных с определением характеристик прочности, циклической долговечности и собственных частот колебаний. На базе созданных 3D CAD/CAE шаблонов для цифрового двойника модернизированного АИ-222-25 разработаны модуль учета влияния реальных размеров рабочих колес на их характеристики прочности и

собственные частоты колебаний, а также модуль прочностной оптимизации лопаток и дисков.

На третьем этапе создана параметризованная сопряженная термомеханическая конечно-элементная модель всего двигателя, позволяющая с использованием разработанных CAD/CAE шаблонов автоматически встраивать актуальную конструкцию рабочих колес, полученную либо в процессе обмера реальной конструкции двигателя, либо в процессе прочностной и газодинамической оптимизации РК. Проведен термомеханический расчет в течение типового полетного цикла. Для полученного теплового состояния осуществлена оптимизация конструкции рабочих колес в разработанном модуле прочностной оптимизации.

На четвертом этапе разработанные газодинамические 3D модели узлов, параметризованные CAD/CAE шаблоны и термомеханическая модель были интегрированы в цифровой двойник и объединены в комплексную компьютерную модель с высокой степенью автоматизации и передачи данных между её составными частями. Данная комплексная компьютерная модель имеет широкую область применения и позволяет определять кинетику теплового состояния, НДС, радиальных и осевых зазоров (и других параметров) всего двигателя в течение произвольно заданного типового полетного цикла. При этом высокая степень автоматизации составных частей созданной комплексной модели и работа в цифровой платформе значительно снижает трудоемкость актуальных исследовательских работ, начиная от доработки конструкции деталей и узлов двигателя, определения характеристик конкретного экземпляра двигателя с учётом реальных размеров его роторов и заканчивая моделированием реальных случаев эксплуатации или проведения серии виртуальных «запусков» двигателя для формирования базы обучения нейросетей и/или создания упрощенных ROM моделей, которые потом

будут применяться для цифрового сопровождения эксплуатации конкретных экземпляров двигателя.

Также параллельно с созданием комплексной компьютерной модели разработана динамическая модель модернизированного двигателя АИ-222-25. Модель включает все основные структурные элементы силовой схемы двигателя: ротора ВД и НД, полную систему корпусов, а также элементы испытательного стенда. Динамическая модель создана с использованием трехмерных КЭ моделей роторов и корпусов, что позволяет обеспечить полноценный учет жесткостных и инерционных характеристик двигателя. Проведены исследования собственных и критических частот отдельных роторов, системы «роторы-подшипники-корпус» и динамики двигателя при колебаниях под действием дисбаланса роторов.

Разработана 3D модель газогенератора, содержащая в себе 30 расчетных областей, представляющих собой сектора элементов проточной части газогенератора. Выполнен сквозной газодинамический расчет газогенератора на стационарных режимах согласно программе планируемых испытаний.

На последнем этапе все описанные выше модели были интегрированы в цифровой двойник модернизированного двигателя АИ-222-25 и соединены с его матрицей требований. Между моделями созданы связи для передачи данных в процессе проведения расчетных исследований. Общая схема разработанных и внедренных элементов цифрового двойника приведена на рисунке 1.1.

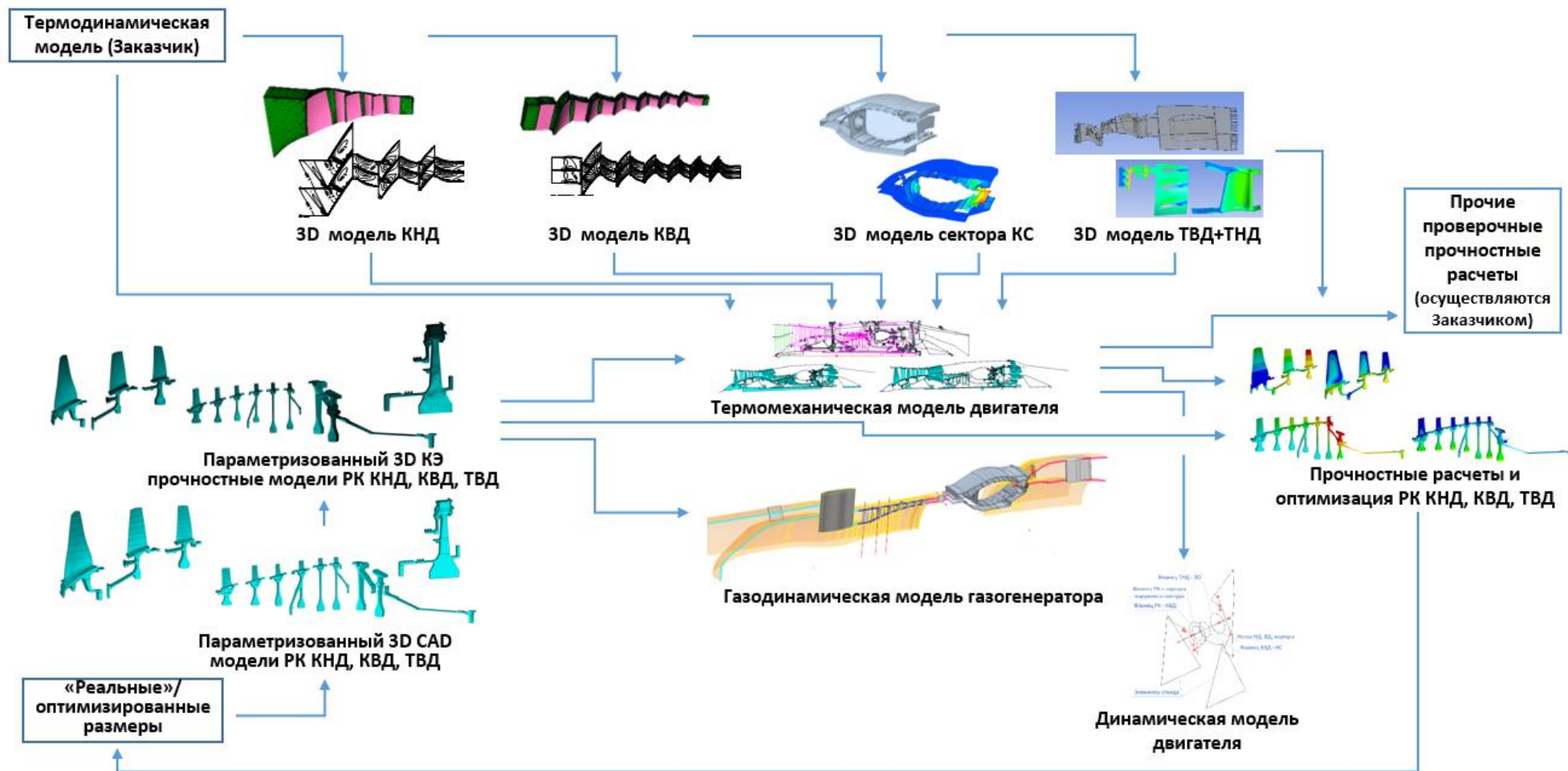


Рисунок 1.1 – Схема взаимодействия разработанных элементов цифрового двойника модернизированного двигателя АИ-222-25

Взаимодействие между компьютерными моделями внутри цифрового двойника производится следующим образом:

- 1) Проведение термодинамического расчета двигателя. Результаты расчета передаются в качестве исходных данных в газодинамические 3D модели узлов, а также в термомеханическую модель.
- 2) Проведение газодинамических расчетов узлов с целью определения параметров КНД, КВД, КС, ТВД и ТНД. При этом формируются исходные данные для проведения термомеханического расчета двигателя, а также граничные условия (ГУ) и нагрузки для прочностных моделей.
- 3) Создание 3D CAD и конечно-элементных моделей рабочих колес компрессоров и турбин на базе заданных исходных, «реальных» или оптимизированных размеров.
- 4) Создание составной термомеханической модели двигателя, в которой часть является параметризованной (рабочие колеса), а часть неизменяемой (корпуса, валы, опоры и др.). Обработка газодинамических результатов расчетов узлов для формирования исходных данных для термомеханического расчета двигателя. Проведение термомеханического расчета двигателя по заданному типовому полетному циклу (ТПЦ) и получение кинетики теплового состояния, зазоров и НДС.
- 5) Проведение проверочных прочностных расчетов (статическая прочность, вычисление циклической долговечности и запасов прочности, модальный анализ) РК компрессоров и турбин с использованием параметризованных КЭ моделей и с учётом полученного теплового состояния. Или проведение прочностной оптимизации конструкции РК.

- 6) Проведение других проверочных прочностных расчетов с использованием полученной кинетики теплового состояния, зазоров и перемещений.
- 7) В случае проведения прочностной оптимизации и изменения размеров РК автоматически осуществляется перестройка термомеханической модели и проведение последующих уточняющих тепловых, а затем прочностных расчетов.
- 8) По результатам прочностных расчетов (перемещения лопаток, радиальные зазоры и т.д.) можно осуществить модификацию газодинамических 3D моделей узлов и провести уточняющие расчеты.
- 9) Передача актуального теплового состояния в динамическую модель двигателя. Исследование при помощи динамической модели влияния различных конструктивно-технологических параметров (податливостей и демпфирования в опорах, дисбалансов) и их сочетаний на вибрационное состояние двигателя.
- 10) Расчеты газогенератора в составе стенда выделяются в отдельный блок и включают в себя газодинамический расчет всего газогенератора.

Разработанные компьютерные модели используются в качестве центральной расчетной части цифрового двойника модернизированного двигателя АИ-222-25, так как они позволяют автоматически осуществлять основные типовые инженерные исследования и расчеты, а также формировать исходные данные (тепловое состояние, радиальные зазоры, перемещения деталей, собственные частоты, газодинамические характеристики и т.д.) для остальных специализированных более сложных и точных компьютерных моделей.

## **2 Описание параметризованных CAD-CAE расчетных шаблонов для оценки влияния конструктивных отклонений на характеристики прочности рабочих колес**

С целью сокращения времени и трудоемкости проведения различных исследований влияния размеров дисков и лопаток на прочностные характеристики рабочих колес компрессоров и турбины высокого давления для цифрового двойника двигателя разработан специализированный модуль. На базе данного модуля также разработан модуль прочностной 3D оптимизации рабочих колес модернизированного двигателя АИ-222-25.

Расчетные цепочки для учёта реальных размеров созданы для следующих конструктивных элементов:

- Расчет характеристик прочности и циклической долговечности рабочих колес КНД и КВД;
- Модальный анализ рабочих колес КНД и КВД с целью построения диаграммы Кэмпбелла и дисперсионной диаграммы;
- Расчет характеристик прочности и циклической долговечности болтового соединения в лабиринтном диске КВД;
- Расчет характеристик прочности и циклической долговечности замкового соединения и диска рабочего колеса ТВД

Общий объем работ по разработке CAD/CAE шаблонов прочностных расчетов предоставлен на рисунке 2.1.

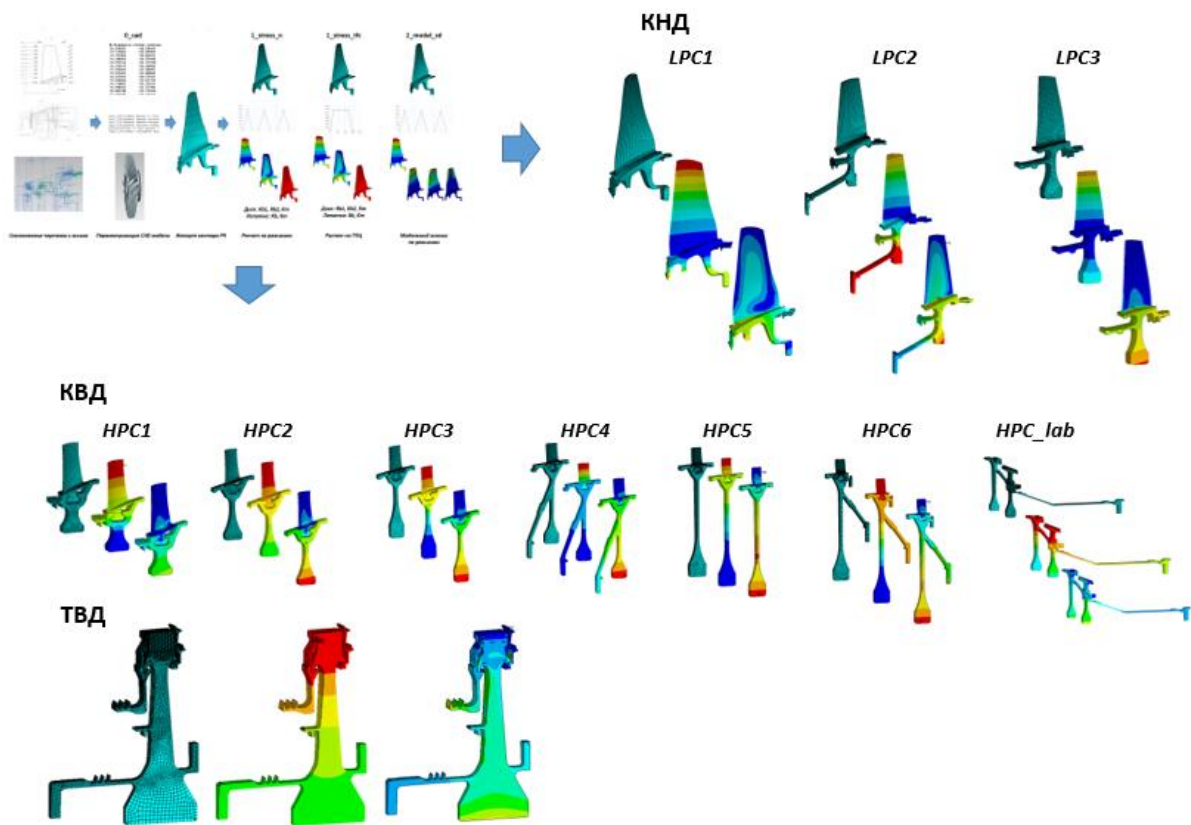


Рисунок 2.1 – Общий объем работ по разработке шаблонов прочностных расчетов роторов модернизированного АИ-222-25

На рисунке 2.2 показана общая схема работы параметризованного CAD/CAE шаблона на примере первой ступени КНД. В шаблон для каждого рабочего колеса входит три части:

- 1) Параметризованный CAD шаблон, в котором можно автоматически менять параметры конструкции и импортировать её в виде файла \*.x\_t в соответствующие CAE шаблоны.
- 2) Автоматизированный CAE шаблон для расчета характеристик прочности, запасов и циклической долговечности на заданных режимах или расчетных точках ТПЦ.
- 3) Автоматизированные CAE шаблон для проведения модального анализа на заданных режимах.

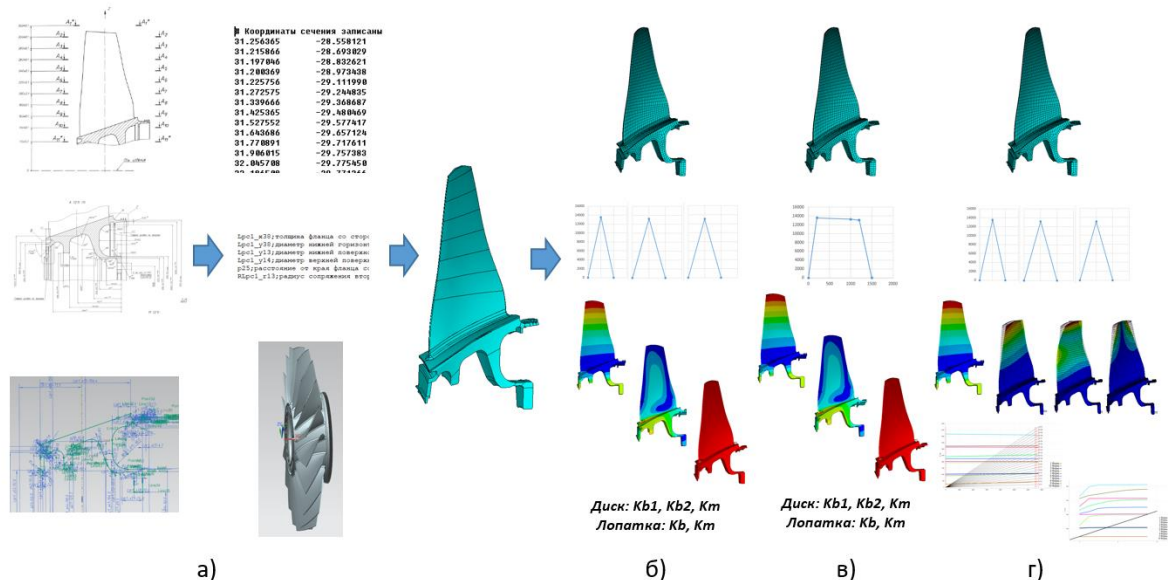


Рисунок 2.2 – Схема работы параметризованного CAD/CAE 3D шаблона:

- а) перестроение CAD модели и создание сектора РК с одной лопаткой;
- б) расчет характеристик прочности на заданных режимах;
- в) расчет характеристик прочности на заданных точках ТПЦ;
- г) модальный анализ с целью построения диаграммы Кэмпбелла и дисперсионной диаграммы

Эскиз диска каждой параметризованной CAD модели учитывает технологическую карту РК, что позволяет перестраивать CAD с учётом размеров, полученных при непосредственном обмере детали. Автоматизированные КЭ модели, создаваемые на базе параметризованных CAD моделей, содержат набор скриптов на ANSYS APDL, которые позволяют автоматически проводить расчет НДС и собственных частот и вычислять запасы прочности, частотной отстройки и МЦУ так, как это принято на предприятии – разработчике ГТД. Поэтому данные CAD/CAE шаблоны можно применять для автоматизации типовых инженерных расчетов рабочих колес.

Каждый расчетный CAE шаблон по итогу своей работы формирует файлы со сводными результатами вычислений, создает иллюстрации или графики необходимых результатов (распределение напряжений,

деформаций и т.д.), что позволяет передавать результаты в цифровой двойник, связывать их с матрицей требований и формировать отчеты в полуавтоматическом режиме.

Данные параметризованные CAD/CAE шаблоны используются в рамках цифрового двойника для проведения следующих расчетных исследований (см. рисунок 2.3):

- учета влияния «реальных размеров» на характеристики прочности, МЦУ и собственные частоты колебаний;
- проведения автоматизированных проверочных расчетов;
- «ручной» автоматизированной доводки конструкции;
- оптимизации конструкции РК.

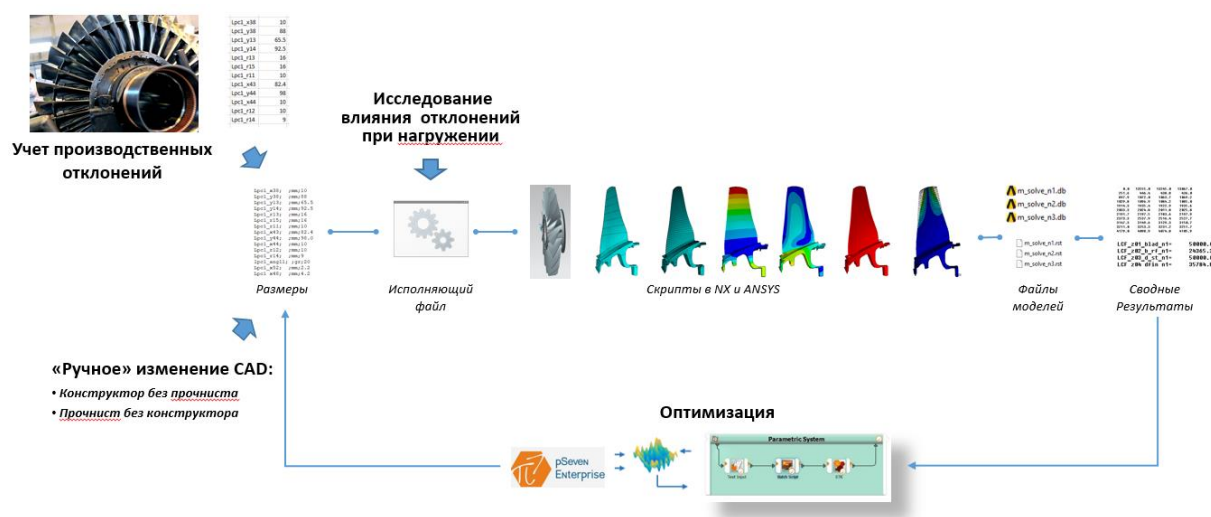


Рисунок 2.3 – Области применения в цифровом двойнике параметризованных CAD/CAE 3D шаблонов

### 3 Описание частично параметризованной термомеханической модели модернизированного двигателя АИ-222-25

В качестве одного из важных элементов цифрового двойника разработана частично параметризованная автоматизированная термомеханическая модель модернизированного двигателя АИ-222-25. Структура и общая схема работы модели приведена на рисунке 3.1. Термомеханическая модель состоит из трех суб-моделей, которые в процессе расчета взаимодействуют друг с другом:

1. Гидравлическая модель всего двигателя;
2. КЭ двигателя для определения кинетики теплового состояния в течение ТПЦ;
3. КЭ двигателя для определения кинетики НДС и зазоров в течение ТПЦ.

Управляет расчетом специальный модуль `Gidraterm.exe`, который запускают суб-модели в нужном порядке, обрабатывает результаты расчета каждой суб-модели на расчетных точках и организует передачу данных между суб-моделями.

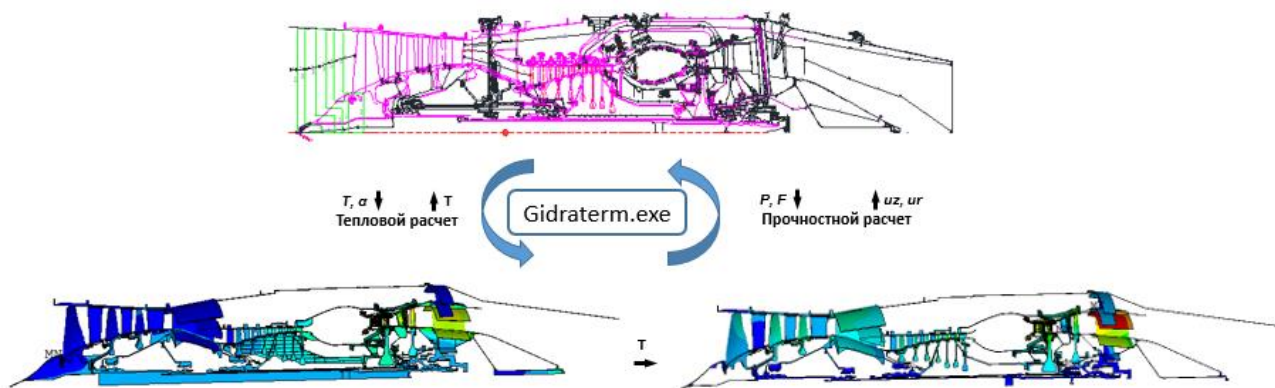


Рисунок 3.1 – Общая схема работы термомеханической модели.

Также термомеханическая модель содержит специализированный модуль, который автоматически обрабатывает результаты газодинамических расчетов узлов и, на базе заданных параметров типового полетного цикла (модуль имеет специальный интерфейс для этой операции), формирует все необходимые данные для проведения термомеханического расчета в виде файлов с согласованным форматом.

### **3.1 Описание работы термомеханической модели**

Работа самой термомеханической модели осуществляется в следующей последовательности (см. рисунок 3.2):

1) модуль, организующий совместный термомеханический расчет, обрабатывает файл с информацией о ТПЦ и организацией расчета, а также зачитывает заранее полученные и обработанные результаты анализа (на всех режимах ТПЦ) выше описанных CAE моделей;

2) исходя из назначенного шага по времени определяется текущий момент времени, для которого проводится соответствующая итерация вычислений;

3) модуль, организующий совместный термомеханический расчет, формирует и передает данные (на базе расчетов CAE моделей на режимах ТПЦ) в гидравлическую модель для текущего момента времени;

4) осуществляется анализ 1D гидравлической модели на текущем моменте времени;

5) согласно файлу со связями между каналами и компонентами КЭ модели ANSYS осуществляется передача тепловых граничных условий для текущего момента времени (температура потока и коэффициент теплоотдачи) из гидравлической модели в КЭ модель для теплового анализа;

6) с использованием APDL макроса на КЭ модель для теплового

анализа прикладываются ГУ и нагрузки и осуществляется анализ теплового состояния для текущего момента времени;

7) с использованием APDL макроса формируются ГУ условия для прочностной КЭ модели, передается тепловое состояние в виде \*.rth файла;

8) с использованием прочностной КЭ модели осуществляется анализ НДС для текущего момента времени;

9) по окончании прочностного расчета в текущий момент времени с использованием макроса на APDL в гидравлическую модель передаются значения температур стенок каналов (из теплового анализа) и значения зазоров (из прочностного анализа);

10) с учетом нового шага по времени назначается текущий момент времени и процедура повторяется, начиная с шага №3.

11) Совместный термомеханический расчет заканчивается на последнем моменте времени ТПЦ.

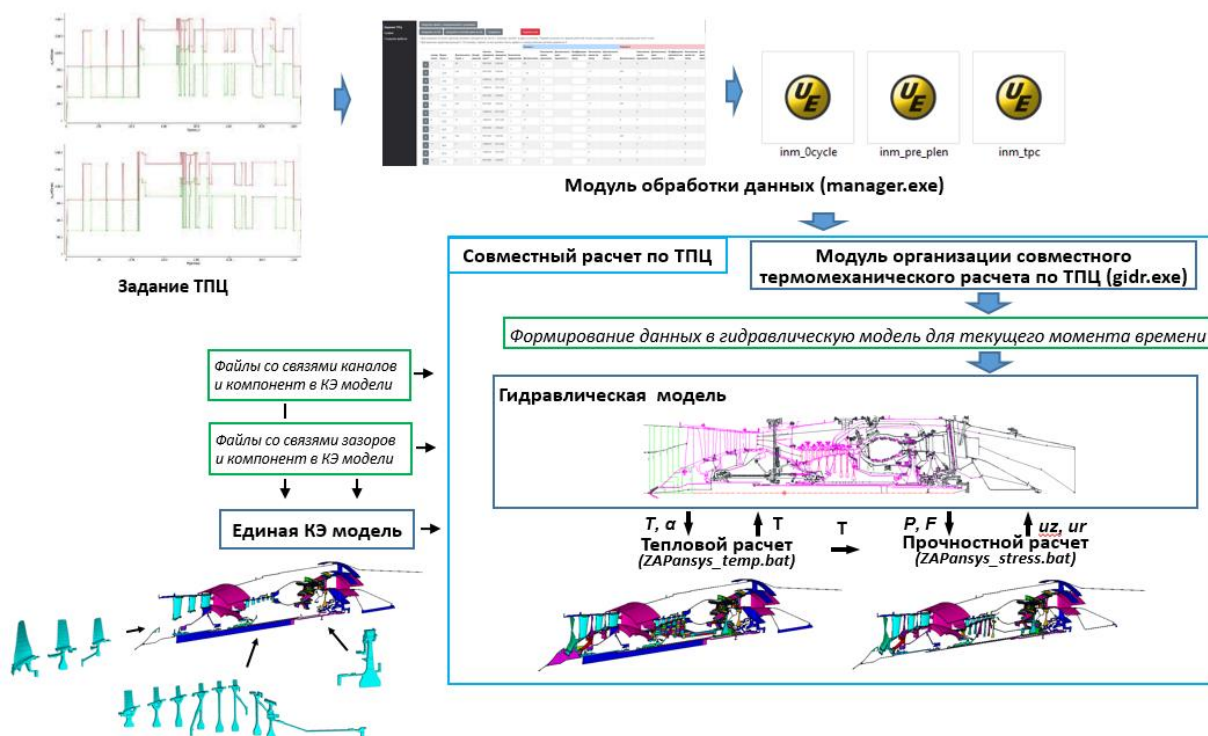


Рисунок 3.2 – Схема работы термомеханической модели

Расчёт по ТПЦ совместной термомеханической КМ полностью автоматизирован, что в совокупности с автоматизацией процесса подготовки и обработки исходных данных, наличием связей в цифровой платформе с газодинамическими моделями узлов позволяет значительно сократить трудоемкость подготовки к началу расчетов. Фактически после тестирования и отладки этого процесса в цифровом двойнике моделирование по новому или модифицированному ТПЦ (реальный случай эксплуатации или виртуальный запуск) сводится к заданию параметров ТПЦ, последовательном запуске моделей и контроле передаваемых данных. Обмен данными, модернизация моделей и проведение расчетов проводятся в автоматическом или полуавтоматическом режиме.

### **3.2 Учёт параметризованных CAD/CAE шаблонов РК в термомеханической модели**

Термомеханическая модель является составной и состоит из двух частей:

- 1) Неизменяемая часть, которая включает в себя:
  - 2D и 3D КЭ модели корпусов и опор;
  - 3D КЭ модели охлаждаемых сопловых лопаток турбин;
  - 3D КЭ модель охлаждаемой рабочей лопатки ТВД;
  - 3D КЭ модели валов высокого и низкого давления;
  - 2D КЭ модель корпуса камеры сгорания;
  - 2D и 3D КЭ модели диска и лопатки ТНД.
- 2) Изменяемая часть, которая базируется на параметризованных CAD/CAE шаблонах РК и включает в себя:
  - 3D КЭ модели дисков и лопаток рабочих колес КНД и КВД;
  - 2D КЭ модели лабиринтного диска и вала КВД;

- 3D КЭ модели вала, основного, лабиринтного и покрывного дисков рабочего колеса ТВД.

Общий вид неизменяемой части приведен на рисунках 3.3-3.6. Неизменяемая часть сделана для проведения теплового анализа, поэтому она дополнительно включает в себя объемы воздуха в «замкнутых» местах [3] (выделены красным на рисунке 3.3), где гидравлическая модель может давать некорректные результаты (например, под валом низкого давления, в «закрытых» областях корпусов с лабиринтными уплотнениями и т.д.). Всего неизменяемая часть содержит 1 375 000 элементов и 568 000 узлов.

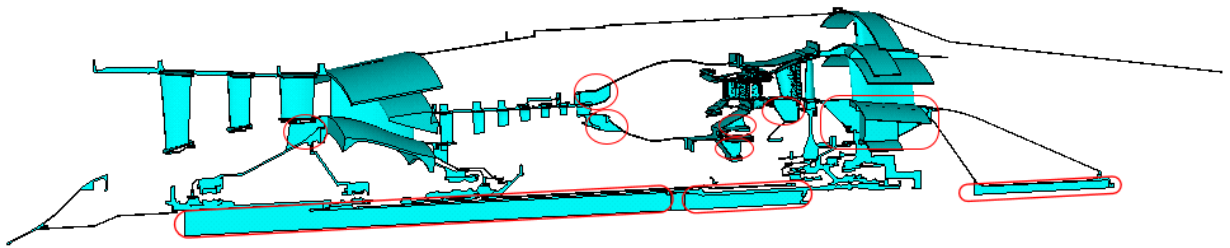


Рисунок 3.3 – Общий вид КЭ модели неизменяемой части термомеханической модели

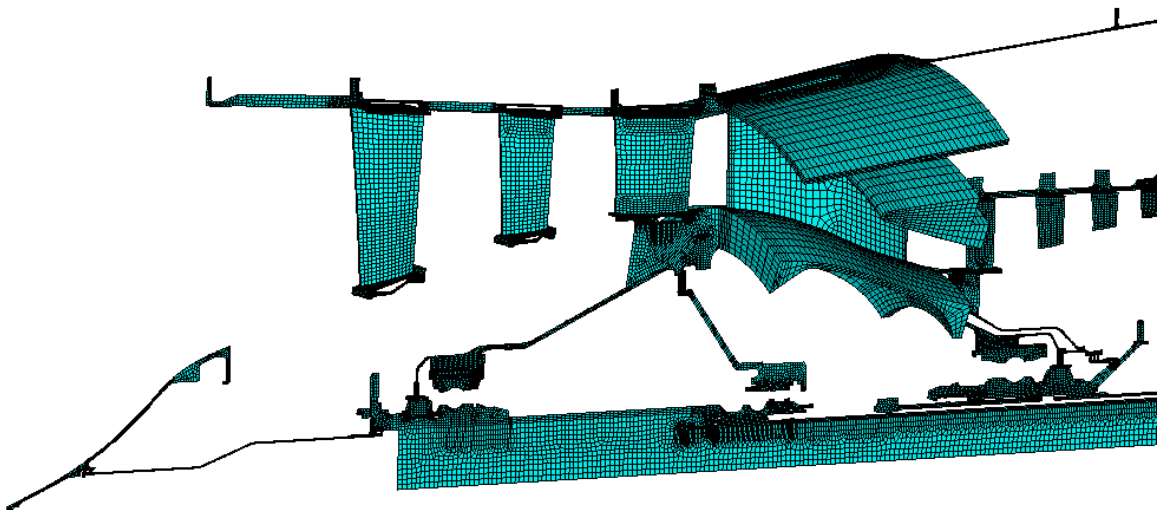


Рисунок 3.4 – Общий вид КЭ модели неизменяемой части для КНД

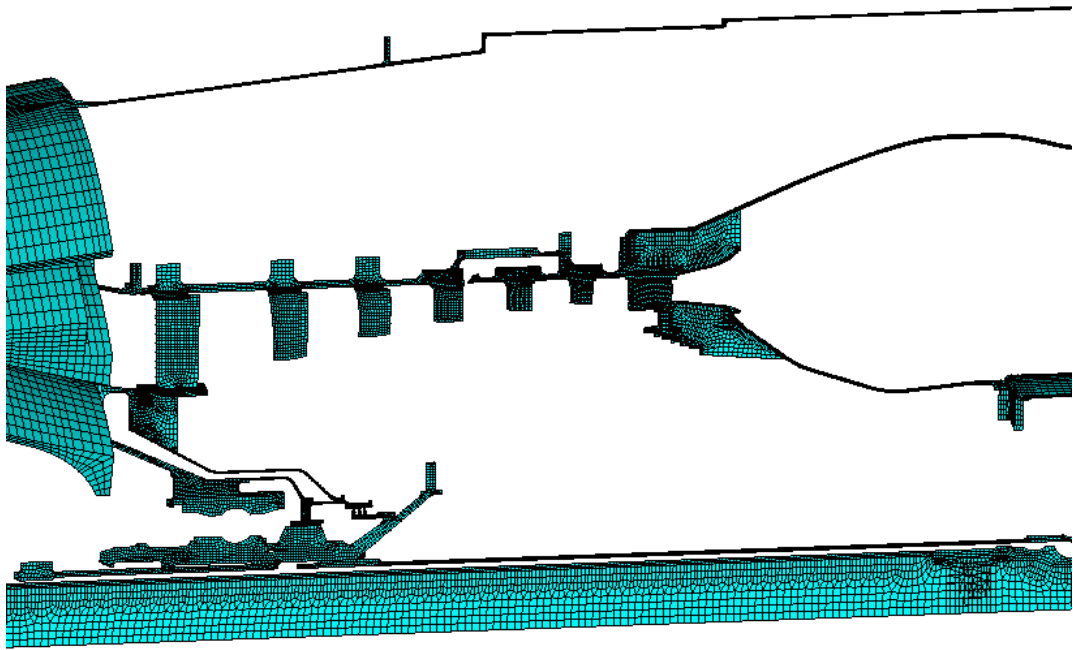


Рисунок 3.5 – Общий вид КЭ модели неизменяемой части для КВД и КС

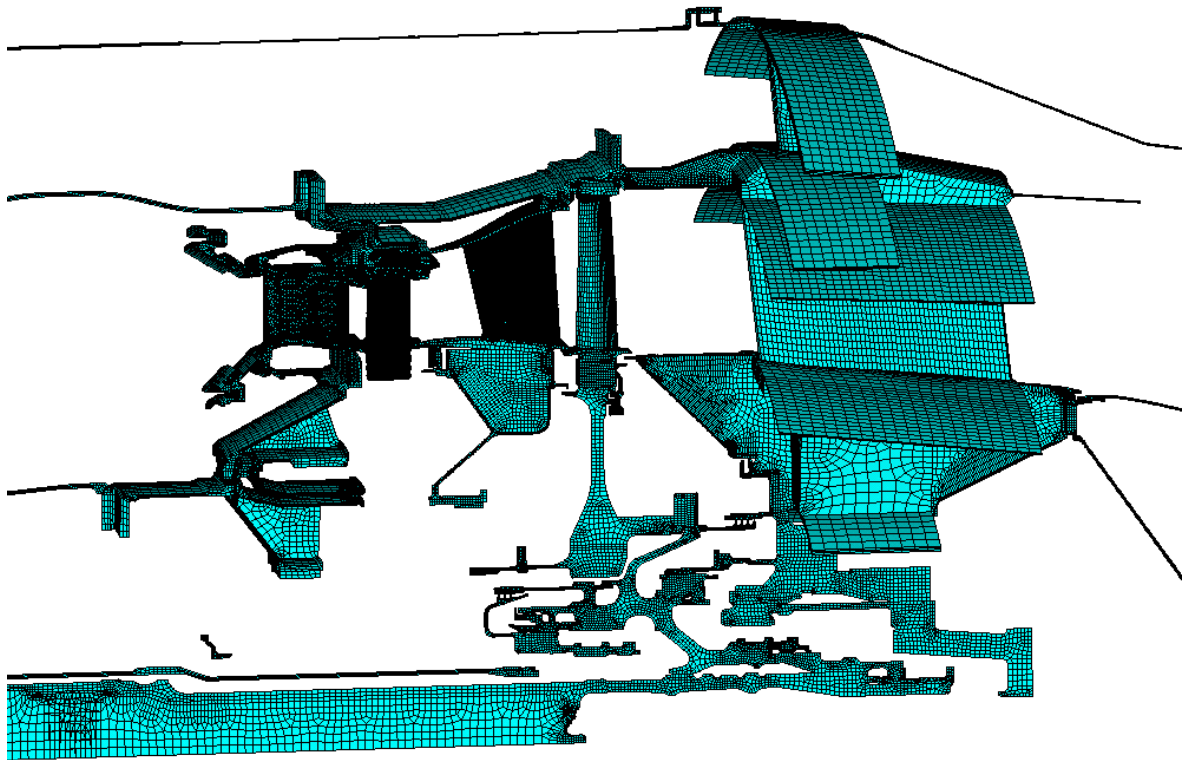


Рисунок 3.6 – Общий вид КЭ модели неизменяемой части для ТВД и ТНД

Сборка термомеханической модели осуществляется автоматически на базе актуальных указанных заранее вариантов конструкции каждого рабочего колеса. Общая схема сборки термомеханической модели приведена на рисунке 3.7.

Такой подход позволяет автоматически создавать термомеханическую модель и проводить анализ в течение ТПЦ с учетом реальных размеров РК или с учётом изменений, полученных в результате оптимизации (или ручной доводке с использованием шаблонов) РК КНД, КВД и ТВД.

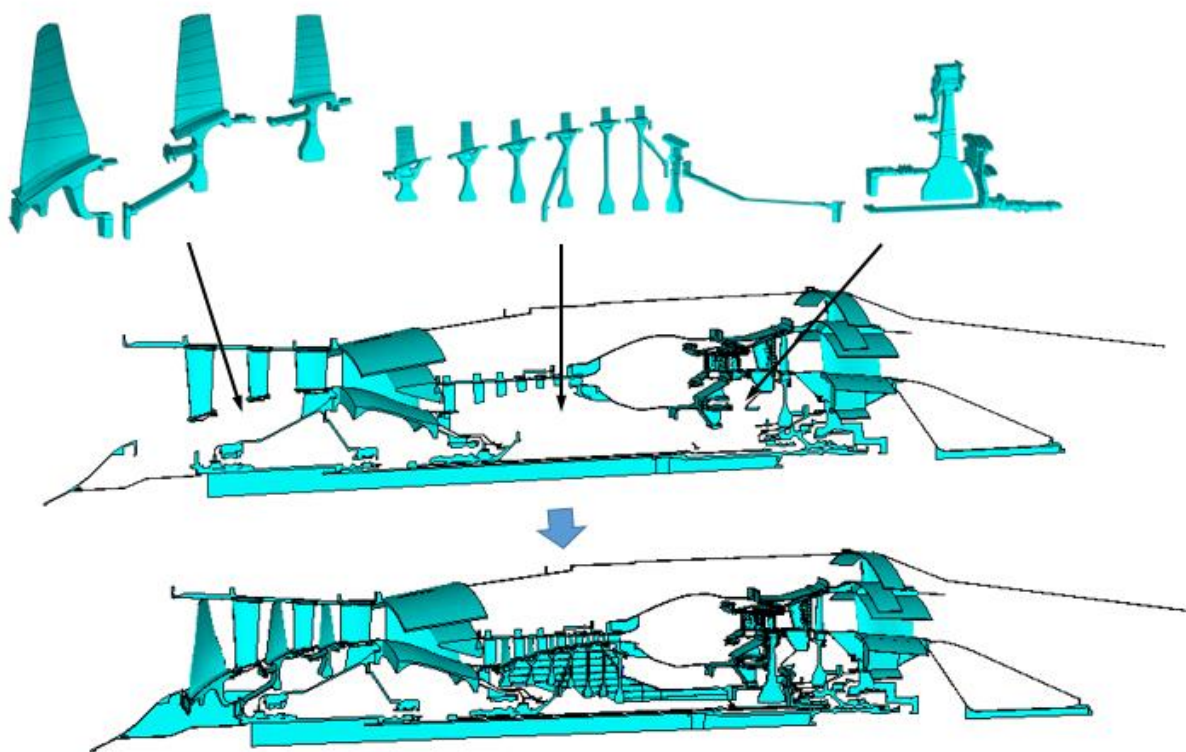


Рисунок 3.7 – Схема сборки термомеханической модели

Термомеханическая модель в процессе и по итогу своей работы формирует файлы со сводными результатами вычислений, создает изображения или графики необходимых результатов (тепловое состояние в заданный момент времени, динамика зазоров, изменение осевых сил и т.д.), что позволяет передавать результаты в цифровой двойник, связывать их с

матрицей требований и формировать отчеты в полуавтоматическом режиме. На рисунках 3.8-3.15 приведены некоторые из данных результатов.

В рамках цифрового двойника термомеханическая модель применяется для определения:

- величин отбора воздуха;
- изменения осевых сил;
- кинетики теплового состояния дисков, валов и корпусов в течение ТПЦ;
- кинетики теплового состояния неохлаждаемых лопаток в течение ТПЦ;
- кинетики теплового состояния охлаждаемых лопаток с учетом пленочного охлаждения в течение ТПЦ;
- динамики радиальных и осевых зазоров в лабиринтных уплотнениях;
- кинетики радиальных и осевых зазоров между корпусами и рабочими лопатками и между статорными лопатками и роторами для уточнения газодинамических расчетов
- перемещения элементов двигателя (лопатки, диски, корпуса, фланцы и т.д.) для уточняющих прочностных расчетов.

Составная термомеханическая модель встроена в цифровой двойник и связана с другими компьютерными моделями. Все вычисления осуществляются в единой постановке, в которой двигатель рассматривается, как единое целое, что дает возможность повысить качество прогнозирования характеристик двигателя и расширяет область применения цифрового двойника.

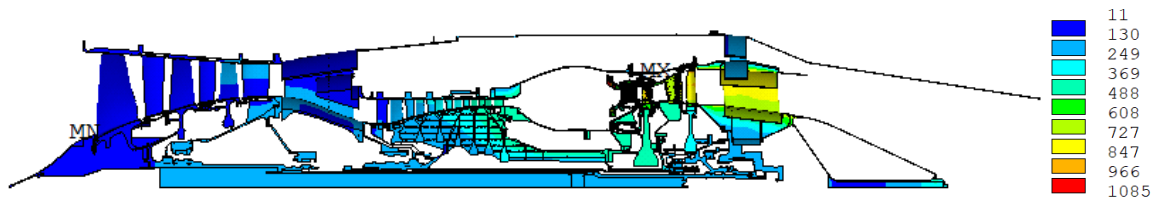


Рисунок 3.8 – Тепловое состояние двигателя

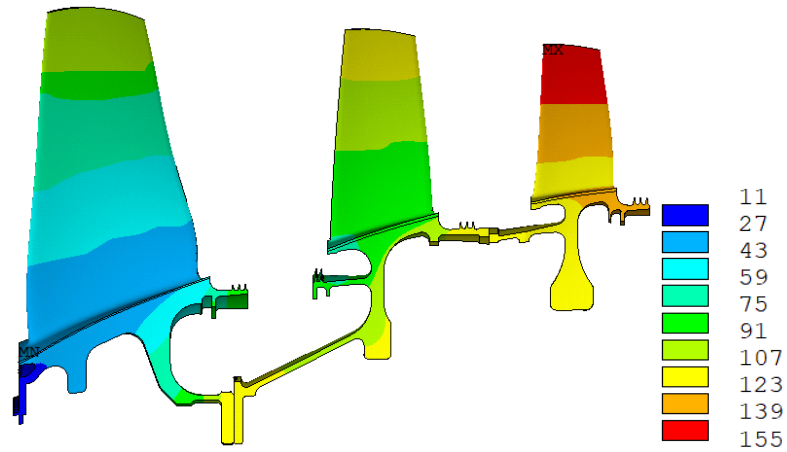


Рисунок 3.9 – Тепловое состояние ротора КНД

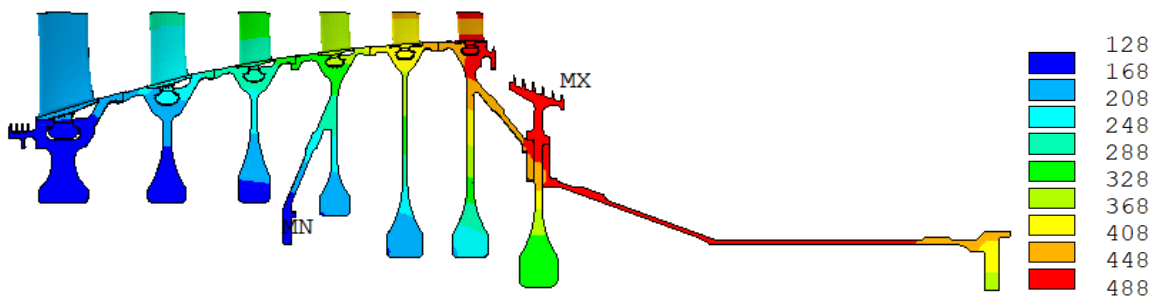


Рисунок 3.10 – Тепловое состояние ротора КВД

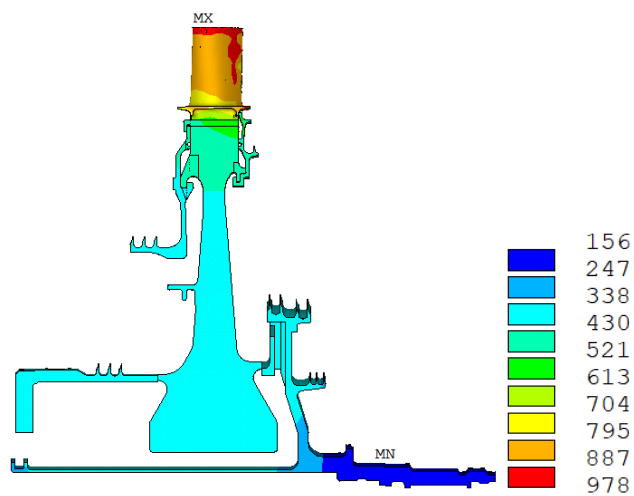


Рисунок 3.11 – Тепловое состояние ротора ТВД

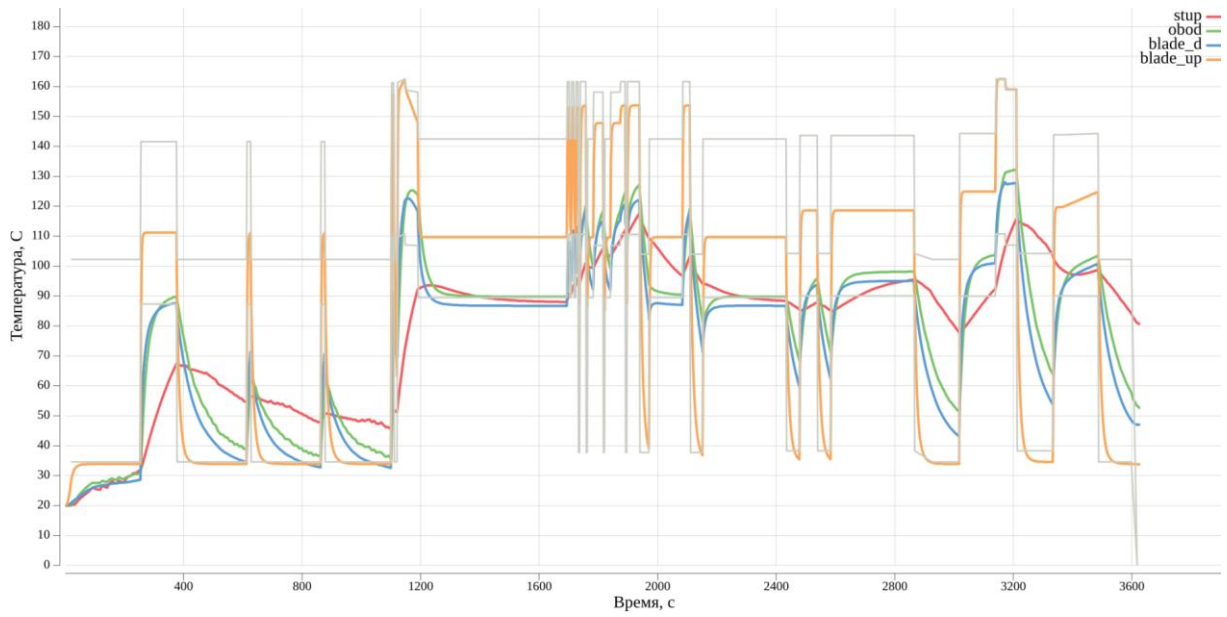


Рисунок 3.12 – Изменение теплового состояния в течение ТПЦ в РК 3-ей ступени КНД

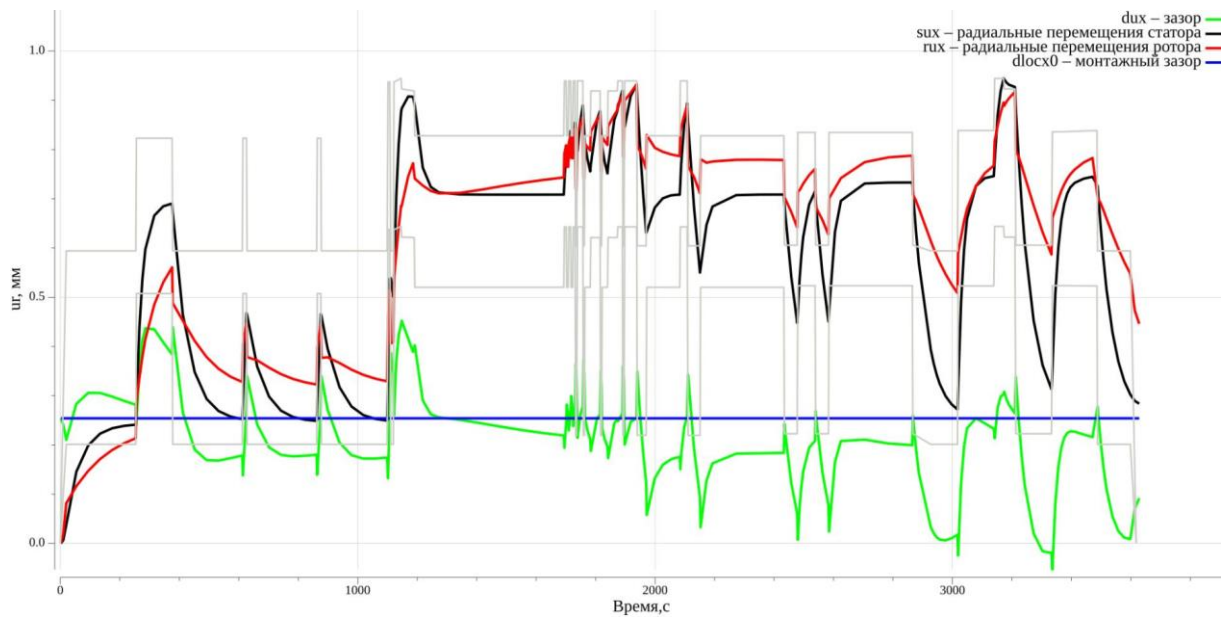


Рисунок 3.13 – Изменение радиальных зазоров в лабиринтном уплотнении лабиринтного диска КВД

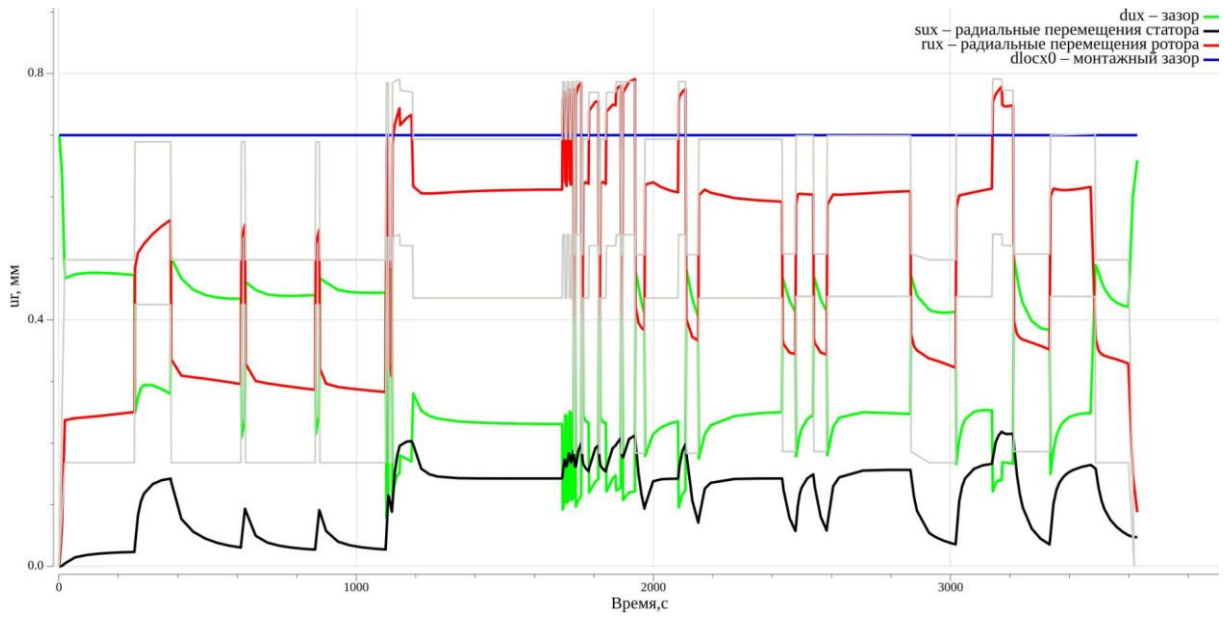


Рисунок 3.14 – Изменение радиальных зазоров между лопаткой и корпусом 1-ой ступени КВД

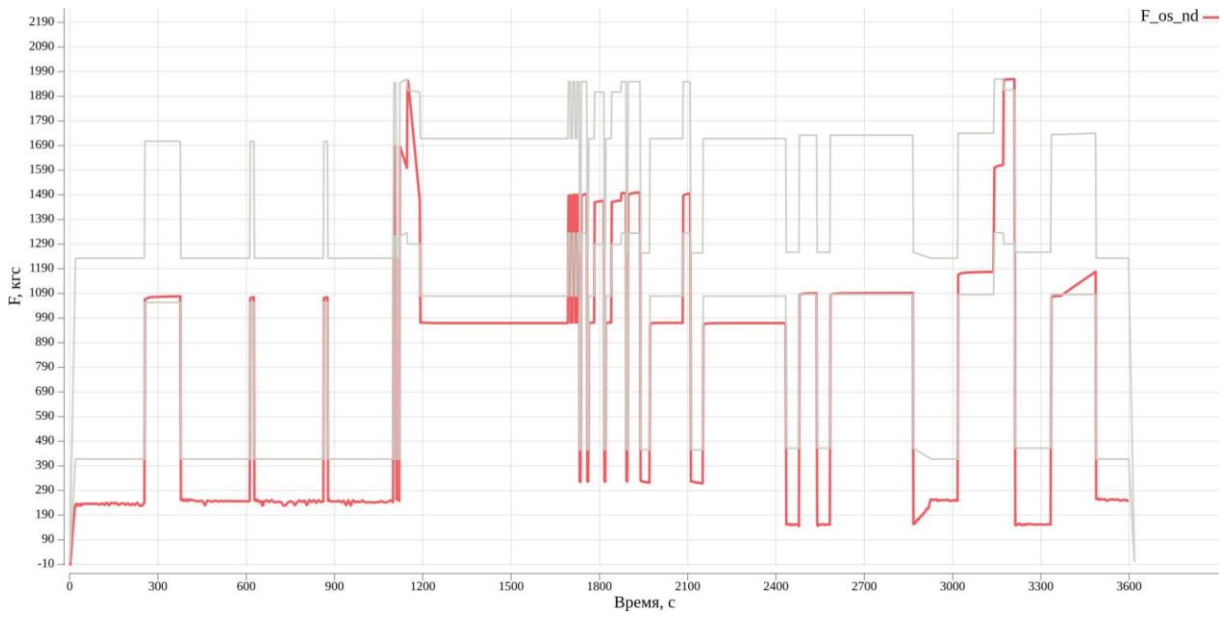


Рисунок 3.15 – Изменение осевых сил НД

#### **4 Описание направлений применения термомеханической модели и параметризованных CAD/CAE шаблонов**

Разработанные параметризованные CAD/CAE шаблоны и термомеханическая модель двигателя взаимодействуют друг с другом в рамках цифрового двойника двигателя, что позволяет осуществлять в автоматическом режиме широкий спектр различных исследований, связанных с проведением предварительных, проверочных и оптимизационных прочностных работ. Общая схема взаимодействия приведена на рисунке 4.1.

В общем случае можно выделить следующие задачи, для решения которых можно использовать данные автоматические расчетные цепочки:

- 1) Проведение предварительных исследований, связанных с прочностной доводкой конструкции РК при помощи параметризованных шаблонов и радиального градиента температур. Последующее осуществление термомеханического расчета двигателя в течение заданного ТПЦ и проведение проверочных расчётов прочности РК КНД, КВД и ТВД;
- 2) Формирование произвольного ТПЦ (реальный или виртуальный случай эксплуатации) и автоматическое проведение термомеханического расчета всего двигателя для актуального ТПЦ и актуальной конструкции РК КНД, КВД и ТВД;
- 3) Учёт реальных размеров, проведение термомеханического расчета в течение актуального ТПЦ и последующее осуществление проверочных прочностных расчетов конструкции РК;
- 4) Проведение прочностной оптимизации РК КНД, КВД и ТВД, проведение термомеханического расчета двигателя с оптимизированными конструкциями РК с последующим осуществлением проверочных расчетов.

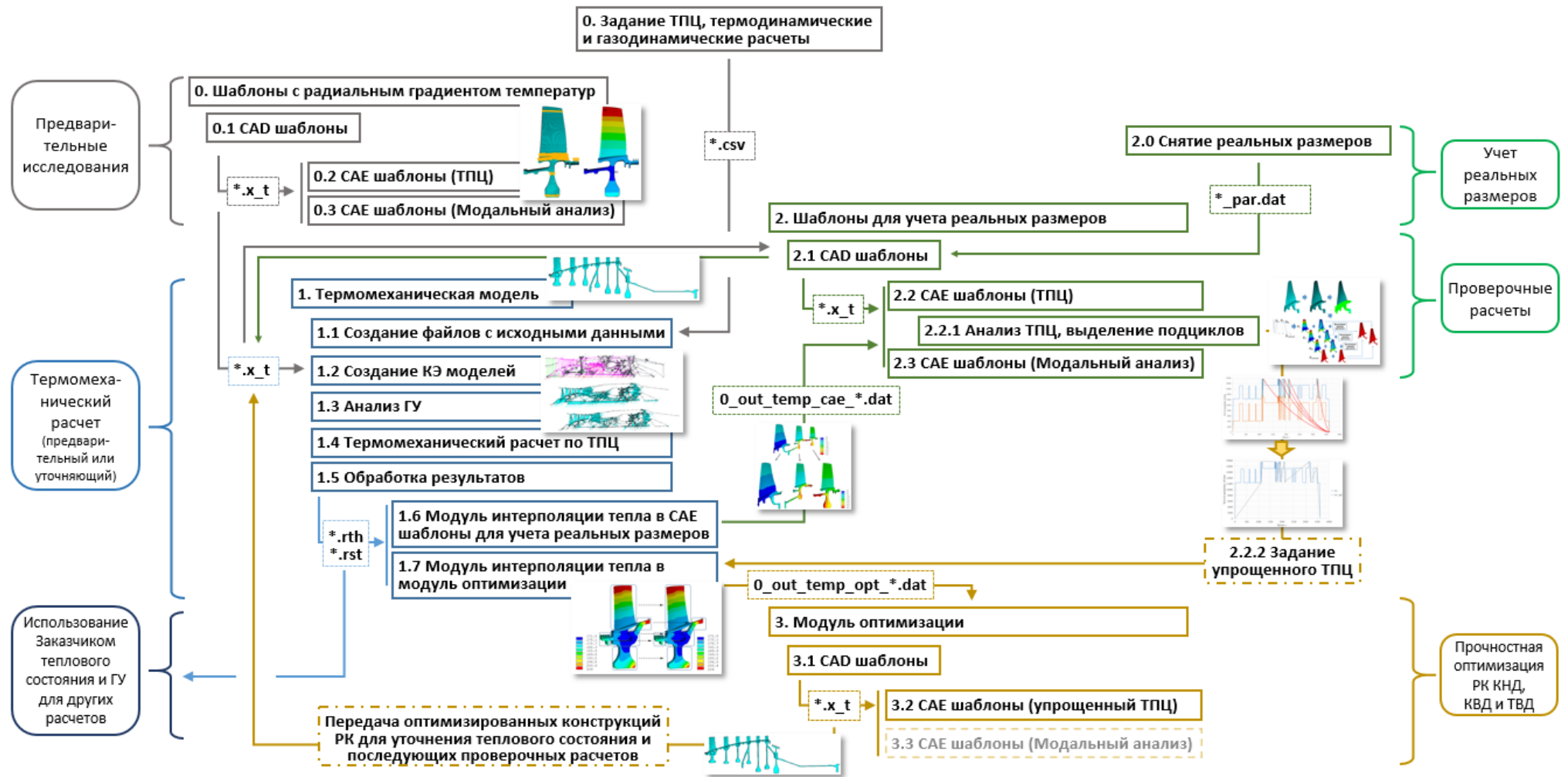


Рисунок 4.1 – Схема взаимодействия термомеханической модели, параметризованных CAD/CAE шаблонов и модуля оптимизации

#### 4.1 Проведение предварительных исследований с использованием параметризованных CAD/CAE шаблонов

Определение теплового состояния в течение ТПЦ при помощи созданной термомеханической модели занимает значительное количество времени и требует большого объема вычислительных ресурсов. Разработанные параметризованные CAD/CAE шаблоны имеют возможность задавать тепловое состояние рабочих колес в виде радиального градиента. Это позволяет проводить различные предварительные исследования (ручная доводка, предварительная оценка прочности или собственных частот и т.д.), когда по той или иной причине у специалиста под рукой нет результатов точного теплового расчета. Пример задания радиального градиента приведен на рисунке 4.2.

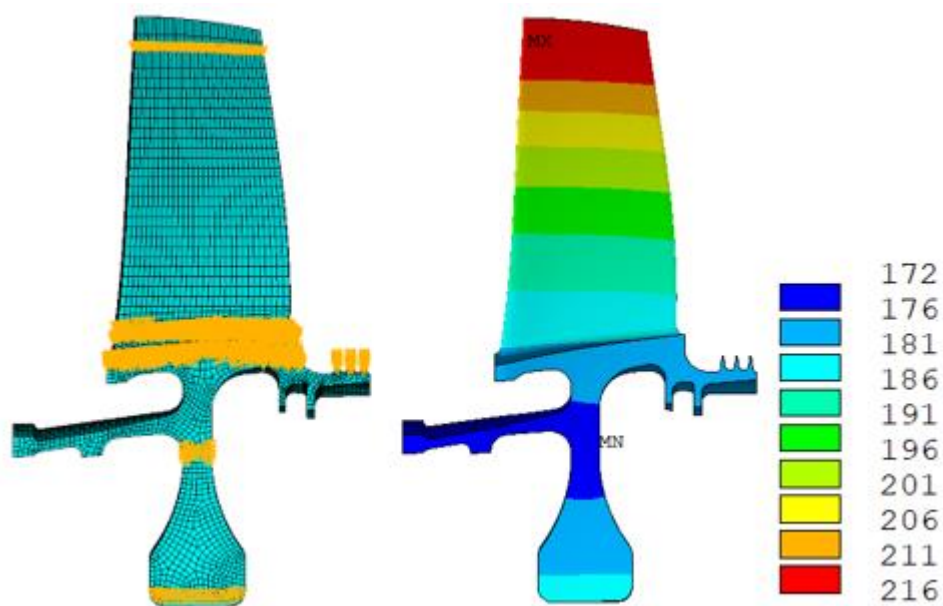


Рисунок 4.2 – Пример задания теплового состояния в виде радиального градиента

## 4.2 Определение кинетики теплового состояния в течение заданного ТПЦ

Перед проведением сопряженного термомеханического расчета в течение ТПЦ необходимо задать сам ТПЦ и подготовить результаты термодинамического расчета и газодинамических расчетов компрессоров и турбин на режимах заданного ТПЦ. После необходимо перенести данные в программный модуль (также встроен в ЦД), который автоматически обработает полученные данные и создаст все необходимые файлы для проведения термомеханического расчета для актуального ТПЦ.

На следующем шаге создается при помощи разработанного набора автоматических макросов термомеханическая модель модернизированного двигателя АИ-222-25. Перед началом этого процесса необходимо указать в цифровом двойнике актуальные версии конструкции рабочих колес КНД, КВД и ТВД. Конструкции передаются в виде \*.x\_t файлов, которые получаются в результате запуска параметризованных САД шаблонов.

Созданная термомеханическая модель автоматически вычисляет в течение заданного ТПЦ кинетику теплового состояния, НДС, осевых сил и радиальных зазоров в лабиринтных уплотнениях и лопатках. Значительная степень автоматизации термомеханической модели позволяет набирать в модуле любой типовой полетный цикл из тех режимов, для которых имеются обработанные результаты термодинамического и газодинамического анализов, и проводить автоматически термомеханический расчет в течение этого заданного «произвольного» ТПЦ.

После окончания термомеханического расчета необходимо запустить модуль интерполяции теплового состояния в параметризованные САД/САЕ шаблоны. По итогу работы модуля создаются файлы с актуальным тепловым состоянием, которые используются для проверочных расчетов.

### **4.3 Проведение проверочных расчетов и учёт влияния реальных размеров**

Для проведения проверочных расчетов используются те же параметризованные CAD/CAE шаблоны, что и для проведения предварительных исследований и оптимизации, однако с более качественными сетками, более точными алгоритмами вычисления циклической долговечности с учётом подциклов и с использованием нестационарного теплового состояния, полученного в результате запуска модуля интерполяции теплового состояния из предварительно проведенного термомеханического расчета.

Возможны три случая проведения проверочных расчетов с помощью созданных параметризованных CAD/CAE шаблонов:

- 1) Проверочные расчеты конструкций РК, полученных в ходе предварительных исследований с использованием радиального градиента температур.
- 2) Проверочные расчеты конструкций РК с учётом реальных размеров.
- 3) Проверочные расчеты конструкций РК, полученных в результате оптимизации.

### **4.4 Проведение прочностной оптимизации конструкции РК КНД, КВД и ТВД**

Для оптимизации важно минимизировать время проведения одной итерации (время расчета при помощи CAD/CAE шаблона одного варианта конструкции). Поэтому перед началом оптимизации необходимо:

- 1) Провести проверочные расчеты, проанализировать результаты, выделить подциклы;

- 2) Сформировать упрощенный ТПЦ, например, состоящий только из времен начала и окончания подциклов. При необходимости добавить другие моменты ТПЦ;
- 3) Задать упрощенный ТПЦ в модуле переноса теплового состояния в модуль оптимизации.
- 4) Запустить модуль переноса теплового состояния в модуль оптимизации.

Также для начала оптимизации необходимо, чтобы заранее был проведен термомеханический расчет в течение заданного ТПЦ. Модуль интерполяции теплового состояния автоматически выделяет характерные зоны в конструкции РК (ступица, полотно, обод) и нормирует координаты узлов в этих зонах относительно ширины и высоты зоны. Параметризованные САД/САЕ шаблоны для оптимизации при определении теплового состояния также автоматически выделяют соответствующие характерные зоны и нормируют координаты узлов. Поэтому при изменении конструкции в процессе оптимизации распределение температур в этих зонах либо «растягивается», либо «сжимается» в зависимости от изменения конструкции. Такой подход не моделирует прогрев конструкции в течение ТПЦ, однако позволяет с приемлемой точностью «переносить» тепловое состояние с исходной конфигурации на оптимизируемую в течение упрощенного ТПЦ, что значительно сокращает время одной итерации оптимизации. Работа модуля приведена на рисунке 4.3.

Оптимизацию конструкции можно проводить либо в ручном режиме, меняя размеры в САД шаблонах, либо подключив разработанные САД/САЕ шаблоны к программному пакету, реализующему те или иные алгоритмы оптимизации (p7, ioso и т.д.).

По окончании оптимизации необходимо:

- 1) Заново создать термомеханическую модель двигателя с учётом актуальной оптимизированной конструкции РК (осуществляется автоматически);
- 2) Провести термомеханический расчет;
- 3) Запустить модуль интерполяции теплового состояния в проверочные CAD/CAE шаблоны;
- 4) Осуществить проверочные расчеты. При необходимости внести корректировки и провести новый виток оптимизации.

С помощью данного модуля проведена оптимизация дисков рабочих колес модернизированного двигателя, в ходе которой масса роторов снизилась на 8% (на 7.3 кг). После оптимизации в рамках цифрового двойника была осуществлена описанная выше расчетная цепочка для уточнения:

- 1) в автоматическом режиме перестроена термомеханическая модель двигателя с учётом оптимизированной конструкции РК;
- 2) осуществлен термомеханический расчет;
- 3) проведены проверочные расчеты.

Результаты показали, что оптимизированные конструкции удовлетворяют поставленным прочностным требованиям.

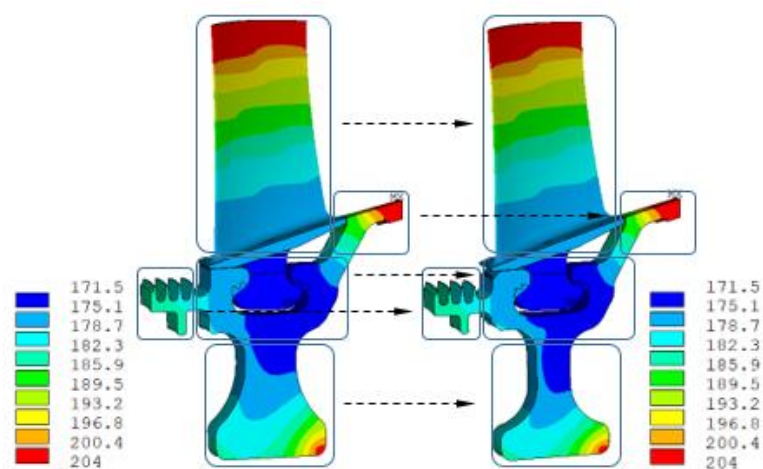


Рисунок 4.3 –Интерполяция теплового состояния в процессе оптимизации

## 5 Описание динамической модели модернизированного двигателя АИ-222-25

В целях исследования вибрационного состояния модернизированного двигателя АИ-222-25 разработана динамическая модель системы «роторы-подшипники-корпусы». Модель построена с применением метода конечных элементов и метода суперэлементов и состоит из следующих модулей:

- ротор НД;
- ротор ВД;
- корпус разделительный, корпус вентилятора, опоры вентилятора и опора КВД;
- корпус КВД;
- корпуса камеры сгорания и турбины;
- корпус задней опоры турбины;
- корпуса наружного контура.

В модель для анализа вибрации двигателя включена также модель силовой рамы испытательного стенда.

Для каждого из узлов, перечисленных выше построены отдельные трехмерные КЭ модели. Для сокращения количества степеней свободы корпусных модулей и модели стенда использован метод динамической редукации (fixed boundary CMS method). Для сокращения размерности моделей роторов использован метод статической конденсации (метод Гайана). Эквивалентность полных и редуцированных КЭ моделей проверена в серии тестовых расчетов.

Общая схема сборки редуцированной динамической модели приведена на рисунке 5.1. Динамическая модель двигателя собирается из суперэлементных моделей узлов двигателя, описанных выше. При этом узлы конденсации модулей, стыкующихся между собой по фланцам соединены жесткими пружинами. Ротора и корпуса соединены между собой

упругими элементами, отражающими жесткости опор: подшипников, демпферов и упругих элементов. Ряд элементов, не входящих в силовую схему двигателя, например, коробка приводов, включен в модель как точечные массы с эквивалентными инерционными характеристиками.

Осуществлена автоматизация работы динамической модели, её интеграция в цифровой двойник и связь с другими моделями. В рамках цифрового двойника динамическая модель используется для проведения различных исследований собственных и критических частот отдельных роторов, системы «роторы-подшипники-корпус» и динамики всего двигателя в целом.

Помимо основных результатов вычислений динамическая модель формирует для цифрового двойника изображения с формами колебаний роторов двигателя, амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) виброскоростей по датчикам вибрации и т.д. (см. рисунок 5.2 и 5.3).

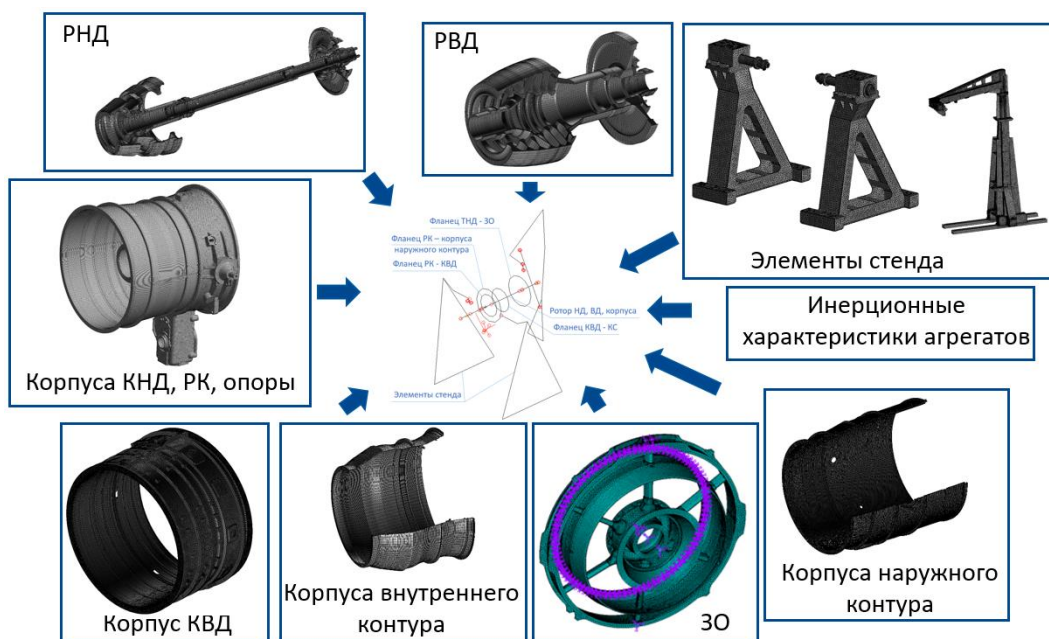


Рисунок 5.1 – Схема сборки динамической модели двигателя

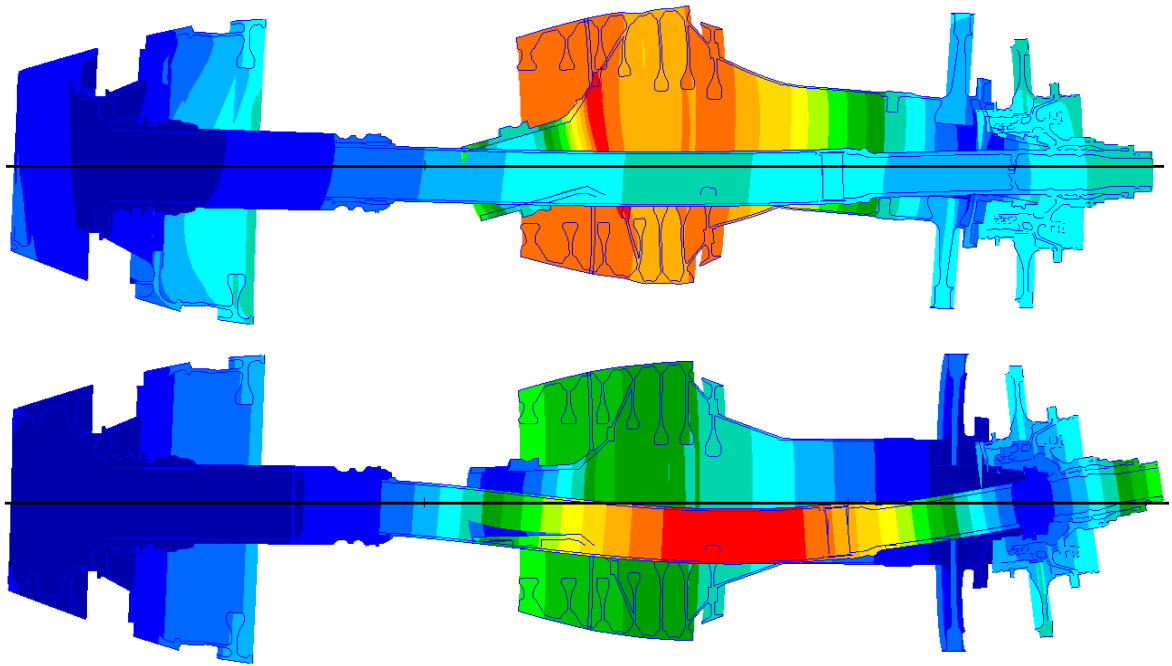


Рисунок 5.2 – Пример формы колебаний роторов двигателя, которые создает динамическая модель для ЦД

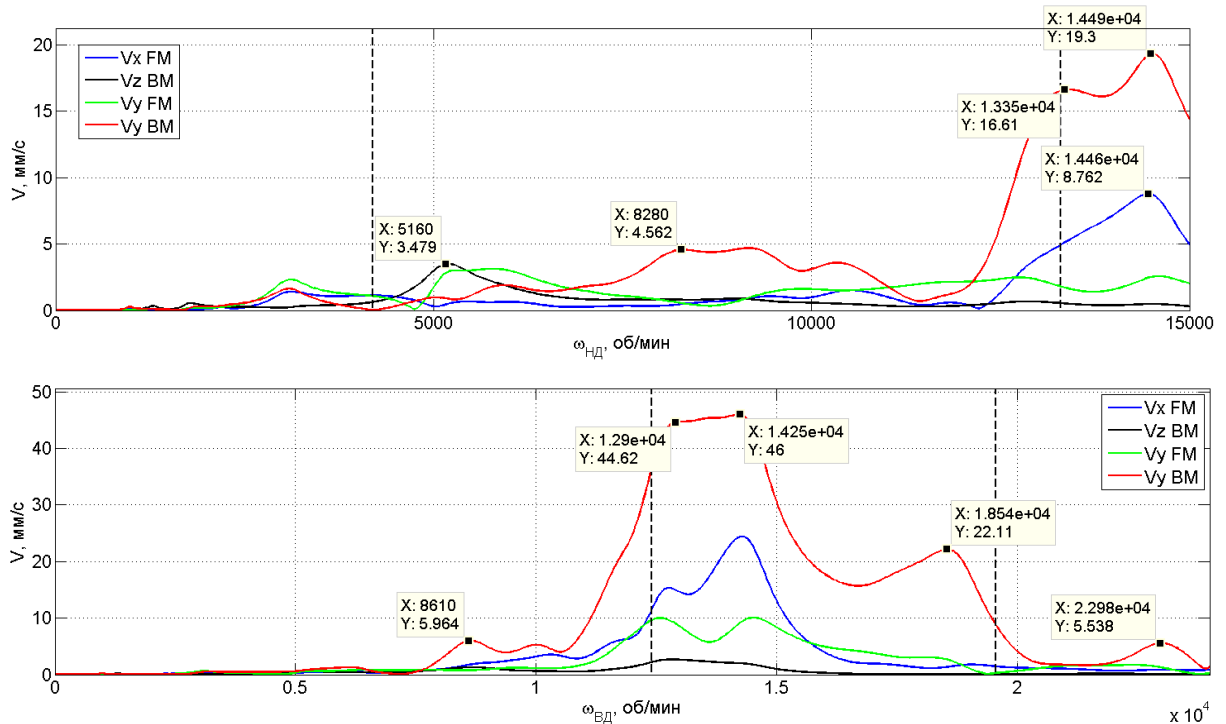


Рисунок 5.3 – Пример АЧХ виброскоростей двигателя, которые создает динамическая модель для ЦД

## 6 Описание газодинамической 3D модели газогенератора

Для цифрового двойника модернизированного двигателя АИ-222-25 разработана газодинамическая 3D модель всего газогенератора (ГГ) в составе испытательного стенда. Общий вид газогенератора приведен на рисунке 6.1.

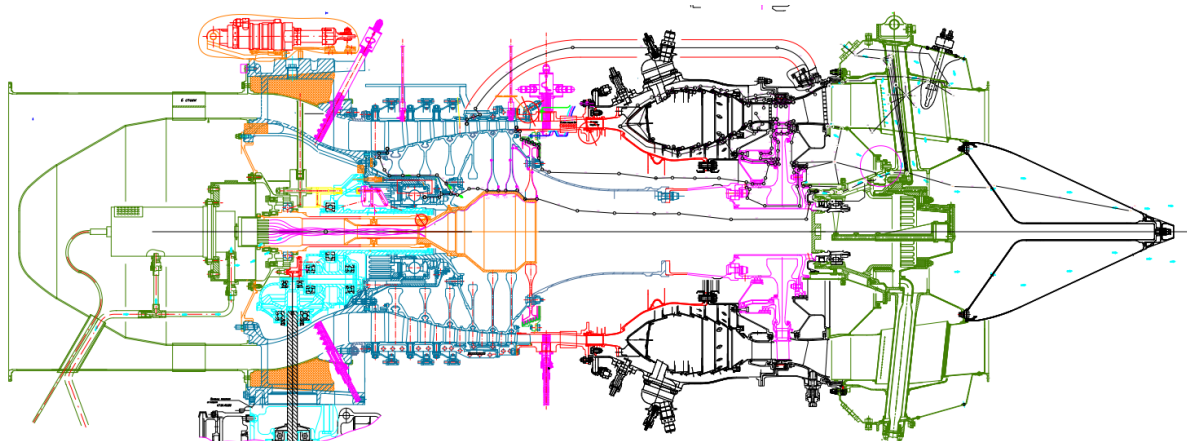


Рисунок 6.1 – Общий вид газогенератора

Модель газогенератора состоит из 30 расчетных областей, представляющих собой сектора элементов проточной части газогенератора. Общий вид расчетных областей в собранном состоянии приведен на рисунке 6.2.

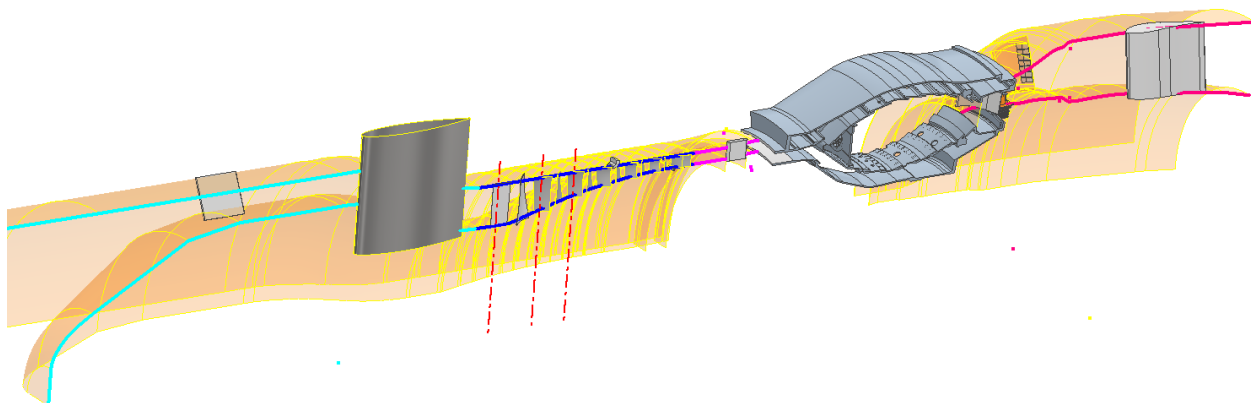


Рисунок 6.2 – 3D модель расчётных областей для сквозного расчета ГГ

Задача газодинамического моделирования ГГ включает в себя несколько разных зон, на границах которых течения резко меняют свой характер (например, перед или после камеры сгорания). Также эта задача является весьма трудоемкой с точки зрения вычислительных ресурсов. Поэтому из-за большого объема и неустойчивости решения поставленной задачи, перед выполнением сквозного расчета ГГ выполняется ряд вспомогательных задач расчета газодинамики нескольких наборов расчетных областей в изолированной постановке. После этого с использованием полученных результатов (используются в качестве начальных приближений) расчетные сетки объединяются в одну для всего ГГ в составе стенда (см. рисунок 6.3) и осуществляется сквозной газодинамический расчет на испытательных режимах. Расчетная модель содержит в себе 77 077 433 элементов.

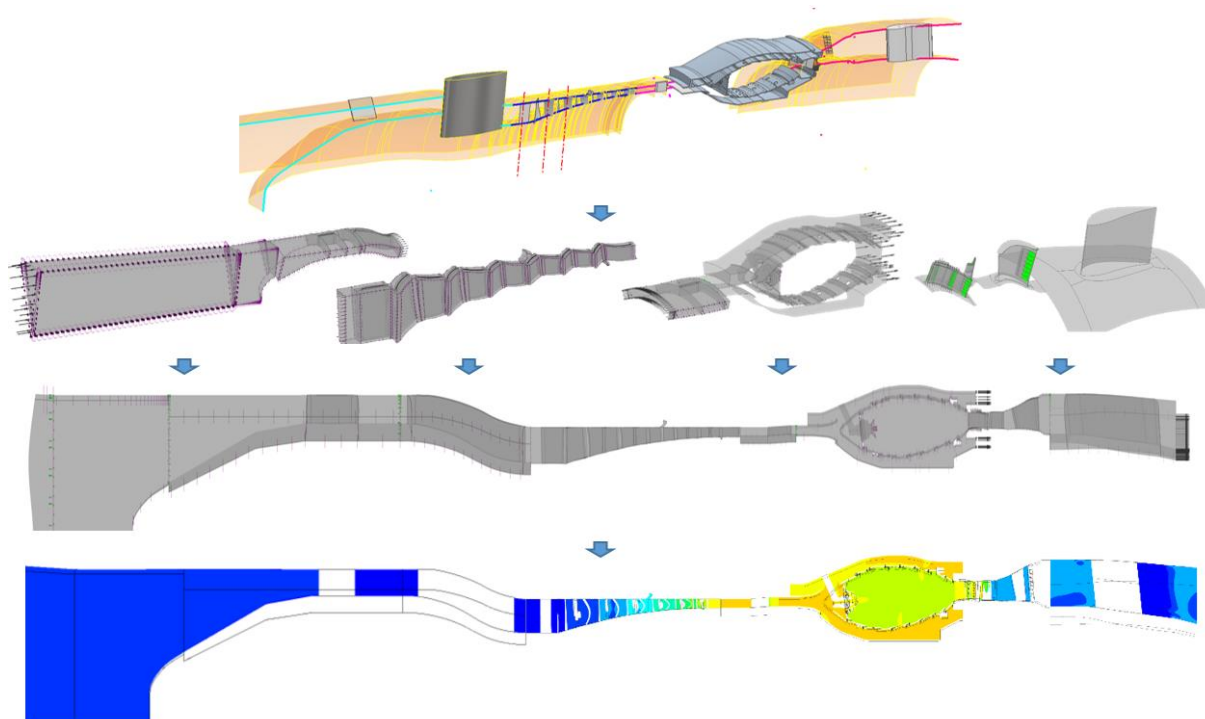


Рисунок 6.3 – Объединенная модель ГГ

Расчет газодинамического расчёта течения вязкого теплопроводного газа в проточной части выполняется с учётом влияния турбулентности потока в стационарной постановке (RANS) с применением высокорейнольдсовой модели турбулентности SST (Shear Stress Transport) с автоматической пристеночной функцией [4].

Расчёт горения топливно-воздушной смеси в секторе камеры сгорания представляет собой совместное решение уравнений аэродинамического расчёта и дополнительных уравнений для моделирования распыла и горения испаренного топлива.

Для имитации распыла использовалась модель дискретной фазы, учитывающая испарение капель, начальные размеры которых задавались по распределению Розин-Рамлера. Для моделирования химических превращений (горения) тонких фронтов пламени (Flamelet PDF [5]).

Решение проводилось с учётом переменных теплофизических свойств воздуха и керосина. Для воздуха плотность определялась по уравнению идеального газа, теплоёмкость – с помощью полиномиальной зависимости 9-го порядка, теплопроводность – по соотношениям кинетической теории, вязкость – по формуле Сатерленда. Для жидкой фазы керосина теплофизические свойства задавались при помощи констант и полиномов. При проведении расчётов с горением, свойства отдельных компонентов смеси принимались постоянными.

Газодинамическая модель газогенератора интегрирована в цифровой двойник двигателя и применяется для проведения виртуальных испытаний с целью:

- 1) определения оптимальной программы испытаний;
- 2) выбора места расположения датчиков;
- 3) прогнозирования результатов испытаний;
- 4) помощи в интерпретации результатов испытаний.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Осуществлены работы по разработке элементов цифрового двойника модернизированного двигателя АИ-222-25». В ходе работы:

- Составлена общая схема взаимодействия разрабатываемых для цифрового двойника модернизированного двигателя АИ-222-25 компьютерных моделей.
- Разработаны газодинамические 3D модели основных узлов (компрессора, камера сгорания и турбины) модернизированного двигателя АИ-222-25. Осуществлена их верификация и валидация.
- Разработана динамическая модель модернизированного двигателя АИ-222-25. Модель включает все основные структурные элементы силовой схемы двигателя: ротора ВД и НД, полную систему корпусов, а также элементы испытательного стенда.
- Разработана 3D модель газогенератора, содержащая в себе 30 расчетных областей, представляющих собой сектора элементов проточной части газогенератора. Выполнен сквозной газодинамический расчет газогенератора на стационарных режимах согласно программе планируемых испытаний.
- Разработаны параметризованные 3D CAD/CAE прочностные шаблоны всех рабочих колес, которые позволяют автоматически перестраивать расчетные модели и осуществлять серию стандартных инженерных расчетов, связанных с определением характеристик прочности и собственных частот.
- На базе созданных 3D CAD/CAE шаблонов разработаны модуль учета влияния реальных размеров рабочих колес на их характеристики прочности и собственные частоты, а также модуль прочностной оптимизации лопаток и дисков.

- Создана параметризованная сопряженная термомеханическая конечно-элементная модель всего двигателя, в которую при помощи разработанных CAD/CAE шаблонов можно автоматически встраивать актуальную конструкцию рабочих колес, полученную либо в процессе обмера реальной конструкции двигателя, либо в процессе прочностной и газодинамической оптимизации ПК.
- Разработанные газодинамические 3D модели узлов, параметризованные CAD/CAE шаблоны и термомеханическая модель интегрированы в ЦД и объединены в большую комплексную компьютерную модель с высокой степенью автоматизации и передачи данных между её составными частями.
- Данная комплексная компьютерная модель позволяет определять кинетику теплового состояния, НДС, радиальных и осевых зазоров (и других параметров) всего двигателя в течение произвольно заданного типового полетного цикла. При этом высокая степень автоматизации составных частей созданной комплексной модели и работа в цифровой платформе значительно снижает трудоемкость актуальных исследовательских работ, начиная от доработки конструкции деталей и узлов двигателя, определения характеристик конкретного экземпляра двигателя с учётом реальных размеров его роторов и заканчивая моделированием реальных случаев эксплуатации или проведения серии виртуальных «запусков» двигателя для формирования базы обучения нейросетей и создания упрощенных ROM моделей, которые потом будут применяться для цифрового сопровождения эксплуатации конкретных экземпляров двигателя.
- Осуществлена оптимизация рабочих колес и проведены последующие уточняющие расчеты. В ходе оптимизации масса роторов уменьшилась на 8.1% (на 7.3 кг).

- Все созданные компьютерные модели интегрированы в цифровой двойник модернизированного двигателя АИ-222-25 и соединены с его матрицей требований. Между моделями созданы связи для передачи данных в процессе проведения расчетных исследований.

Разработанные компьютерные модели используются в качестве центрального расчетного элемента цифрового двойника модернизированного двигателя АИ-222-25, так они позволяют автоматически осуществлять основные типовые инженерные исследования и расчеты, а также формировать исходные данные (тепловое состояние, радиальные зазоры, перемещения деталей, собственные частоты, газодинамические характеристики и т.д.) для остальных специализированных более сложных и точных компьютерных моделей, входящих в цифровой двойник.

Важной особенностью всех разработанных элементов является высокая степень их автоматизации и параметризации, что позволяет:

- снизить трудоемкость, связанную с перестройкой компьютерных моделей, передачей данных и организацией сложных многодисциплинарных расчетов;
- минимизировать появления ошибок в процессе взаимодействия КМ внутри цифрового двойника;
- оперативно расчетным путем получать отклик от цифрового двойника на вносимые в конструкцию или условия эксплуатации изделия отклонения;
- адаптировать цифровой двойник под конкретный экземпляр двигателя и учесть особенности его конструкции и условия эксплуатации
- осуществлять с меньшей трудоемкостью модификацию и доработку изделия.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] ГОСТ Р 57700.37–2021. «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения.» Москва, Российский институт стандартизации, 2021. 10 с.
- [2] Сальников А.В., Гордин М.В., Шмотин Ю.Н. и др. Цифровые двойники — платформа для управления жизненным циклом авиационных двигателей. Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2022, № 4, с. 60–72, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-4-60-72>
- [3] Bathe K.-J. Finite Element Procedures. Prentice Hall, 1996.
- [4] F.R. Menter. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. // AIAA Journal, 32 (8), pp. 1598-1605, 1994.
- [5] K. Zhang, A. Ghobadian, J.M. Nouri. Comparative study of non-premixed and partially-premixed combustion simulations in a realistic Tay model combustor. // Applied Thermal Engineering, 110, pp. 910-920, 2017.