

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт  
институт  
Тепловые электрические станции  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
Е.А. Бойко  
подпись инициалы, фамилия  
« \_\_\_\_ » 20 \_\_\_\_ Г

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Разработка системы информационной поддержки жизненного цикла  
теплоэнергетического оборудования на этапе проектирования

тема

13.04.01 – Теплоэнергетика и теплотехника

код и наименование направления

13.04.01.02 – Энергоэффективные технологии производства  
электрической и тепловой и энергии

код и наименование магистерской программы

Руководитель	_____	_____	Л.Н. Подборский
	подпись, дата	должность, учёная степень	инициалы, фамилия
Выпускник	_____		К.Е. Азанов
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Рецензент	_____	_____	В.Д. Труфанов
	подпись, дата	должность, учёная степень	инициалы, фамилия
Нормоконтролер	_____		П.В. Шишмарев
	подпись, дата		инициалы, фамилия

Красноярск 2023

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
**«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Политехнический институт

---

институт

Тепловые электрические станции

---

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

Е.А. Бойко

подпись

инициалы, фамилия

« \_\_\_\_ »

\_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ Г

**ЗАДАНИЕ**  
**НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ**  
**в форме \_\_\_\_\_ магистерской диссертации**

бакалаврской работы, дипломного проекта, дипломной работы, магистерской диссертации

Красноярск 2023



## РЕФЕРАТ

Данная выпускная квалификационная работа на тему «Разработка системы информационной поддержки жизненного цикла теплоэнергетического оборудования на этапе проектирования» содержит 63 страницы текстового документа, 55 иллюстраций, 7 таблиц, 9 использованных источников.

**ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ИЗДЕЛИЯ, ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ПАРОВАЯ ТУРБИНА, АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ, PLM-СИСТЕМЫ, САД-СРЕДЫ, МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ, КОНСТРУКТОРСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ, ТРУДОЗАТРАТЫ.**

Данная работа была написана с целью разработки алгоритма автоматизации процессов жизненного цикла оборудования с применением средств трёхмерного проектирования на примере элементов тепломеханического оборудования.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Произведена оценка функционала актуальных на момент написания работы САД- и PLM-сред, определён оптимальный набор программ для составления информационной модели;

2. Разработан расчётный макет, включающий в себя блок ввода исходных данных, блок расчёта, куда прописан тепловой, детальный и прочностной расчёты проточной части, и блок вывода результатов. В результате получен набор геометрических характеристик элементов проточной части и величины нагрузок на рабочие ступени;

3. Создана 3D-модель цилиндра высокого давления;

4. Произведена привязка расчётного макета (пункт 2) к 3D-модели, создана тем самым расчётнозависимая модель;

5. Математический анализ полученной геометрии на примере прочностного анализа элементов проточной части на основе результатов прочностного расчёта (пункт 2).

6. Выполнена оценка экономического эффекта от внедрения подобной автоматизированной системы в производство.

В результате исследования был составлен алгоритм автоматизации процессов проектирования тепломеханического оборудования, создана рабочая автоматизированная информационная модель цилиндра высокого давления паровой турбины и доказана перспективность применения данного подхода к проектированию ввиду сокращения трудозатрат на разработку проекта на 82%.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Формирование задачи .....	6
1.1 Технология PLM: описание, возможности, анализ технологии .....	6
1.2 Обоснование выбора типоразмера турбины .....	12
2 Создание автоматизированной информационной модели теплотехнического оборудования в PLM-среде .....	13
2.1 Расчётная часть.....	14
2.1.1 Описание турбины К-300-240.....	14
2.1.2 Предварительный расчёт.....	16
2.1.3 Детальный расчёт регулирующей ступени .....	21
2.2 Построение параметризованной трёхмерной модели .....	31
2.3 Математический анализ элементов оборудования.....	45
3 Оценка экономического эффекта от внедрения автоматизации .....	56
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	61
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	62

## ВВЕДЕНИЕ

Внедрение различных систем автоматизаций на производстве электроэнергии решает множество проблем, связанных с эксплуатацией и обслуживанием энергетического оборудования, тогда как проектирование основного оборудования этих самых станций производится вручную и требует затрат большого количества времени и ресурсов.

Основное оборудование электрических станций представлено устоявшимся стандартным модельным рядом. Применение типовых решений позволяет существенно сократить трудозатраты на разработку проектной и рабочей документации для нового производства, однако в наше время значительную часть от общего объёма проектных работ специализированных предприятий (заводов-изготовителей, проектных институтов) занимают реконструкции уже существующего оборудования, находящегося в эксплуатации.

Сам же процесс проектирования включает в себя такие этапы, как тепловой и конструкторский расчёты, расчёт геометрических параметров и прочностной расчёт отдельных элементов. На основании расчётов разрабатывается трёхмерная модель оборудования и проверяются её прочностные и гидравлические характеристика при помощи специализированного программного обеспечения.

Сократить трудозатраты и повысить эффективность проектирования типового энергетического оборудования позволит создание информационной модели, охватывающей все этапы проектирования.

Объектом данного исследования является последовательность разработки проекта тепломеханического оборудования (система, объединяющая в себе последовательность отдельных этапов разработки проекта). Предметом исследования является такое свойство данной системы, как заложенная разработчиками адаптивность к средствам автоматизации.

Гипотеза заключается в предположении о том, что автоматизация энергетического производства на стадии проектирования возможна и необходима для решения различных технических задач. Если мы используем средства автоматизации программных продуктов применительно к теплоэнергетическому оборудованию, то сможем разработать систему информационной поддержки жизненного цикла изделия.

Цель исследования – создание автоматизированной информационной модели и алгоритмического обеспечения автоматизации трёхмерного проектирования теплотехнического оборудования на стадиях от получения технического задания до выдачи конструкторской документации на примере цилиндра высокого давления паровой турбины.

Научная новизна данной работы заключается в формировании методологической последовательности (алгоритма) создания автоматизированных информационных моделей энергетического оборудования, позволяющих автоматизировать процессы жизненного цикла изделия на стадии

его проектирования от получения технического задания до выдачи конструкторской документации.

Практическая значимость заключается в том, что результат исследования применим при проектировании изделия любой сложности и специализации, внедрение таких элементов автоматизации жизненного цикла, как создание автоматизированных информационных моделей, в производство позволит сократить трудозатраты на проектирование оборудования, а также сократит вероятность возникновения ошибок, вызванных человеческим фактором.

## **1 Формирование задачи**

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Произвести оценку функционала актуальных на момент написания работы САД- и PLM-сред, определить оптимальный набор программ для составления информационной автоматизированной модели;
2. Разработать расчётный макет, включающий в себя блок ввода исходных данных, блок расчёта, куда прописан тепловой, детальный и прочностной расчёты проточной части, и блок вывода результатов. Результатами будет набор геометрических характеристик элементов проточной части и величины нагрузок на рабочие ступени;
3. Создать 3D-модель цилиндра высокого давления;
4. Осуществить привязку расчётного макета (пункт 2) к 3D-модели, создав тем самым расчётнозависимую модель;
5. Математический анализ полученной геометрии на примере прочностного анализа элементов проточной части на основе результатов прочностного расчёта (пункт 2);
6. Выполнить оценку экономического эффекта от внедрения подобной автоматизированной системы в производство.

### **1.1 Технология PLM: описание, возможности, анализ технологии**

PLM-система (от англ. product lifecycle management system) в контексте данного исследования представляет собой программный комплекс, охватывающий процессы на стадии проектирования, модернизации и эксплуатации изделия производственно-технического назначения [1].





Рисунок 1 – Стадии ЖЦИ

Чем обусловлена привлекательность применения систем информационной поддержки жизненного цикла изделия в энергетике? Электростанция – сложная техническая система, состоящая из огромного количества взаимосвязанного оборудования. Основным оборудованием называются паровые котлы, турбины, генераторы и силовые трансформаторы, обладающие своим набором характеристик и рабочих параметров, определяющих конструктивные особенности оборудования.

Так, например, расход свежего пара на турбину напрямую зависит от паропроизводительности котла (при блочной схеме), её снижение ведёт к уменьшению выработки электроэнергии, а также изменению давлений за ступенями и в отборах, что, в свою очередь, ведёт к понижению внутреннего относительного КПД.

Отклонения фактических параметров рабочей среды от номинальных в большей части случаев вызвано ошибками на стадии принятия технических решений (40-45%) [2]. Более того, исправление заложенных в первоначальный проект ошибок ведёт к существенным затратам ресурсов на исправление и перепроектирование. Факторы, определяющие надёжность энергетического оборудования представлены на рисунке 2.

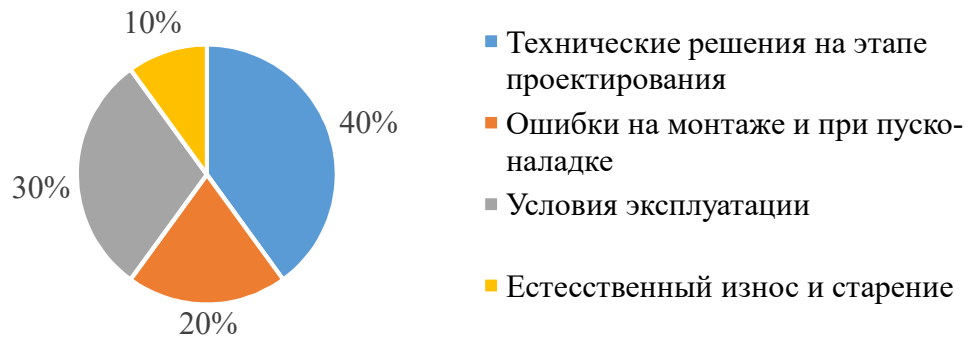


Рисунок 2 – Факторы, определяющие надёжность энергетического оборудования

Стоит также понимать, что любое теплоэнергетическое оборудование представляет собой совокупность множества элементов, объединённых в системы. Укрупнённый элементный состав турбины представлен на рисунке 3.



Рисунок 3 – Укрупнённый элементный состав паровой турбины

В связи с большим количеством элементов перед началом проектирования необходимо выделить те элементы, расчёт которых будет производиться в первую очередь. Результаты расчётов таких элементов будут влиять на характеристики остальных. Приоритетными для турбины можно считать элементы проточной части, то есть рабочие ступени насадных или цельнокованных дисков с рабочими лопатками, а также сопловые лопатки.

Использование средств автоматизации на этапе построения трёхмерного макета изделия позволяет учесть все зависимости между элементами разной степени приоритета, а также сократить время и количество исправлений в процессе проектирования.

Возникновению ошибок при проектировании также способствует разобщённость стадий разработки, когда отсутствует связь между программами, выполняющими разные функции. Например, расчёт геометрии был произведён в одной среде, а построение трёхмерной модели – во второй, никак не связанной с первой.

Именно объединение цепочки процессов (стадий) разработки проектов в единую систему из взаимосвязанных модулей является основной задачей PLM-систем. Интеграция большого числа программных продуктов с различным функционалом в одну систему, направленную на решение поставленной задачи, в корне меняет подход к проектированию. Если до появления PLM-систем за каждый этап разработки проекта отвечал специально обученный персонал, то введение таких систем требует от каждого инженера, задействованного в разработке проекта, понимания всех этапов проектирования, включённых в используемую PLM-систему.

PLM-системы позволяют:

1. Снизить затраты времени и средств на производство технической документации;
2. Создать библиотеки изделий и, следовательно, ускорить разработку аналогичных проектов;
3. Структурировать получаемые данные в соответствии с эргономикой производства проекта;
4. Снизить производственные затраты на создание макетов и испытательных стендов;
5. Организовать работу большого количества людей;
6. Устранить ошибки расчётов на ранних стадиях проектирования.

В связи с перечисленными достоинствами данных систем автоматизация производства изделий в энергетической отрасли является стратегической задачей, призванной вывести производство и дальнейшее обслуживание оборудования на принципиально новый уровень.

Зачастую предприятия внедряют упрощённые системы, предназначенные лишь для автоматизации документооборота. Такие системы имеют ограниченный функционал и не способны влиять на качество проработки проекта. И тем не менее, находится немало предприятий, стремящихся использовать все возможности PLM-систем.

Большого успеха в разработке систем информационной поддержки ЖЦИ достигли западные компании, использующие в качестве CAD-сред собственные программные продукты: французская Dassault Systems (CATIA), немецкая Siemens PLM Software (Siemens NX) и американская PTC (Creo Parametric). Также в отечественной практике имеют место системы, основанные на КОМПАС-3D и SolidWorks.

Таблица 1 – Сравнение САD-сред

Параметры	КОМПАС-3D	SolidWorks	CATIA V5	Creo Parametric	Siemens NX
Создание 3D-моделей изделия	+	+	+	+	+
Создание чертежей изделия	+	+	+	+	+
Создание сборочных изделий	+	+	+	+	+
Создание библиотек изделий	+	+	+	+	+
Интеграция с PLM-системами	+	+	+	+	+
Наличие инструментария для прочностных и гидравлических расчётов	–	+*	+	–	+

\* – необходимые функции присутствуют в пользовательских модулях к программе

Рассмотрим более подробно каждый из указанных вариантов. Все эти варианты объединяет принцип построения геометрии: первым делом определяется система координат и плоскость эскиза, затем строится непосредственно эскиз. По завершении построения контура фигуры, производятся стандартные твердотельные операции. Также в каждой из программ имеется редактор сборок и модуль построения 2D-документации.

И если с принципиальными и общими чертами всех САD-сред всё предельно ясно, то обозначив различия этих сред, можно определить наиболее подходящую для данной исследовательской работы среду.

Интерфейс почти каждой из программ разработан с ориентацией на среднестатистического пользователя. Интерфейс CATIA V5 (рисунок 4) совместим с операционной системой Windows, что, в теории, должно положительно сказываться на восприятии пользователем, однако на практике интерфейс программы содержит множество свёрнутых функциональных блоков, что усложняет поиск необходимой команды.

Главное преимущество CATIA V5 и Siemens NX – это наличие расчётных модулей, позволяющих оценить эффективность технических решений проектировщиков по результатам расчёта нагрузок или гидравлики. SolidWorks также обладает подобными функциями, однако они подключаются модулями, что ведёт к необходимости их отдельно запускать. Также расчёты в данных модулях имеют сугубо оценочный характер и не могут соревноваться в точности с указанными выше аналогами.

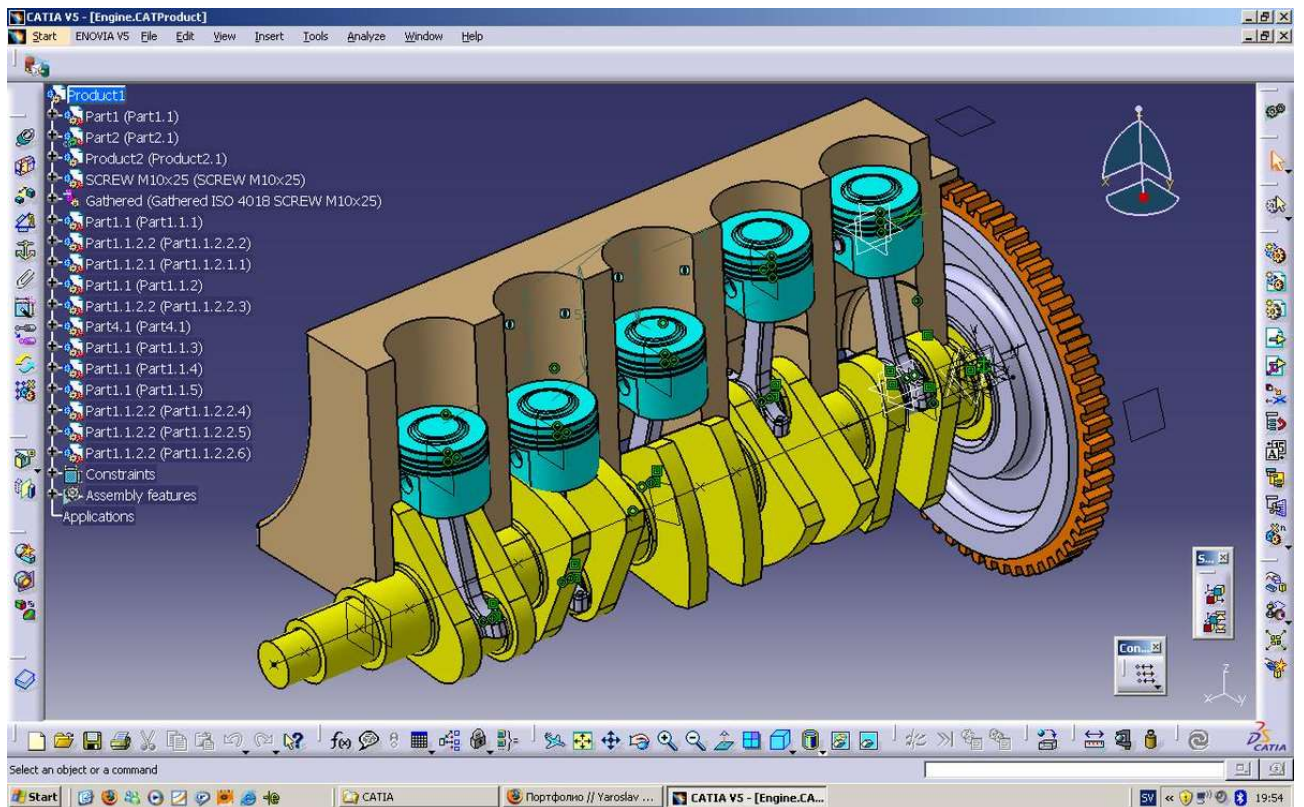


Рисунок 4 – Интерфейс CATIA V5

Стоит отдельно выделить predisположенность Siemens NX к автоматизации самого процесса построения моделей. При задании размеров в эскизе или в твердотельных операциях пользователь имеет возможность сразу задать имя размера и определить его как формулу или функцию. Аналогичная функция присутствует у конкурентов, однако она, как правило, скрыта от пользователя и не имеет такого широкого диапазона применений, как у NX. Интерфейс Siemens NX представлен на рисунке 5.

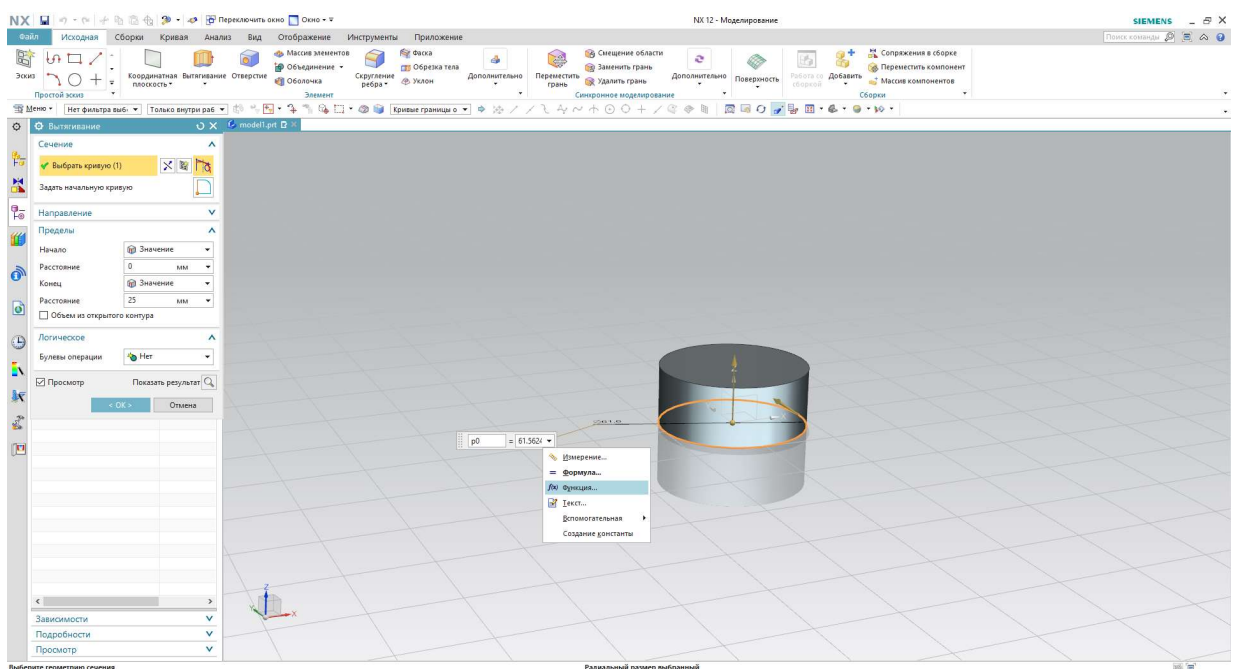


Рисунок 5 – Интерфейс Siemens NX

По итогу сравнения нескольких программ наиболее приспособленной к средствам автоматизированного проектирования оказалась среда Siemens NX. Главным преимуществом этой программы является наличие в ней средств автоматизации и программных модулей, необходимых для проведения расчётов и моделирования изделия на всех стадиях жизненного цикла оборудования. На рисунке 6 представлен основной функционал Siemens NX.

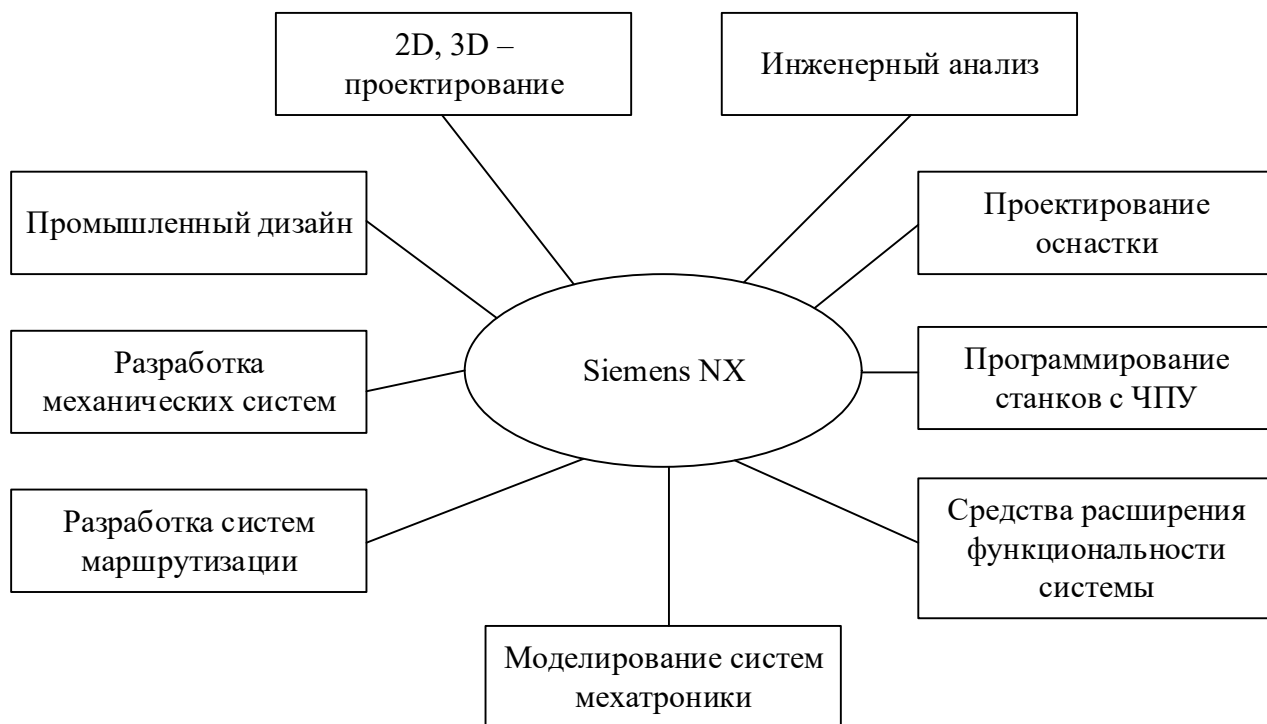


Рисунок 6 – Функциональные модули Siemens NX

Данная САД-среда является очень гибкой и дружелюбной даже к пользователю, незнакомому с принципами и логикой построения трёхмерных моделей, а встроенные модули позволяют произвести расчёт нагрузок, аэродинамический и термодинамический расчёты непосредственно в среде моделирования, что сводит к минимуму список сторонних программ, задействованных в разработке проекта.

## 1.2 Обоснование выбора типоразмера турбины

На сегодняшний день модельный ряд паровых турбин представлен агрегатами, мощность которых варьируется от 5 кВт до 1200 МВт. Первой турбиной массового производства стала К-300-240 ЛМЗ, такие машины распространены как на всей территории нашей страны, так и за рубежом. По данной турбине имеется подробное пособие [3], в котором приведены основные конструктивные параметры. Такая изученность вкупе с распространённостью данной турбины располагает к применению на турбине К-300-240 технологии информационной поддержки жизненного цикла изделия. В дальнейшем будет разработана автоматизированная информационная модель данного изделия в среде Siemens NX.

## 2 Создание автоматизированной информационной модели теплотехнического оборудования в PLM-среде

Структура автоматизированной информационной модели представлена на рисунке 7.

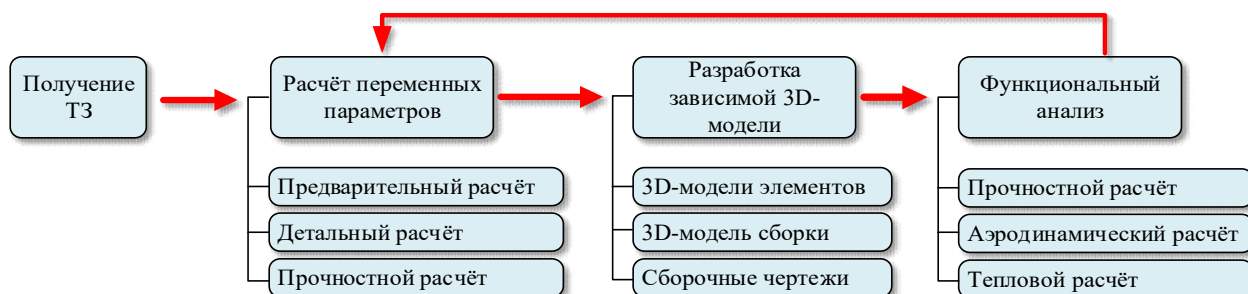


Рисунок 7 – Структура автоматизированной информационной модели

В рамках данного исследования ТЗ будет представлять собой набор исходных параметров, влияющих на эффективность работы турбоагрегата, изменение которых может потребовать корректировки геометрических параметров. Ряд таких параметров приведён на рисунке 8.



Рисунок 8 – Влияние внешних факторов на исходные данные при расчёте паровых турбин

На основании ТЗ производится тепловой расчёт проточной части турбины. Для «нулевой итерации» расчёта табличные коэффициенты задаются согласно выбранному ранее типоразмеру турбоагрегата (К-300-240).

Построение трёхмерной модели включает в себя поочерёдное построение подмоделей (ротор, статор, подшипники и т.д.) с последующим их объединением в сборочную модель. По завершении моделирования производится прочностной расчёт элементов проточной части и экономическая оценка целесообразности технических решений. Получение данных, не удовлетворяющих требований заказчика (разработчика ТЗ) ведёт к пересмотру начальной геометрии модели. Итерационным путём определяется наиболее технически и коммерчески целесообразная модель изделия.

## 2.1 Расчётная часть

Создание информационной модели является комплексной задачей, решение которой требует полного понимания принципов работы и основ проектирования тепломеханического оборудования. От правильности произведённых теплового и конструкторского расчётов напрямую зависит работоспособность всей модели, поэтому необходимо уделить особое внимание расчётной части.

Расчётная часть состоит из следующих этапов:

1. Предварительная оценка расхода пара;
2. Построение процесса расширения;
3. Расчёт принципиальной тепловой схемы;
4. Уточнение расхода пара;
5. Детальный расчёт ступеней.

Конечным результатом расчётной части является создание расчётного макета в среде Microsoft Excel.

### 2.1.1 Описание турбины К-300-240

Основные параметры, влияющие на конструктивные характеристики данной турбины представлены на схеме ниже.

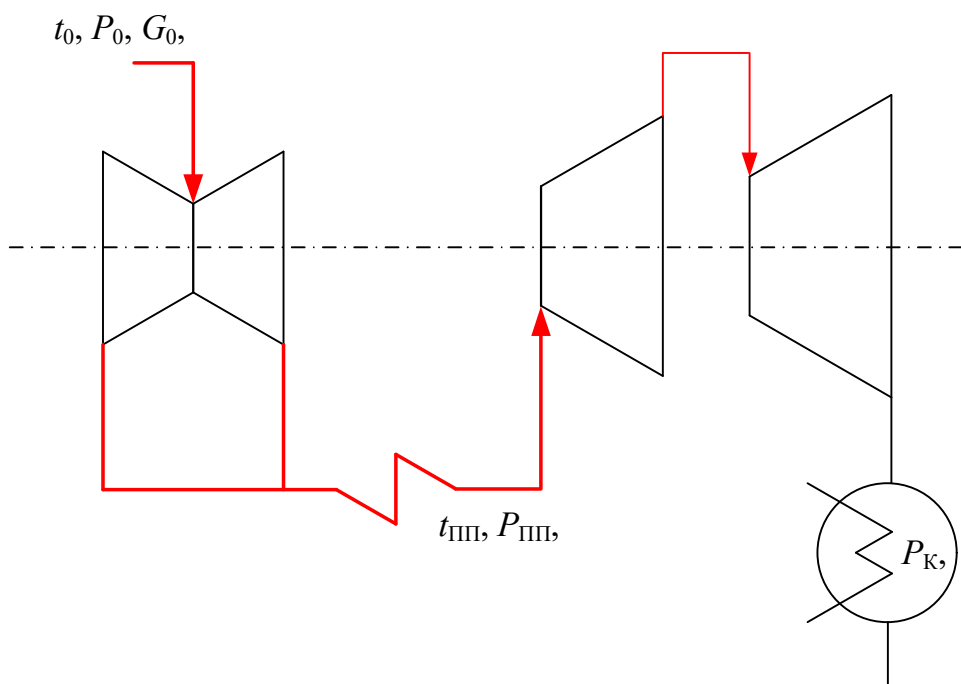


Рисунок 9 – Основные параметры, влияющие на конструкцию турбины

Паровая, конденсационная, одновальная турбина К-300-240 ХТГЗ, номинальной мощностью 300 МВт, работающая при частоте вращения 3000 об/мин, предназначена для привода генератора переменного тока. Турбина рассчитана для работы с параметрами свежего пара перед стопорными клапанами цилиндра высокого давления (ЦВД) турбины  $240 \text{ кг*см}^2$  и  $560 \text{ }^\circ\text{C}$  и



температурой пара после промперегрева, измененной перед стопорными клапанами цилиндра среднего давления (ЦВД) 565 °С.

Основные технические /расчетные/ показатели работы турбоагрегата при номинальном режиме следующие:

Номинальная мощность: 300 МВт.

Частота вращения ротора: 3000 об/мин.

Давление свежего пара перед блоками клапанов ЦВД: 240 кгс/см<sup>2</sup>.

Температура свежего пара перед блоками клапанов ЦВД: 560°С.

Давление пара на выходе из ЦВД: 40 кгс/см<sup>2</sup>.

Температура пара на выходе из ЦВД: 309°С .

Давление пара после промперегрева перед входом в ЦСД – 36 кгс/см<sup>2</sup>.

Температура пара после промперегрева перед блоками клапанов ЦСД – 565°С.

Давление в конденсаторе при расчетной температуре охлаждающей воды +12°С и расчетном ее расходе 34805 м<sup>3</sup>/час – 0,035 кгс/см<sup>2</sup>.

Температура питательной воды после ПВД – 265°С.

Турбина имеет девять нерегулируемых отборов пара, предназначенных для подогрева питательной воды в ПВД и основного конденсата в ПНД.

Турбина представляет собой одновальный трехцилиндровый агрегат с тремя выхлопами пара в один общий конденсатор, Свежий пар из котла подается к двум отдельно стоящим блокам клапанов парораспределения ЦВД.

В каждом блоке клапанов парораспределения ЦВД расположено по одному стопорному и по три регулирующих клапана. После регулирующих клапанов пар по десяти перепускным трубам поступает к четырем паровпускным патрубкам ЦВД. Паровпускные патрубки расположены на корпусе ЦВД симметрично – два сверху и два снизу.

Парораспределение турбины – сопловое. Через паровпускные патрубки свежий пар подается к сопловым камерам, выполненным во внутреннем корпусе ЦВД.

Сопловых камер четыре: первые две работают параллельно, остальные две – последовательно.

После ЦВД пар отводится в промежуточный пароперегреватель котлоагрегата, а затем направляется обратно в турбину через блоки клапанов ЦСД.

Цилиндр среднего давления однопоточный и конструктивно выполнен из двух частей: из части среднего давления и первого потока части низкого давления.

Часть среднего давления имеет 12 ступеней, после которых две трети пара перепускаются по двум ресиверам диаметром 1000 мм в двухпоточный цилиндр низкого давления, а одна треть пара поступает непосредственно в первый поток низкого давления (ЦНД), являющийся продолжением ЦСД. Первый поток низкого давления имеет пять ступеней давления, цилиндр низкого давления выполнен двухпоточным, с пятью ступенями давления в каждом потоке. Впуск пара производится в среднюю часть цилиндра сверху.

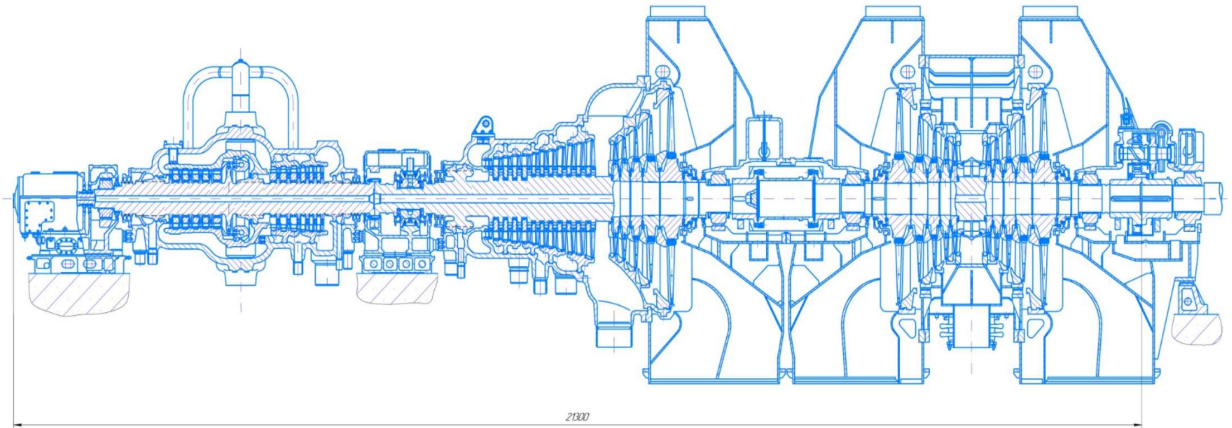


Рисунок 10 – Чертёж турбины К-300-240

### 2.1.2 Предварительный расчёт

Исходные данные для расчёта приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Исходные данные

Параметр	Значение
Прототип турбины	К-300-240
Давление свежего пара, МПа	23,5
Температура свежего пара, °С	540
Температура пром.перегрева, °С	540
Давление в конденсаторе, МПа	0,00343
Температура питательной воды, °С	262
Номинальная электрическая мощность, МВт	300

Для определения значения расхода свежего пара необходимо определить предварительный приведённый используемый теплоперепад турбины:

$$\bar{H}_i = \eta_{ip} \cdot [(h_0 - h_{нс}) + (h_{мн} - h_1)], \quad (1)$$

где  $h_0$  – энтальпия свежего пара, кДж/кг;

$h_{нс}$  – энтальпия питательной воды, кДж/кг;

$h_{мн}$  – энтальпия вторичного пара, кДж/кг;

$h_1$  – энтальпия пара за ЦВД, кДж/кг;

$\eta_{ip}$  – КПД ПТУ с регенерацией. Для определения данного КПД определяется КПД ПТУ без регенерации:

$$\eta_i = \frac{H_0^{ЦВД} \cdot \eta_{oi}^{ЦВД} + H_0^{ЦСД} \cdot \eta_{oi}^{ЦСД} + H_0^{ЦНД} \cdot \eta_{oi}^{ЦНД}}{H_0^{ЦВД} \cdot \eta_{oi}^{ЦВД} + (h_{мн} - h'_к)}, \quad (2)$$

где  $H_0^{ЦВД}$ ,  $H_0^{ЦСД}$ ,  $H_0^{ЦНД}$  – располагаемые теплоперепады отсеков, кДж/кг;

$\eta_{oi}^{ЦВД}, \eta_{oi}^{ЦСД}, \eta_{oi}^{ЦНД}$  – диаграммный КПД отсеков;

$h'_к$  – энтальпия конденсата, кДж/кг.

Выигрыш в экономичности от использования бесконечного числа регенеративных подогревателей:

$$\xi_p^{nm\infty} = \frac{1 - \frac{T_k \cdot (s_{nm} - s'_к)}{(h_0 - h_{1t}) + (h_{nm} - h'_к)}}{1 - \frac{T_k \cdot (s_{nm} - s_{ne})}{(h_0 - h_{1t}) + (h_{nm} - h_{ne})}}. \quad (3)$$

Далее по рисунку 1.24 [4] определяется  $\xi_p^{nm} / \xi_p^{nm\infty}$ , учитывающее число регенеративных подогревателей.

Таким образом, КПД ПТУ с регенерацией:

$$\eta_{ip} = \frac{\eta_i}{1 - \xi_p^{nm}}. \quad (4)$$

Возвращаясь к формуле (1) находим приведённый теплоперепад. Далее определяем приближённое значение расхода пара, кг/с:

$$G' = \frac{N_g}{H_i \cdot \eta_m \cdot \eta_{эз}}. \quad (5)$$

где  $\eta_m, \eta_{эз}$  – КПД механический и генератора.

Расход пара через конденсаторы, кг/с:

$$G_k = \frac{N_g}{(h_k - h'_к) \cdot \eta_m \cdot \eta_{эз}} \cdot \left( \frac{1}{\eta_{ip}} - 1 \right). \quad (6)$$

Далее производится оценка КПД отсеков и построение процесса расширения.

КПД регулирующей одновенечной ступени подсчитывается по формуле:

$$\eta_{oi}^{pc} = 0,83 - \frac{2 \cdot 10^{-4}}{G'} \cdot \sqrt{\frac{P'_0 \cdot 10^6}{V'_0}}, \quad (7)$$

где  $G'$  – расход пара на турбину, кг/с (см. формулу (5));

$P'_0$  – давление перед соплами регулирующей ступени, МПа;

$V'_0$  – удельный объём пара перед соплами, м<sup>3</sup>/кг.

Полезно использованный теплоперепад регулирующей ступени, кДж/кг:

$$h_i^{pc} = h_0^{pc} \cdot \eta_{oi}^{pc}, \quad (8)$$

где  $h_0^{pc} = 100$  – располагаемый теплоперепад, принимается исходя из температура за регулирующей ступенью, принимается в диапазоне 80-100 кДж/кг.

Откладываем действительный теплоперепад из точки начала процесса расширения регулирующей ступени до изобары, соответствующей окончанию теоретического процесса, и фиксируем точку начала процесса расширения ЧВД.

$$h_2^{pc} = h_0 - h_i^{pc}, \quad (9)$$

где  $i_0 = f(P_0, t_0)$  – энтальпия свежего пара перед регулирующей ступенью, кДж/кг.

Определим располагаемый теплоперепад ЧВД:

$$H_0^{ЧВД} = h_2^{pc} - h_{1t}, \quad (10)$$

где  $h_{1t} = f(S_2^{pc}, P'_k)$  – энтальпия пара на выходе из последней ступени ЦВД, кДж/кг.

Средний удельный объем отсека ступеней ЧВД, м<sup>3</sup>/кг:

$$V_{cp}^{ЧВД} = \sqrt{V_2^{pc} \cdot V_{2t}^{ЧВД}}, \quad (11)$$

где  $V_2^{pc} = f(S_2^{pc}, h_2^{pc})$  – удельный объем пара на входе в ЧВД, м<sup>3</sup>/кг;  
 $V_{2t}^{ЧВД} = f(S_2^{pc}, P_2^{ЧВД})$  – удельный объем пара на выходе из ЧВД, м<sup>3</sup>/кг.

Определяем КПД ЧВД:

$$\eta_{oi}^{ЧВД} = \left\{ 0,925 - \left[ 0,5 / (G' \cdot V_{cp}^{ЧВД}) \right] \right\} \cdot \left[ 1 + (H_0^{ЧВД} - 600) / 20000 \right], \quad (12)$$

где  $G'$  – расход пара на турбину, кг/с;

$H_0^{ЧВД}$  – располагаемый теплоперепад ЧВД, кДж/кг.

Полезно использованный теплоперепад ЧВД, кДж/кг:

$$H_i^{ЧВД} = H_0^{ЧВД} \cdot \eta_{oi}^{ЧВД}. \quad (13)$$

Определяем точку начала процесса расширения ЧВД:

$$h_2^{ЧВД} = h_2^{pc} - H_i^{ЧВД}. \quad (14)$$

На пересечении найденной энтальпии и изобары  $P'_{nn}$  находим точку начала процесса расширения ЧСД.

$$H_0^{ЧСД} = h_2^{ЧВД} - h_{2t}^{ЧСД}, \quad (15)$$

где  $h_{2t}^{ЧСД} = f(S_2^{ЧВД}, P_2^{ЧСД})$  – энтальпия пара на выходе из ЧСД, кДж/кг.  
Средний удельный объем отсека ступеней ЧСД, м<sup>3</sup>/кг:

$$V_{cp}^{ЧСД} = \sqrt{V_2^{ЧВД} \cdot V_{2t}^{ЧСД}}, \quad (16)$$

где  $V_2^{ЧВД} = f(S_2^{ЧВД}, h_2^{ЧВД})$  – удельный объем пара на входе в ЧСД, м<sup>3</sup>/кг;  
 $V_{2t}^{ЧСД} = f(S_2^{ЧВД}, P_2^{ЧСД})$  – удельный объем пара на выходе из ЧСД, м<sup>3</sup>/кг.  
Определяем КПД ЧСД:

$$\eta_{oi}^{ЧСД} = \left\{ 0,925 - \left[ 0,5 / (G' \cdot V_{cp}^{ЧСД}) \right] \right\} \cdot \left[ 1 + (H_0^{ЧСД} - 600) / 20000 \right], \quad (17)$$

где  $G'$  – расход пара на турбину, кг/с;  
 $H_0^{ЧСД}$  – располагаемый теплоперепад ЧСД, кДж/кг;  
Полезно использованный теплоперепад ЧСД, кДж/кг:

$$H_i^{ЧСД} = H_0^{ЧСД} \cdot \eta_{oi}^{ЧСД}. \quad (18)$$

Определяем точку начала процесса расширения ЧНД:

$$h_2^{ЧНД} = h_{nn} - H_i^{ЧСД}. \quad (19)$$

Определяем КПД ЧНД:

$$\eta_{oi}^{ЧНД} = 0,870 \cdot \left[ 1 + (H_0^{ЧНД} - 400) / 10000 \right] \cdot k_{вл} - \xi_{вс}, \quad (20)$$

где  $H_0^{ЧНД} = h_2^{ЧСД} - h_{2t}^{ЧНД}$  – располагаемый теплоперепад ЧНД, кДж/кг;  
 $h_{2t}^{ЧНД} = f(S_2^{ЧСД}, P_2^{ЧНД})$  – энтальпия пара на выходе из ЧСД, кДж/кг.  
 $k_{вл}$  – коэффициент, учитывающий снижение КПД от влажности, определяется по формуле:

$$k_{вл} = 1 - 0,4 \cdot (y_1 + y_2) \cdot \frac{H_0^{вл}}{H_0^{ЧНД}}, \quad (21)$$

где  $y_1 = 1 - x_1$  – степень влажности пара перед ЧНД;

$y_2 = 1 - x_2$  – степень влажности пара за ЧНД;  
 $H_0^{вл}$  – располагаемый теплоперепад ЧНД, равный теплоперепаду в области влажного пара, кДж/кг.  
 $\xi_{ec}$  – относительная потеря с выходной скоростью ЧНД. Определяется по формуле:

$$\xi_{ec} = \frac{\Delta H_{ec}}{H_0^{ЧНД}}, \quad (22)$$

где  $\Delta H_{ec}$  – потеря с выходной скоростью, кДж/кг:

$$\Delta H_{ec} = \frac{10^{-3}}{2} \cdot \left( \frac{G_k \cdot v_k}{i \cdot \Omega} \right)^2 \cdot \left( 1 + \frac{0,1}{\theta - 1} \right),$$

где  $i$  – Число потоков пара на выходе из турбины;

$$\theta = \frac{d_2}{l_2};$$

$\Omega = \pi \cdot d_2 \cdot l_2$  – площадь, ометаемая рабочими лопатками последней ступени, м<sup>2</sup>.

Полезно использованный теплоперепад ЧНД, кДж/кг:

$$H_i^{ЧНД} = H_0^{ЧНД} \cdot \eta_{oi}^{ЧНД}. \quad (23)$$

Определяем точку начала процесса расширения ЧНД:

$$h_2^{ЧНД} = h_2^{ЧСД} - H_i^{ЧНД}. \quad (24)$$

Построив процесс расширения, производим расчёт принципиальной тепловой схемы. Для унификации расчёта оставим расчёт тепловой схемы за кадром, вынеся лишь доли отбираемого пара.

Определяем приведённый теплоперепад, кДж/кг:

$$\bar{H}_i = \sum_k H_{ik} \cdot (1 - \sum \alpha_{k-1}), \quad (25)$$

где  $\alpha$  – доля отбираемого пара.

Расчётное значение расхода пара, кг/с:

$$G = \frac{N_g}{\bar{H}_i \cdot \eta_m \cdot \eta_{сз}}. \quad (26)$$

Следующим этапом производится детальный расчёт ступеней. Последовательность детального расчёта приведена на примере регулирующей ступени.

### 2.1.3 Детальный расчёт регулирующей ступени

Таблица 3 – Нерасчётные параметры регулирующей ступени

Параметр	Обозначение	Значение
Тип ступени		Одновенечная
Располагаемый теплоперепад, кДж/кг	$h_0^{pc}$	100
Характеристическое отношение скоростей	$(U / C_a)_{opt}$	0,43

Фиктивная скорость, м/с:

$$C_a = \sqrt{2 \cdot h_0^{pc} \cdot 10^3} \quad (27)$$

Окружная скорость, м/с:

$$U = C_a \cdot (U / C_a)_{opt} \quad (28)$$

Средний диаметр ступени, м:

$$d_{cp}^{pc} = \frac{60 \cdot U}{\pi \cdot n}, \quad (29)$$

где  $n = 3000$  – частота вращения ротора, об/мин. Тогда:  
Теплоперепад сопловой решётки, кДж/кг:

$$h_{0c}^{pc} = (1 - \rho_m) \cdot h_0^{pc}, \quad (30)$$

где  $\rho_m = 0,07$  – степень реактивности регулирующей ступени [5, с. 13];  
 $h_0^{pc} = 100$  – см. таблицу 3. Тогда:  
Абсолютная теоретическая скорость истечения из сопел, м/с:

$$C_{1t} = \sqrt{2 \cdot h_{0c}^{pc} \cdot 10^3}. \quad (31)$$

Проходная площадь сопловой решётки, м<sup>2</sup>:

$$F_1 = \frac{G' \cdot V_{1t}^{pc}}{\mu_1 \cdot C_{1t}}, \quad (32)$$

где  $G$  – расход пара на турбину, кг/с;  
 $V_{lt}^{pc}$  – удельный объём пара за сопловой решёткой регулирующей ступени,  
 м<sup>3</sup>/кг;

$\mu_1 = 0,97$  – коэффициент расхода сопловой решётки.

Определяем высоты лопаток. Для этого необходимо определить произведение степени парциальности и высоты сопловых решёток:

$$el_1 = \frac{F_1}{\pi \cdot d_{pc} \cdot \sin(\alpha_1^{\text{эф}})},$$

где  $d_{pc} = 1,019$  – средний диаметр регулирующей ступени, м;  
 $\alpha_1^{\text{эф}} = 12$  – эффективный угол сопловой решётки, град. [5, с. 14].  
 Тогда степень парциальности находится следующим образом:

$$e_{opt} = a \cdot \sqrt{el_1 \cdot 100}, \quad (33)$$

где  $a = 0,5$ . Тогда:

Высота сопловых лопаток находится по формуле, м:

$$l_1 = \frac{el_1}{e_{opt}}. \quad (34)$$

Располагаемый теплоперепад ступени от параметров торможения равен  $h_0^{pc} = 100$  кДж/кг. Окружная скорость на среднем диаметре, м/с:

$$U = \frac{\pi \cdot d_{cp}^{pc} \cdot n}{60}, \quad (35)$$

где  $n = 3000$  – частота вращения ротора, об/мин;

$d_{cp}^{pc}$  – диаметр последней ступени, м.

Располагаемые теплоперепады в сопловой и рабочей решётках, кДж/кг:

$$h_{0c}^{pc} = (1 - \rho_m) \cdot h_0^{pc}; \quad (36)$$

$$h_{0л}^{pc} = \rho_m^{pc} \cdot h_0^{pc}, \quad (37)$$

где  $\rho_m = 0,07$  – степень реактивности регулирующей ступени [1, с. 13];

$h_0^{pc} = 100$  кДж/кг – см. таблицу 3. Тогда:

Теоретическая абсолютная скорость выхода из сопловой решётки равна, м/с (9):



$$C_{1t} = \sqrt{2 \cdot h_{0c}^{pc} \cdot 10^3}. \quad (38)$$

Скорость звука в потоке пара за сопловой решёткой, м/с:

$$a_1 = \sqrt{k \cdot P_1 \cdot V_{1t} \cdot 10^6}, \quad (39)$$

где  $k = 1,3$  – показатель адиабаты для перегретого пара.  
Число Маха сопловой решётки:

$$M_{1t} = \frac{C_{1t}}{a_1}, \quad (40)$$

где  $C_{1t}$  = м/с – см. формулу (38).  
Выходная площадь сопловой решётки предварительная, м<sup>2</sup>:

$$F_1^{pc} = \frac{G \cdot V_{1t}}{\mu_1 \cdot C_{1t}}, \quad (41)$$

где  $G$  – расход пара на турбину, кг/с;  
 $\mu_1$  – коэффициенты скорости сопловой решётки;  
 $V_{1t}$  – удельный объём пара за сопловой решёткой последней ступени ЧНД, м<sup>3</sup>/кг;  
 $C_{1t}$  – см. формулу (38).

Угол выхода потока из сопловой решётки, град.:

$$\angle \alpha_{1\text{эф}}^{pc} = \arcsin \frac{F_1^{pc}}{\pi \cdot d_{cp}^{pc} \cdot e^{opt} \cdot l_1^{pc}}, \quad (42)$$

где  $d_{cp}^{pc}$  – диаметр регулирующей ступени, м;  
 $l_1^{pc}$  – высота сопловых лопаток последней ступени, м;  
 $e^{opt}$  – оптимальная степень парциальности регулирующей ступени.  
Уточняем коэффициент расхода сопловой решётки (формула для перегретого пара):

$$\mu_1 = 0,982 - 0,005 \cdot \frac{b_1^{pc}}{l_1^{pc}}, \quad (43)$$

где  $b_1^{pc}$  – хорда сопловой лопатки, м, определяется по соотношению высоты и ширины лопатки из чертежа прототипа.

Зная угол выхода потока из сопловой решётки, выбираем профиль сопловых лопаток: С-90-12А [5, с. 108].

Определяется коэффициент скорости сопловой решётки:

$$\varphi = 0,98 - 0,009 \cdot \frac{b_1^{pc}}{l_1^{pc}}. \quad (44)$$

Действительная абсолютная скорость выхода из сопел, м/с:

$$C_1 = \varphi \cdot C_{1r}, \quad (45)$$

где  $C_{1r}$  – см. формулу (38).

Так как  $M_{1r} < 1$ , отклонения в косом срезе не происходит и:  $\angle \alpha_1^{pc} = \angle \alpha_{1\phi}^{pc}$ .

Шаг сопловых лопаток, м:

$$t_1 = \bar{t}_{opt} \cdot b_1^{pc}, \quad (46)$$

где  $\bar{t}_{opt} = 0,8$  – оптимальный шаг сопловых лопаток [5, с.108].

Число сопловых лопаток:

$$z_1 = \frac{\pi \cdot d_{cp}^{pc} \cdot e_{opt}}{t_1}, \quad (47)$$

где  $d_{cp}^{pc}$  – диаметр регулирующей ступени, м (см. формулу (29));

$e_{opt}$  – оптимальная степень парциальности регулирующей ступени (см. формулу (33)).

Относительная скорость пара на входе в рабочую решётку, м/с:

$$W_1 = \sqrt{C_1^2 + U^2 - 2 \cdot U^2 \cdot C_1 \cdot \cos \alpha_{1\phi}^{pc}}, \quad (48)$$

где  $U$  – см. формулу (35);

$C_1$  – см. формулу (45);

$\angle \alpha_1^{pc}$  – см. формулу (42).

Угол входа в рабочую решётку, град:

$$\beta_1^{pc} = \arctg \frac{C_1 \cdot \sin \alpha_1^{pc}}{C_1 \cdot \cos \alpha_1^{pc} - U}, \quad (49)$$

где  $U$  – см. формулу (35);

$C_1$  – см. формулу (45);

$\angle \alpha_1^{pc}$  – см. формулу (42).

Потеря энергии в сопловой решётке, кДж/кг:

$$\Delta h_c = \frac{C_{1t}^2}{2000} \cdot (1 - \varphi^2), \quad (50)$$

где  $C_{1t}$  – см. формулу (38).

$\varphi$  – коэффициент скорости сопловой решётки (см. формулу (44)).

Теоретическая относительная скорость выхода из рабочей решётки, м/с:

$$W_{2t} = \sqrt{2 \cdot h_{0,l}^{pc} \cdot 10^3 + W_1^2}, \quad (51)$$

где  $W_1$  – см. формулу (48);

$h_{0,l}^{pc}$  – см. формулу (37).

Скорость звука рабочей решётки, м/с:

$$a_2 = \sqrt{k \cdot P_2 \cdot V_{2t} \cdot 10^6}, \quad (52)$$

где  $k = 1,3$  – показатель адиабаты для перегретого пара;

$P_2$  – давление за регулирующей ступенью, МПа;

$V_{2t}$  – удельный объём пара за регулирующей ступенью.

Число Маха рабочей решётки:

$$M_{2t} = \frac{W_{2t}}{a_2}, \quad (53)$$

где  $W_{2t}$  – см. формулу (50);

$a_2$  – см. формулу (52).

Высота рабочих лопаток, м:

$$l_2^{pc} = l_1^{pc} + \Delta, \quad (54)$$

где  $l_1^{pc}$  – высота сопловых лопаток последней ступени, м (см. формулу (34));

$\Delta = 0,003$  – перекрыша, м.

Коэффициент расхода рабочей решётки:

$$\mu_2 = 0,965 - 0,015 \cdot \frac{b_2^{pc}}{l_2^{pc}}, \quad (55)$$

где  $b_2^{pc}$  – хорда рабочей лопатки, м, определяется по соотношению высоты и ширины лопатки из чертежа прототипа.

Выходная площадь рабочей решётки, м<sup>2</sup>:

$$F_2^{pc} = \frac{G \cdot V_{2t}}{\mu_2 \cdot W_{2t}}, \quad (56)$$

где  $G$  – расход пара на турбину, кг/с (см. формулу (27));  
 $V_{2t}$  – удельный объём пара за регулирующей ступенью.  
 $W_{2t}$  – см. формулу (51).

Угол выхода потока из рабочей решётки, град.:

$$\angle \beta_{2\text{эф}}^{pc} = \arcsin \frac{F_2^{pc}}{\pi \cdot d_{cp}^{pc} \cdot e^{opt} \cdot l_2^{pc}}, \quad (57)$$

где  $d_{cp}^{pc}$  – диаметр регулирующей ступени, м (см. формулу (29));  
 $l_2^{pc}$  – высота рабочих лопаток последней ступени, м (см. формулу (34));  
 $e^{opt}$  – оптимальная степень парциальности регулирующей ступени (см. формулу (33)).

Зная угол выхода потока из рабочей решётки, выбираем профиль рабочих лопаток: Р-23-14А [5, с. 108].

Определяется коэффициент скорости рабочей решётки:

$$\psi = 0,957 - 0,011 \cdot \frac{b_2^{pc}}{l_2^{pc}}. \quad (58)$$

Действительная абсолютная скорость выхода из сопел, м/с:

$$W_2 = \psi \cdot W_{2t}, \quad (59)$$

где  $W_{2t}$  – см. формулу (51).

Абсолютная скорость выхода из ступени, м/с:

$$C_2 = \sqrt{W_2^2 + U^2 - 2 \cdot U \cdot W_2 \cdot \cos \beta_{2\text{эф}}^{pc}}, \quad (60)$$

где  $U$  – см. формулу (35).

Угол выхода потока из ступени, град:

$$\angle \alpha_2^{pc} = \arctg \frac{W_2 \cdot \sin \beta_{2\text{эф}}^{pc}}{W_2 \cdot \cos \beta_{2\text{эф}}^{pc} - U}, \quad (61)$$

где  $U$  – см. формулу (35);  
 $\angle \beta_{2\text{эф}}^{pc}$  – см. формулу (57);  
 $W_2$  – см. формулу (59).

Шаг сопловых лопаток, м:

$$t_2 = \bar{t}_{opt} \cdot b_2^{pc}, \quad (62)$$

где  $\bar{t}_{opt} = 0,7$  – оптимальный шаг сопловых лопаток [5, с.108];

$b_2^{pc}$  – ширина рабочих лопаток, м.

Число сопловых лопаток:

$$z_2 = \frac{\pi \cdot d_{cp}^{pc}}{t_2}, \quad (63)$$

где  $d_{cp}^{pc}$  – диаметр последней ступени, м (см. формулу (29)).

Округляем полученное число до большего целого и уточняем значение шага:

$$t_2 = \frac{\pi \cdot d_{cp}^{pc}}{z_2}.$$

По результатам расчёта строятся треугольники скоростей для регулирующей ступени.

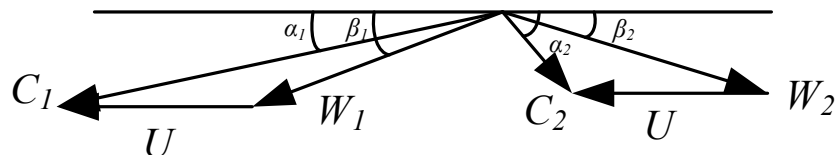


Рисунок 10 – Треугольники скоростей регулирующей ступени

Потеря энергии в рабочей решётке, кДж/кг:

$$\Delta h_{rl} = \frac{W_{2t}^2}{2000} \cdot (1 - \psi^2), \quad (64)$$

где  $W_{2t}$  – см. формулу (51);

$\psi$  – см. формулу (58).

Потеря с выходной скоростью, кДж/кг:

$$\Delta h_{ec} = \frac{C_2^2}{2000}, \quad (65)$$

где  $C_2$  – см. формулу (60).

Располагаемая энергия ступени, кДж/кг:

$$E_0 = h_0^{pc} - \chi_2 \cdot \Delta h_{\text{вс}}, \quad (66)$$

где  $\chi_2 = 0$  – для регулирующей ступени [5, с. 52].

$$h_0^{pc} = 100 \text{ кДж/кг}.$$

Относительный лопаточный КПД:

$$\eta_{\text{ол}} = \frac{E_0 - \Delta h_c - \Delta h_l - (1 - \chi_2) \cdot \Delta h_{\text{вс}}}{E_0}, \quad (67)$$

$$\eta_{\text{ол}} = \frac{U \cdot (W_1 \cos \beta_1^{pc} + W_2 \cos \beta_{2\text{эф}}^{pc})}{E_0 \cdot 1000}, \quad (68)$$

где  $E_0$  – см. формулу (66);

$\Delta h_{\text{вс}}$  – см. формулу (65);

$\Delta h_l$  – см. формулу (64);

$\Delta h_c$  – см. формулу (50);

$U$  – см. формулу (38);

$\angle \beta_{2\text{эф}}^{pc}$  – см. формулу (57);

$\angle \beta_1^{pc}$  – см. формулу (49);

$W_2$  – см. формулу (59);

$W_1$  – см. формулу (48).

Поскольку разница между полученными значениями менее 1,5%, расчёт можно считать верным.

Далее необходимо определить внутренний относительный КПД ступени. Для это нужно определить все потери в проточной части ступени.

Коэффициент потерь от трения боковых поверхностей рабочего колеса в паровой среде:

$$\xi_{\text{тр}} = K_{\text{тр}} \cdot \frac{d_{\text{ср}}^{pc2}}{F_1^{pc}} \cdot \left( \frac{U}{C_a} \right)^3, \quad (69)$$

где  $U$  – см. формулу (38);

$F_1^{pc}$  – см. формулу (41);

$(U / C_a)_{\text{opt}}$  – оптимальное отношение скоростей;

$d_{\text{ср}}^{pc}$  – диаметр последней ступени, м (см. формулу (29));

$K_{\text{тр}} = 0,45 \cdot 10^{-3}$  – коэффициент трения [5, с. 53].

Потери от трения, кДж/кг:

$$\Delta h_{mp} = \xi_{mp} \cdot E_0, \quad (70)$$

где  $E_0$  – см. формулу (66).

Коэффициент потерь от парциального подвода пара:

$$\xi_{наrc} = \frac{k_g}{\sin \alpha_{1\phi}^{pc}} \cdot \frac{1 - e_{opt} - 0,5 \cdot e_{кож}}{e_{opt}} \cdot \left( \frac{U}{C_a} \right)^3 + k_{сезм} \cdot \frac{B_2^{pc} \cdot l_2^{pc}}{F_1^{pc}} \cdot \frac{U}{C_a} \cdot i \cdot \eta_{ол}, \quad (71)$$

где  $k_g = 0,065$ ;

$k_{сезм} = 0,25$ ;

$\eta_{ол}$  – см. формулу (67);

$B_2^{pc}$  – ширина рабочих лопаток, м;

$l_2^{pc}$  – высота рабочих лопаток последней ступени, м (см. формулу (34));

$e_{opt}$  – оптимальная степень парциальности регулирующей ступени (см. формулу (33)).

$i$  – число сопловых сегментов для регулирующей ступени [5, с. 53].

$e_{кож} = 0,8 \cdot (1 - e_{opt})$  – доля окружности рабочего колеса, закрытая противовентиляционным кожухом.

$F_1^{pc}$  – см. формулу (41);

$\angle \alpha_1^{pc}$  – см. формулу (42).

Потери от парциального подвода, кДж/кг:

$$\Delta h_{наrc} = \xi_{наrc} \cdot E_0, \quad (72)$$

где  $E_0$  – см. формулу (66).

Коэффициент потерь от протечек через бандажные уплотнения поверх рабочих лопаток:

$$\xi_{БВ} = \frac{\pi \cdot d_n^{pc} \cdot \delta_{экв}}{F_1^{pc}} \cdot \sqrt{\rho_m^{pc} + 1,8 \frac{l_1^{pc}}{d_{cp}^{pc}} \cdot \eta_{ол}}, \quad (73)$$

где  $d_{cp}^{pc}$  – диаметр последней ступени, м (см. формулу (29));

$d_n^{pc} = d_{cp}^{pc} + l_2^{pc}$  – периферийный диаметр рабочего колеса, м;

$F_1^{pc}$  – см. формулу (41);

$\rho_m^{pc}$  – степень реактивности регулирующей ступени (см. формулу (36));

$\eta_{ол}$  – см. формулу (67);

$l_1^{pc}$  – высота сопловых лопаток последней ступени, м (см. формулу (34)).

$\delta_{экв}$  – эквивалентный зазор, м. Определяется как:

$$\delta_{\text{экв}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{4}{\delta_a^2} + \frac{1,5 \cdot z}{\delta_r^2}}}, \quad (74)$$

где  $\delta_r = 0,8 \cdot 10^{-3}$  – радиальный зазор, м;  
 $\delta_a = 5 \cdot 10^{-3}$  – осевой зазор, м;  
 $z = 2$  – число гребней уплотнений. Тогда:

$$\delta_{\text{экв}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{4}{(5 \cdot 10^{-3})^2} + \frac{1,5 \cdot 2}{(0,8 \cdot 10^{-3})^2}}} = 0,00045 \text{ м};$$

Потеря от утечек, кДж/кг:

$$\Delta h_{\text{ут}} = \xi_{\text{БУ}} \cdot E_0, \quad (75)$$

где  $E_0$  – см. формулу (66).

Полезно использованный теплоперепад ступени, кДж/кг:

$$h_i = E_0 - \Delta h_c - \Delta h_l - \Delta h_{\text{вс}} - \Delta h_{\text{тр}} - \Delta h_{\text{парц}} - \Delta h_{\text{ут}}, \quad (76)$$

где  $E_0$  – см. формулу (66);

$\Delta h_{\text{вс}}$  – см. формулу (65);

$\Delta h_l$  – см. формулу (64);

$\Delta h_c$  – см. формулу (50);

$\Delta h_{\text{тр}}$  – см. формулу (70);

$\Delta h_{\text{парц}}$  – см. формулу (72);

$\Delta h_{\text{ут}}$  – см. формулу (75).

Внутренний относительный КПД:

$$\eta_{oi} = \frac{h_i}{E_0}. \quad (77)$$

Внутренняя мощность ступени, кВт:

$$N_i^{\text{pc}} = G \cdot h_i, \quad (78)$$

где  $G$  – расход пара на турбину, кг/с (см. формулу (26)).



По итогу расчётной части был сформирован расчётный макет в среде Microsoft Excel. Данный макет является обобщением всех расчётных операций в одном файле, иными словами от пользователя требуется лишь ввести исходные данные для расчёта (рисунок 11), тогда как весь расчёт в указанном выше объёме производится автоматически в среде Microsoft Excel. Результатами расчёта являются геометрические характеристики элементов проточной части ЦВД и величина возникающих нагрузок (рисунок 12).

▲	A	B	C	D	E	F
1		Параметр	Обозначение	Формула	Величина	Ед. изм
2		<b>1. Исходные данные</b>				
3		Номинальная электрическая мощность	$N_2$		350000	кВт
4		Частота вращения	$n$		50	Гц
5		Давление пара перед турбиной	$P_0$		23,5	МПа
6		Температура пара перед турбиной	$t_0$		560	°С
7		Давление отработавшего пара	$P_k$		0,00343	МПа
8		Температура питательной воды	$t_{нс}$		262	°С

Рисунок 11 – Блок ввода исходных данных

Параметр	обозначение	значение	ед. изм		№ ступени	$d_{cp}$	$r_{cp}$	$r_k$	$l_2$	$b_2$	$z_2$	$360/(z_2 * 2)$	$\beta_1$	$\beta_2$
<b>Регулирующая ступень. Рабочая решётка</b>														
Средний диаметр регулирующей ступени	$d_{cp}^{pc}$	1220	мм		1	1100	550	534,42	31,2	25,7	168	1,07	-1,07	19,46
Средний радиус регулирующей ступени	$r_{cp}^{pc}$	610	мм		2	1102,09	551,05	534,42	33,3	25,7	168	1,07	-1,07	19,46
Корневой радиус	$r_k^{pc}$	596,80	мм		3	1104,19	552,09	534,42	35,3	25,7	169	1,07	-1,07	19,46
Высота рабочих лопаток	$l_2$	26,41	мм		4	1106,28	553,14	534,42	37,4	25,7	169	1,07	-1,07	19,46
Хорда рабочей решётки	$b_2$	51,4	мм		5	1108,37	554,19	534,42	39,5	25,7	169	1,07	-1,07	19,46
Число рабочих лопаток	$z_2$	186	шт		6	1110,47	555,23	534,42	41,6	25,7	170	1,06	-1,06	19,46
Угол вращения	$360/(z_2 * 2)$	0,97	град		7	1112,56	556,28	534,42	43,7	25,7	0	#ДЕЛО!	#ДЕЛО!	19,46
Угол входа в рабочую решетку	$\beta_1$	22,48	град		8	1114,65	557,33	534,42	45,8	25,7	0	#ДЕЛО!	#ДЕЛО!	19,46
Угол выхода из рабочей решетки	$\beta_2$	20,76	град		9	1116,75	558,37	534,42	47,9	25,7	0	#ДЕЛО!	#ДЕЛО!	19,46
Осевая составляющая усилия на лопатки	$R_a^l$	28875,37	Н	Число ступеней	10	1118,84	559,42	534,42	50,0	25,7	0	#ДЕЛО!	#ДЕЛО!	19,46
					6									

Рисунок 12 – Блок вывода результатов детального расчёта

## 2.2 Построение параметризованной трёхмерной модели

Рассмотрим создание автоматизированных трёхмерных моделей на примере регулирующей ступени. Первым делом необходимо создать эскиз, выбрав необходимую плоскость. Во вкладке «Исходная (модель)» выбираем «Эскиз» (рисунок 13). В области «Плоскость эскиза» выбираем необходимую плоскость (рисунок 14). Подтверждаем выбор нажатием «ОК».

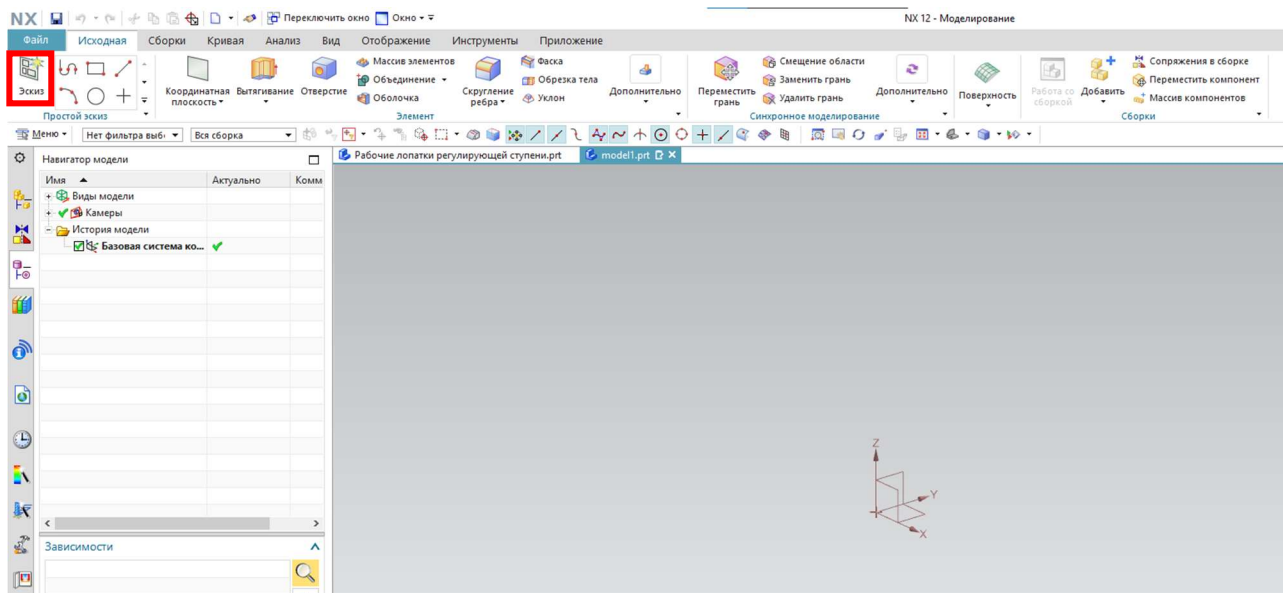


Рисунок 13 – Создание эскиза

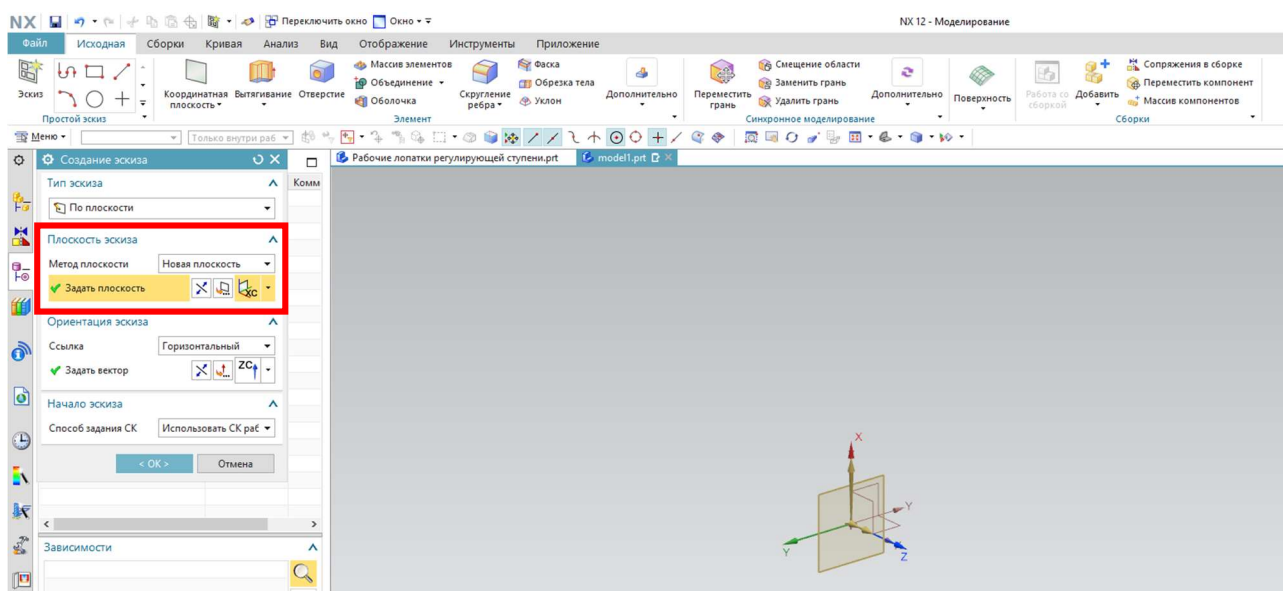


Рисунок 14 – Выбор плоскости

Далее строится эскиз хвостовика лопатки на расстоянии от оси ступени равно корневому радиусу. При построении геометрии эскиз будет автоматически заполняться нефиксированными размерами (рисунок 15). Чтобы сделать размер управляющим, необходимо выбрать его двойным нажатием. Как видно на рисунке 16 после выделения размера появляется окно редактирования размера. В левой части можно присвоить размеру имя, для этого допускается использование символов как латиницы, так и кириллицы, без пробелов. В левой части задаётся значение. Оно может быть представлено в виде числа, формулы или функции.

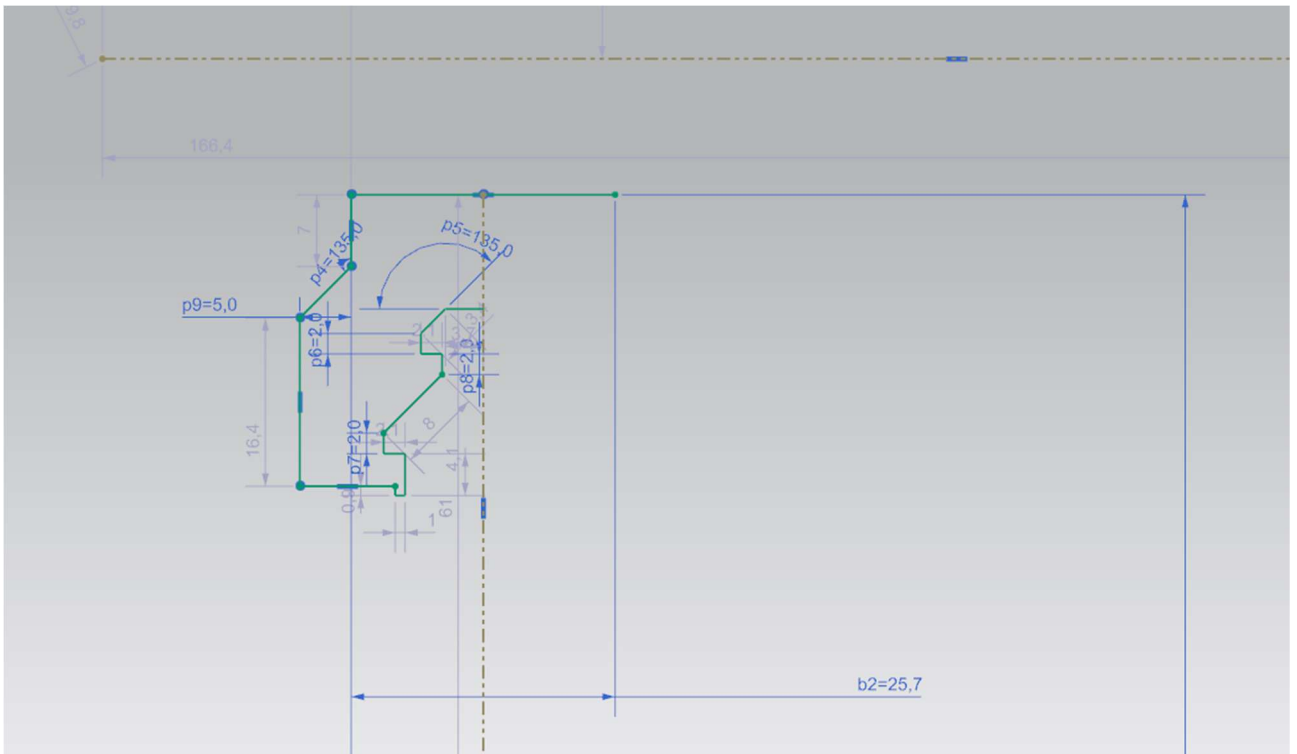


Рисунок 15 – Нефиксированные размеры (бледными линиями)

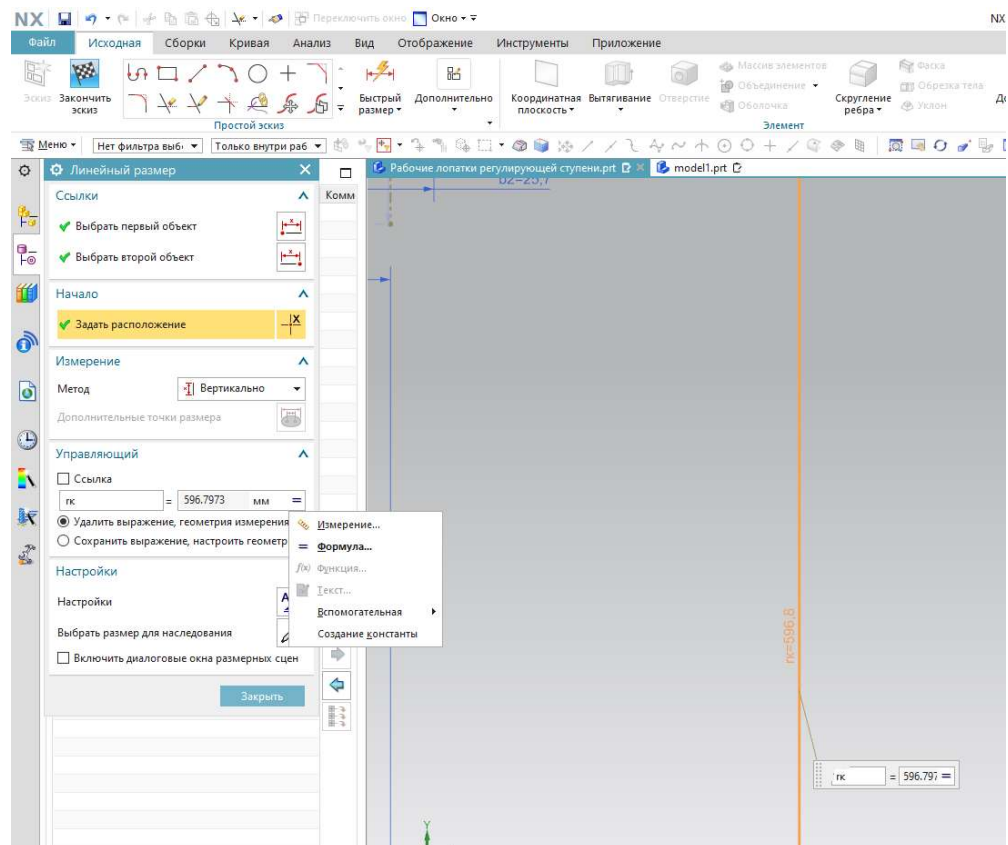


Рисунок 16 – Редактирование размера

Стоит подробнее остановиться на задании размера через выражение: формулу или функцию. Выбрав во всплывающем перечне «Формулу», записываем в строку необходимое выражение в численном или буквенном виде (рисунок 17).

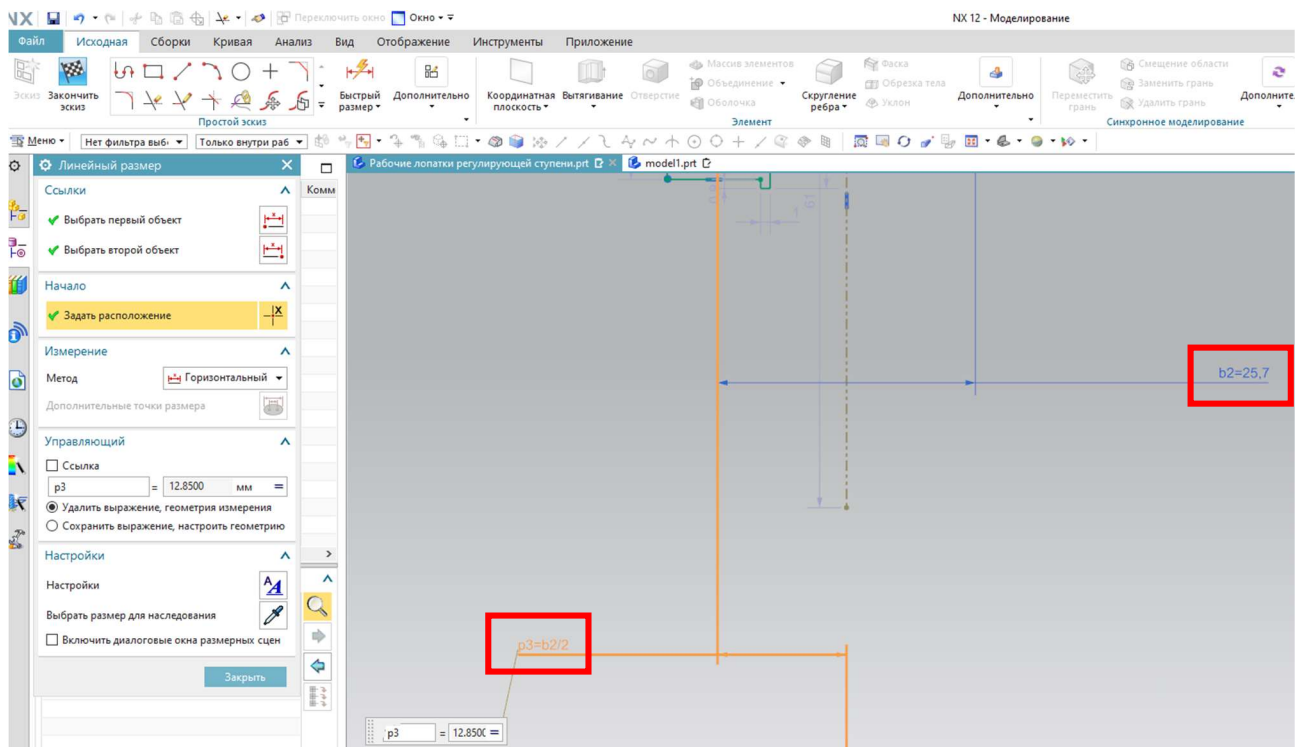


Рисунок 17 – Задание размера через формулу

Важным этапом создание автоматизированной 3D-модели является привязка размеров к расчёту в Excel. Для этого предусмотрено задание размера через функцию. Во всплывающем перечне выбираем «Функцию» (рисунок 18). В появившемся окне выбираем категорию «spreadsheet» (рисунок 19), из предложенного ряда выбираем функцию «ug excel read» (рисунок 20). В открывшемся окне «Аргумент функции» задаём путь к файлу расчёта, откуда будут браться результаты расчёта, и ссылку на ячейку (рисунок 21). По определению программа будет ссылаться на активный (открытый) лист выбранного файла. Чтобы задать ссылку на определённый лист перед номером ячейки вписывается наименование листа, например, «Лист1!С6».

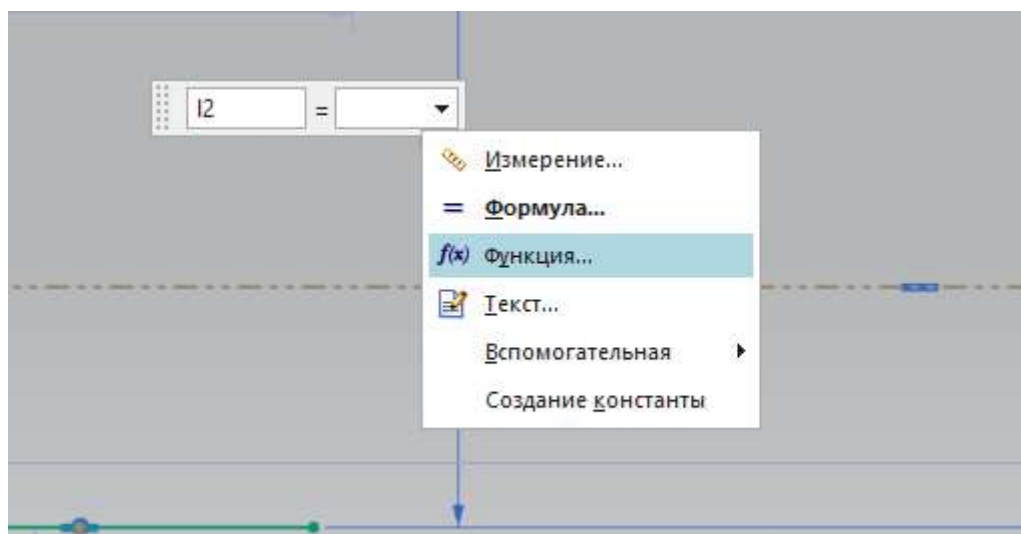


Рисунок 18 – Выбор выражения

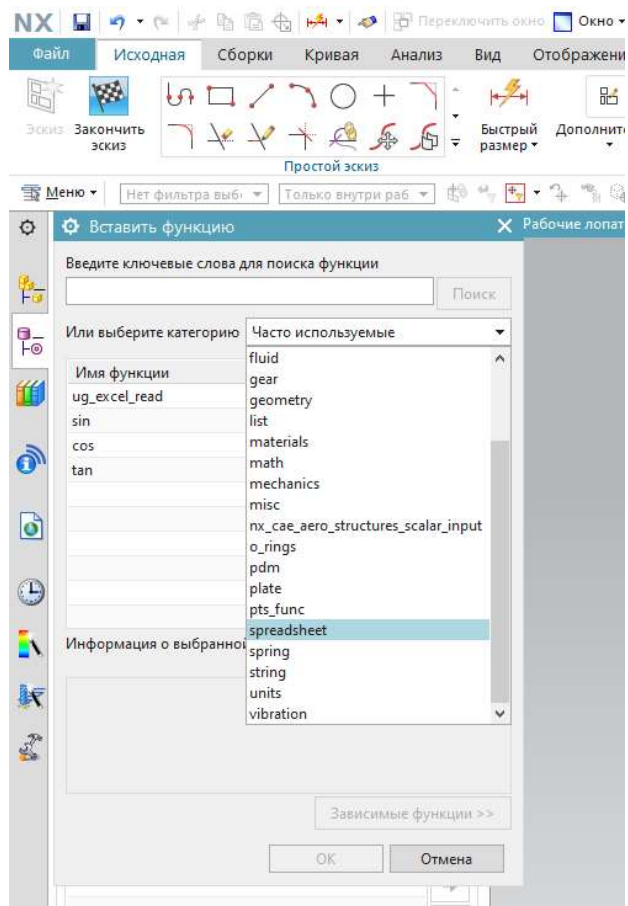


Рисунок 19 – Выбор категории функции

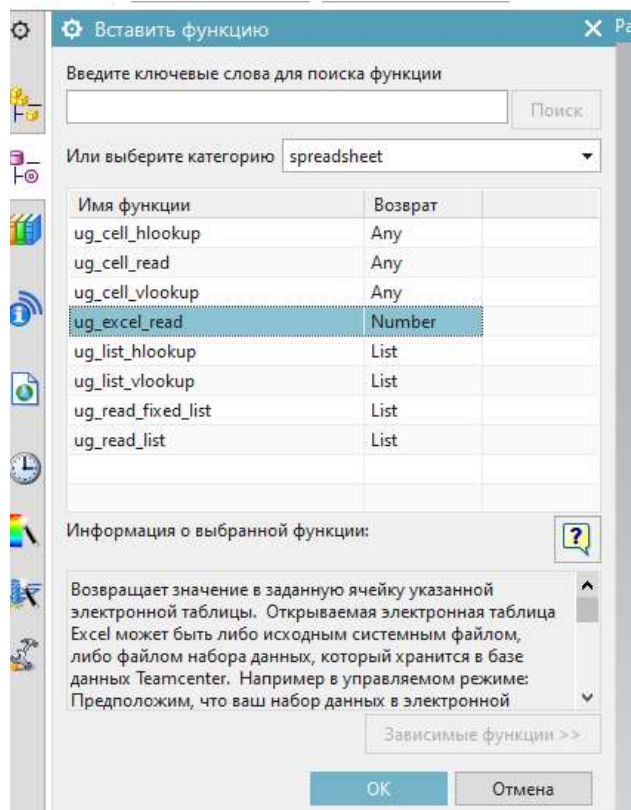


Рисунок 20 – Выбор функции



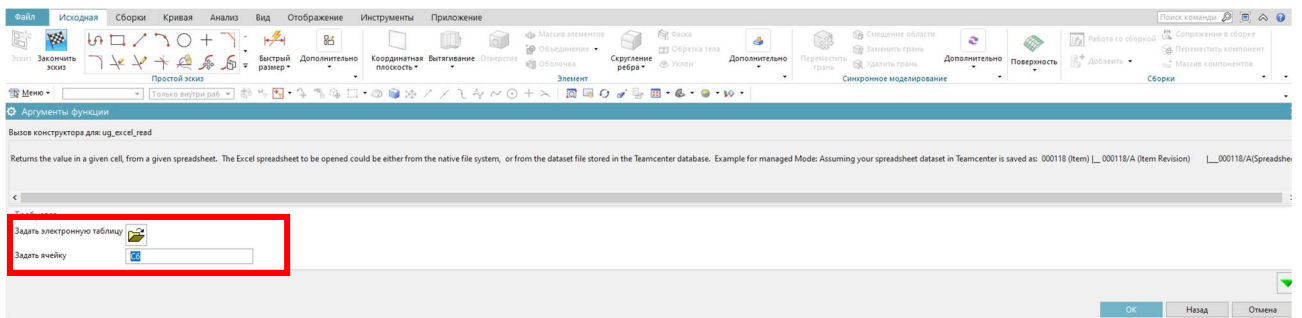


Рисунок 21 – Аргумент функции

Помимо управляющих размеров эскиз следует определить при помощи ограничений (взаимосвязей). Во вкладке «Исходная» выбираем «Дополнительно». Во всплывающем окне выбираем «Геометрические ограничения» (рисунок 22).

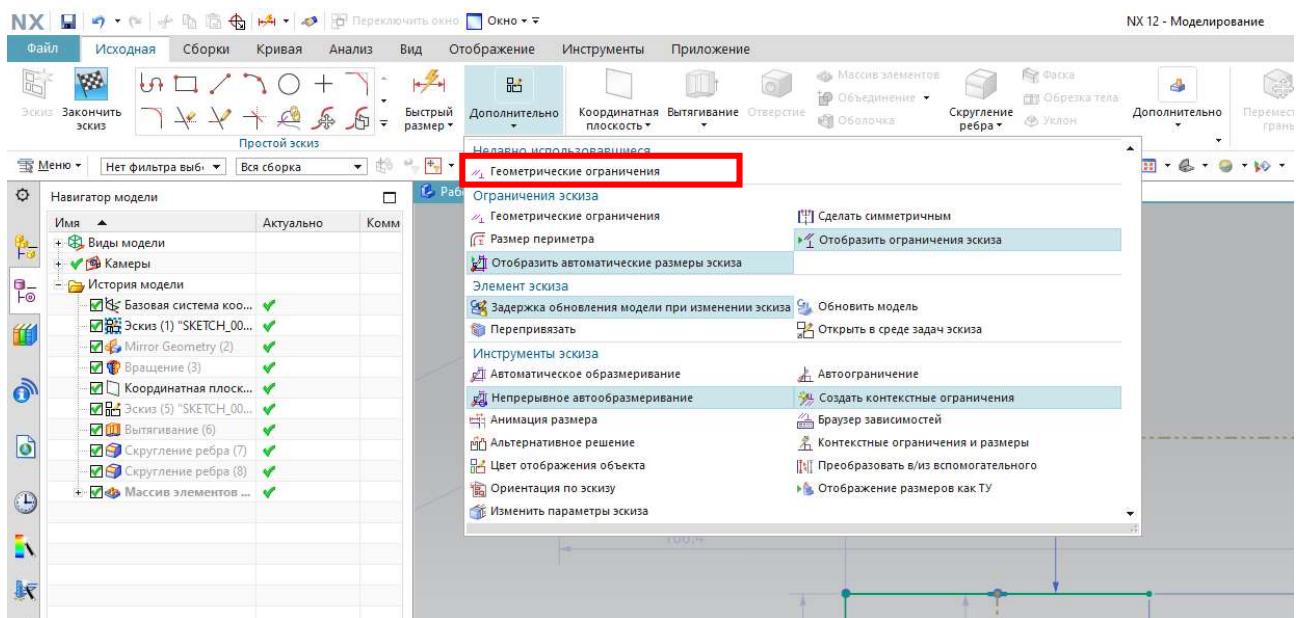


Рисунок 22 – Геометрические ограничения

Построив эскиз хвостовика и бандажа, произведём вытягивание вращением. Для этого во вкладке «Исходная» выбираем «Вращение» (рисунок 21). В появившемся окне указываем контура будущего хвостовика и бандажа, ось вращения (ось вала), задаём угол поворота с помощью «функции», в оба направления на величину, равную  $\pm \frac{360}{z_2 \cdot 2}$  (рисунок 23) для упрощения ориентации модели относительно оси координат.

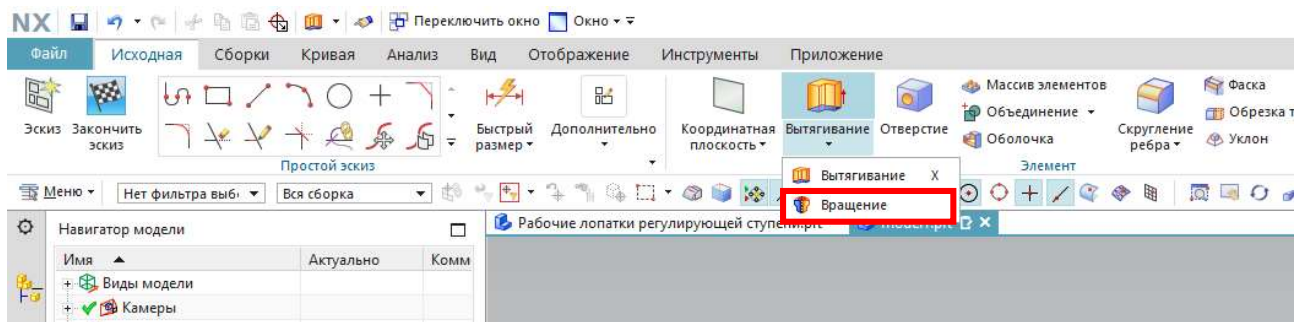


Рисунок 23 – Вращение

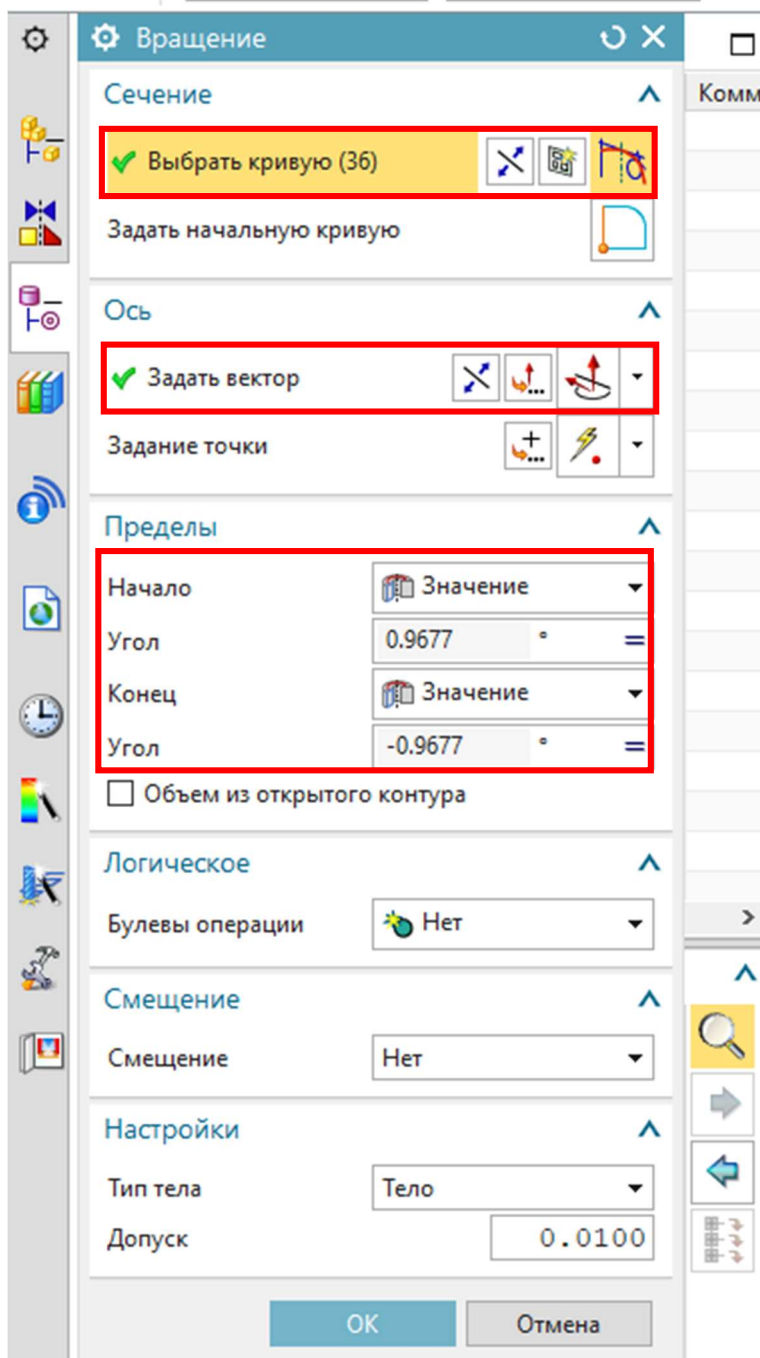


Рисунок 24 – Параметры вращения

Приступаем к построению рабочей лопатки. Для этого создадим плоскость на расстоянии от оси вращения, равном корневому радиусу ступени (рисунки 25-26).

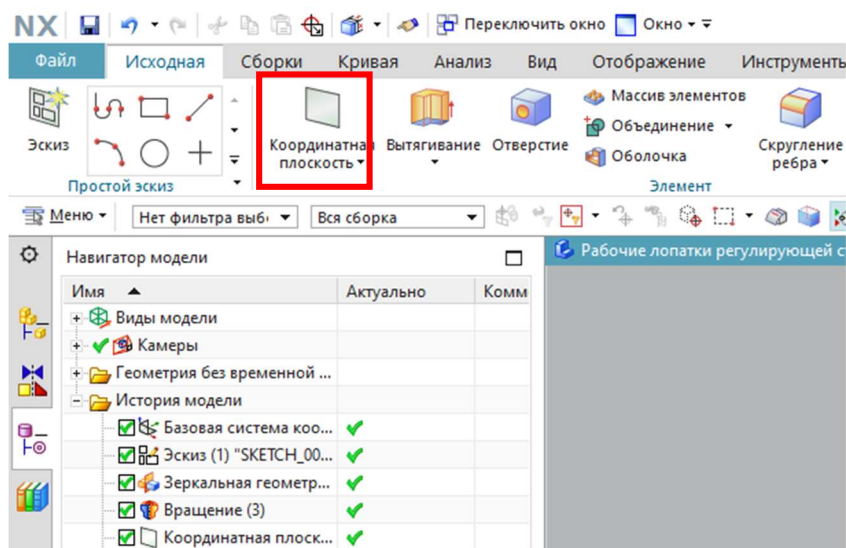


Рисунок 25 – Координатная плоскость

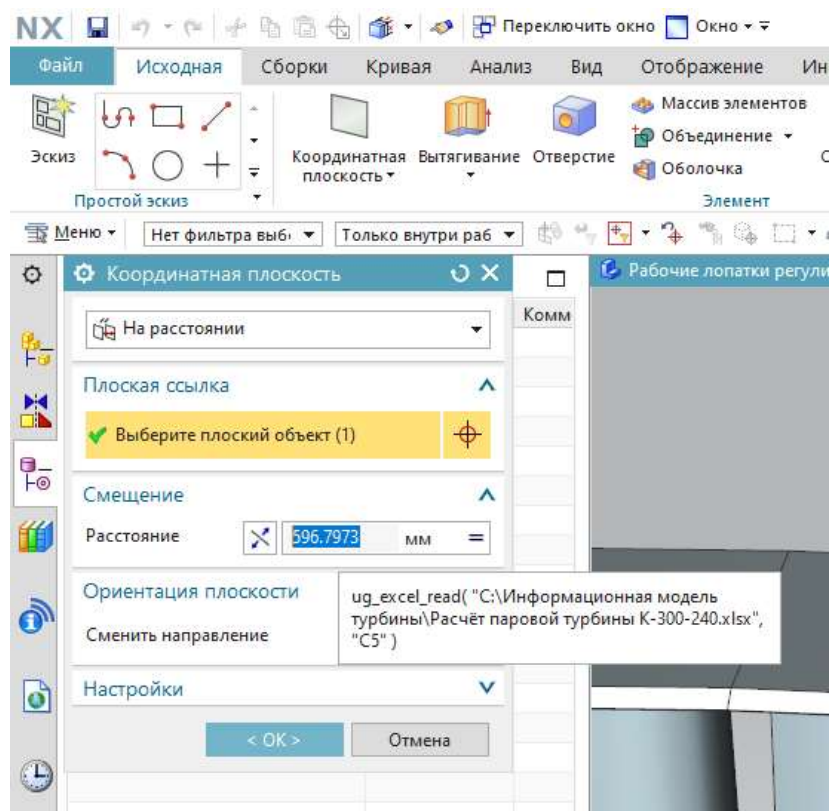


Рисунок 26 – Параметры плоскости

Выбрав данную плоскость в дереве модели, создаём при помощи сплайнов эскиз профиля рабочей лопатки. Последовательность и принцип создания чертежей были описаны ранее.



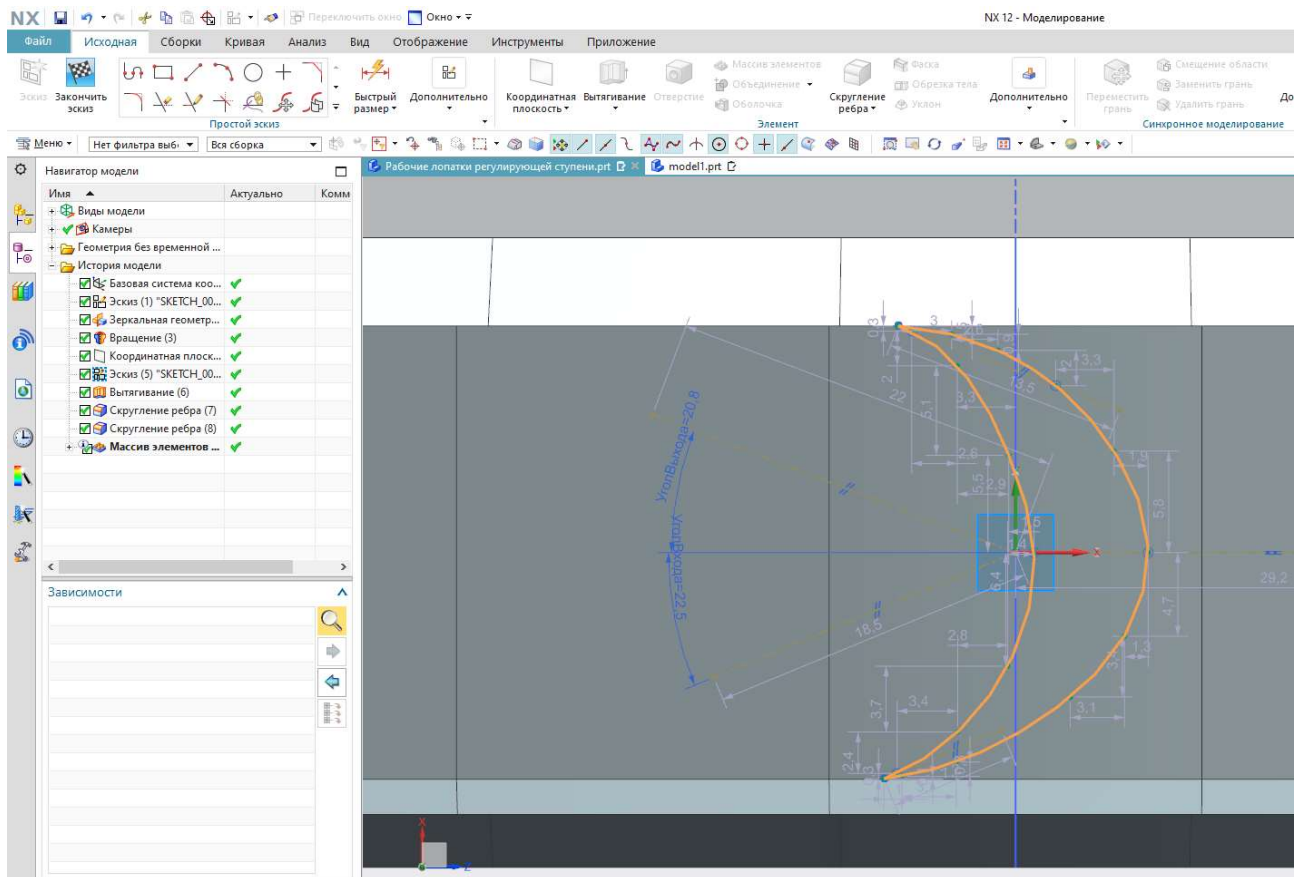


Рисунок 27 – Профиль рабочей лопатки

Далее выдавливаем получившийся эскиз на расстояние, равное высоте рабочей лопатки.

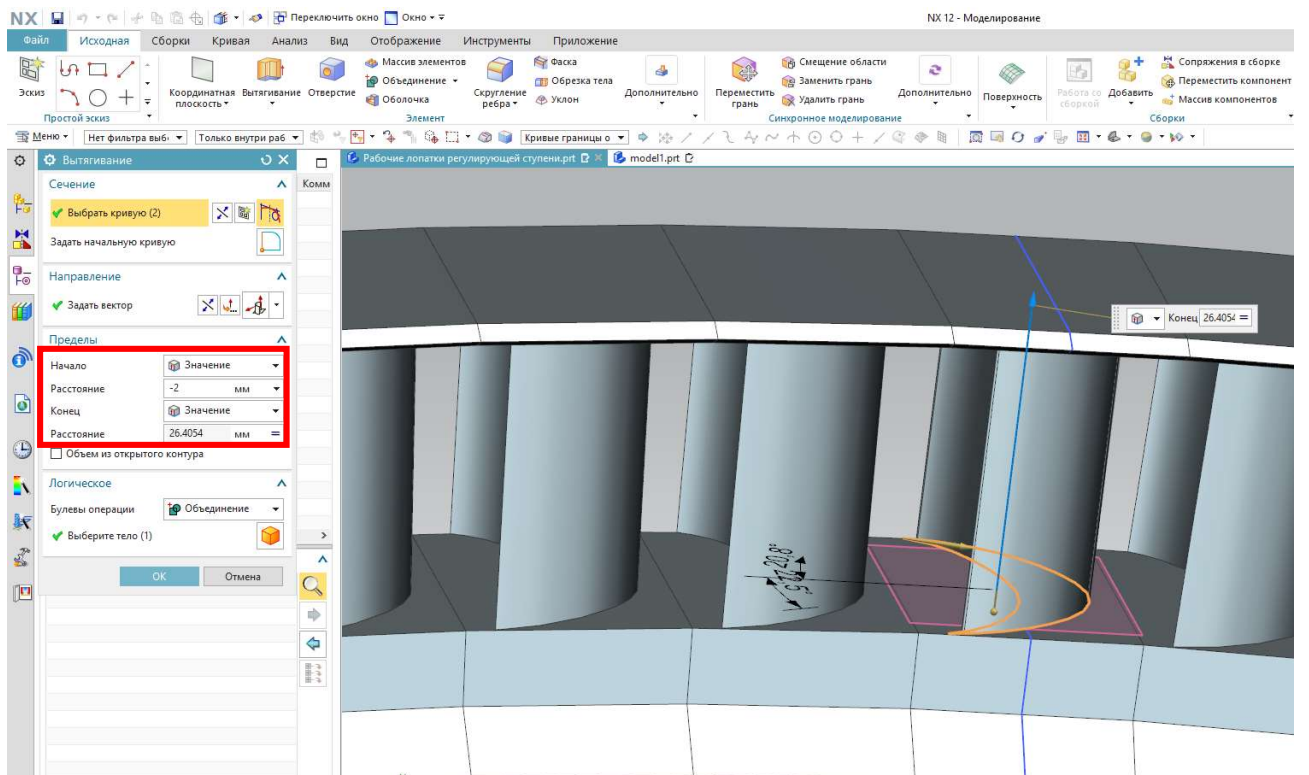


Рисунок 28 – Выдавливание рабочей лопатки

Создание массива элементов представлено на рисунках 29-30.

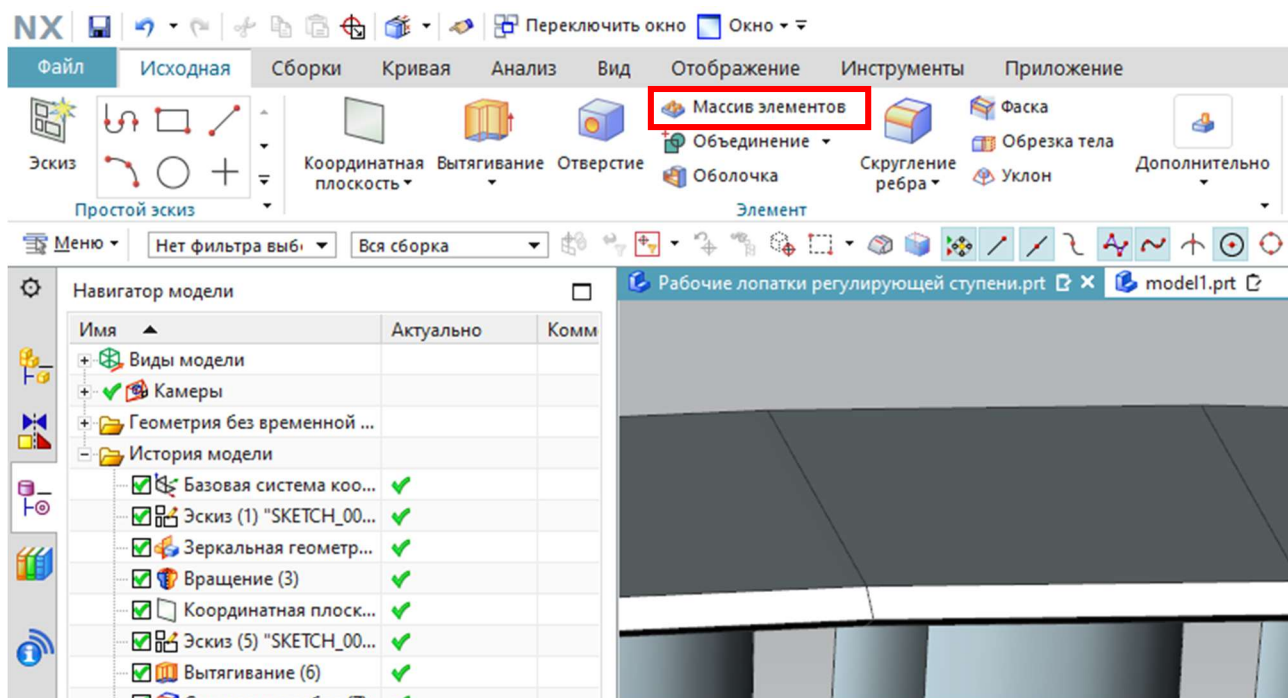


Рисунок 29 – Массив элементов

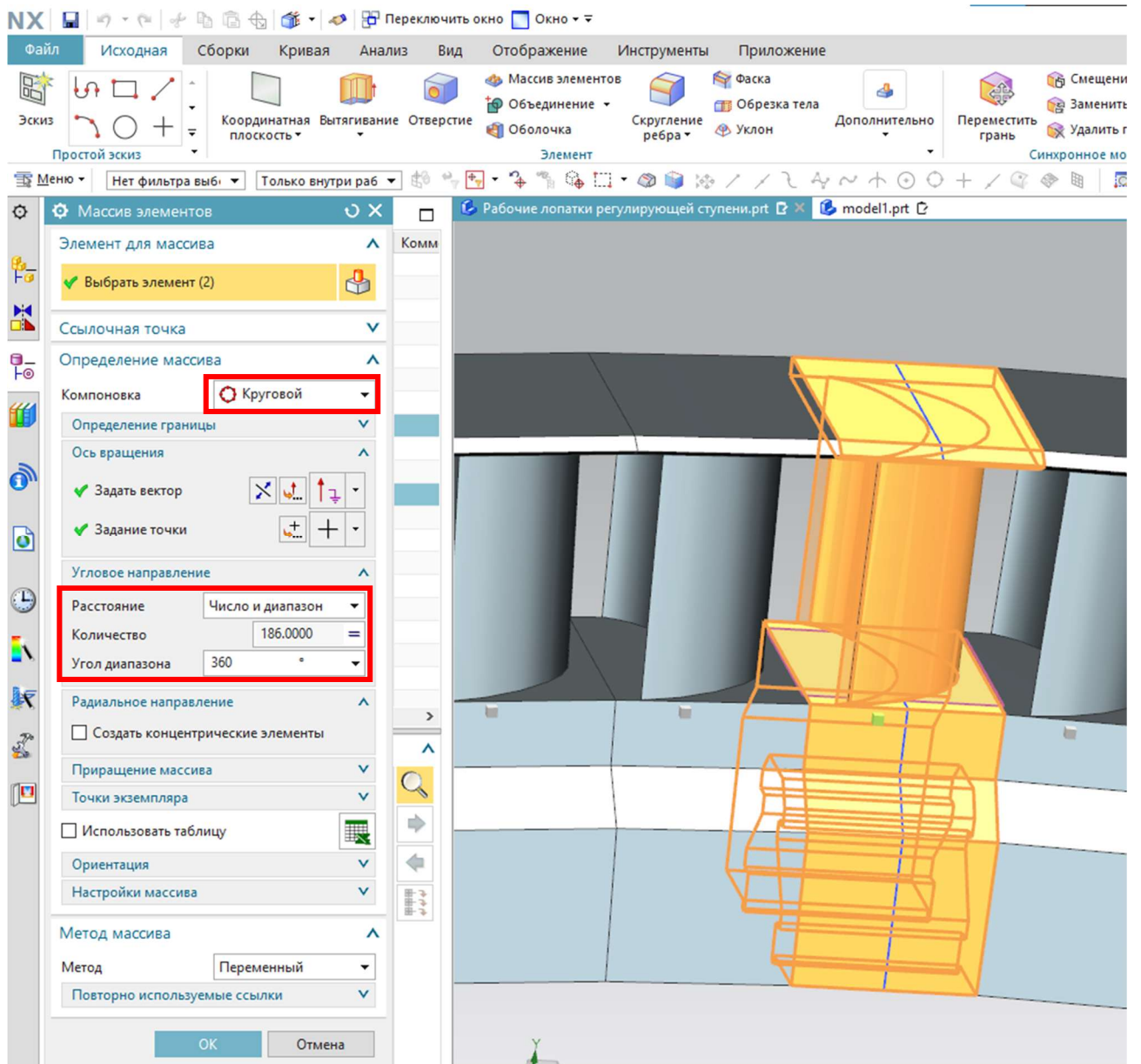


Рисунок 30 – Параметры массива

По итогу построения геометрии имеет рабочую решётку с зависимыми геометрическими параметрами.

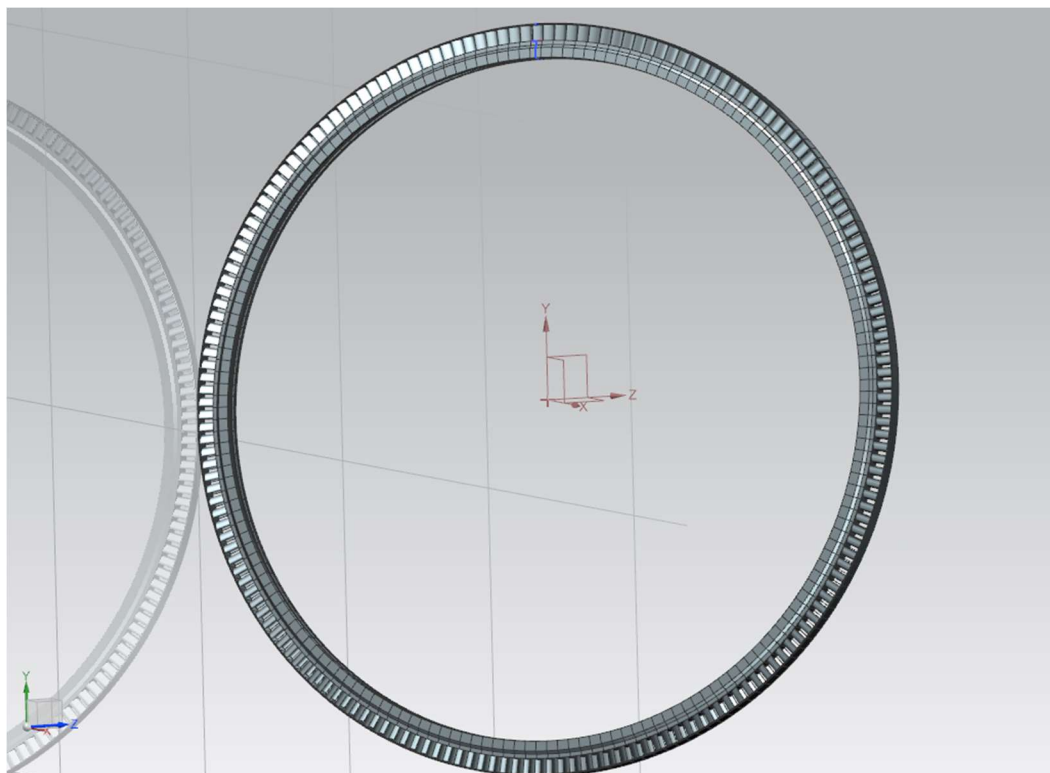


Рисунок 31 – Рабочая решётка

Чтобы обновить значения геометрических параметров в связи с изменением начальных условий построения, необходимо открыть вкладку «Инструменты», выбрать «Выражения» и выбрать команду «Обновление для внешнего изменения» (рисунок 32).

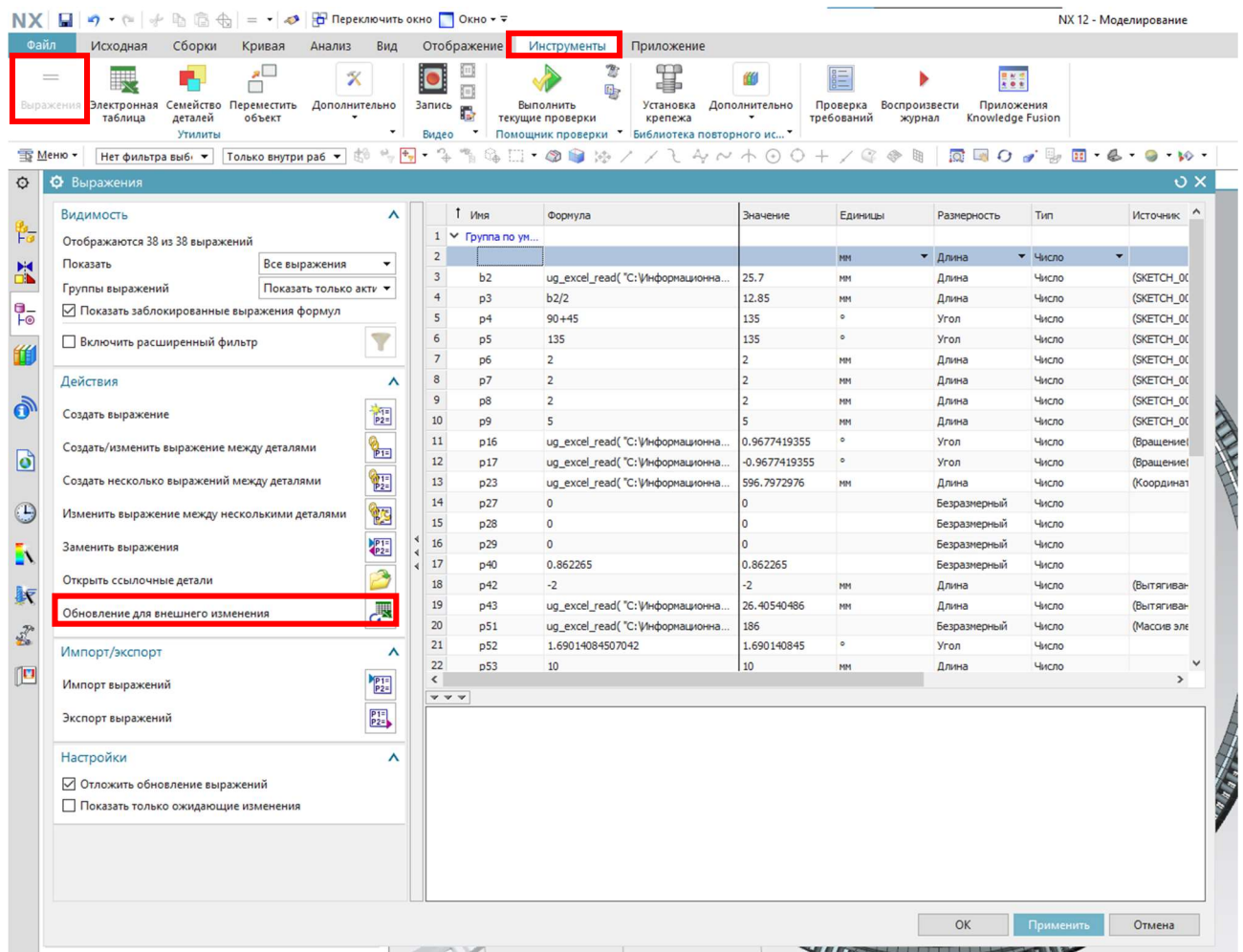


Рисунок 32 – Обновление модели

Таким образом мы получаем полностью автоматизированную 3D-модель ЦВД, геометрия которого меняется при изменении исходных данных (ТЗ) без участия человека. Чтобы убедиться в работоспособности данной модели, изменим исходные данные: электрическую мощность повысим на 50 МВт (до 350 МВт) и увеличим температура пара (и, как следствие, теплоперепад) с 540 до 560 °С. Сравнительный анализ приведён на рисунках 33-35.



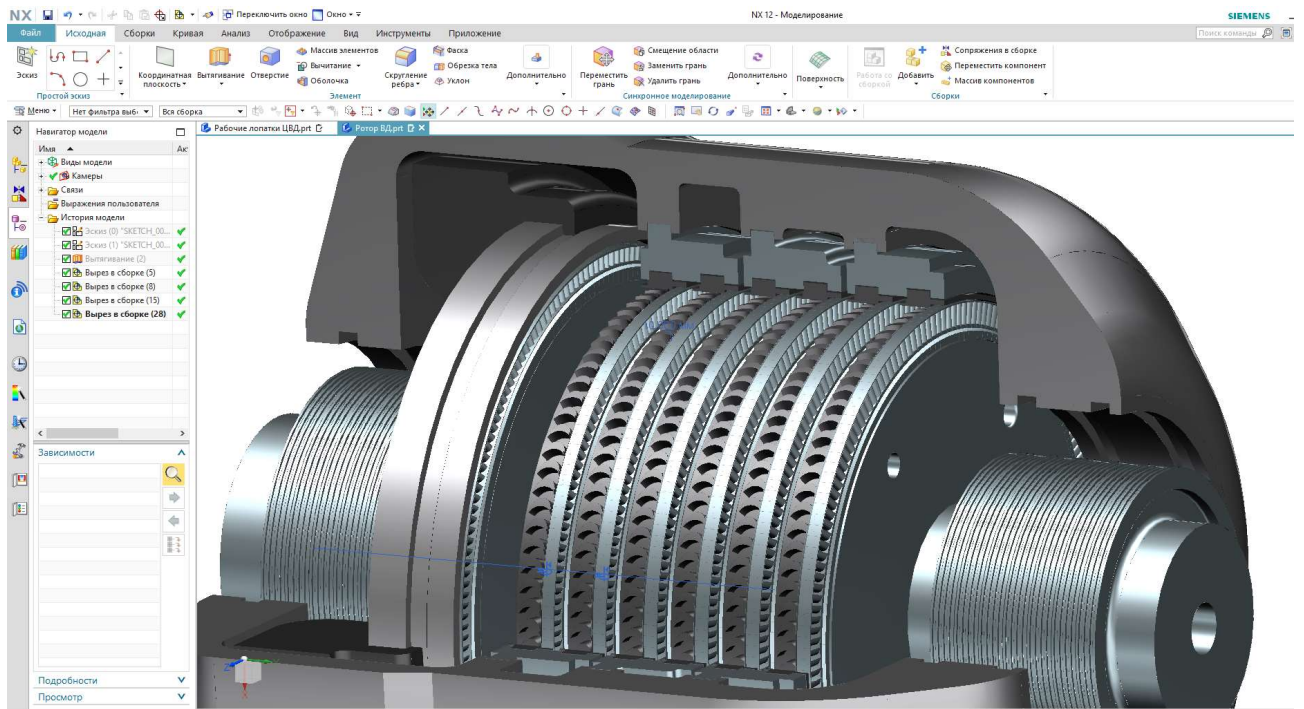


Рисунок 33 – Геометрия до изменения параметров

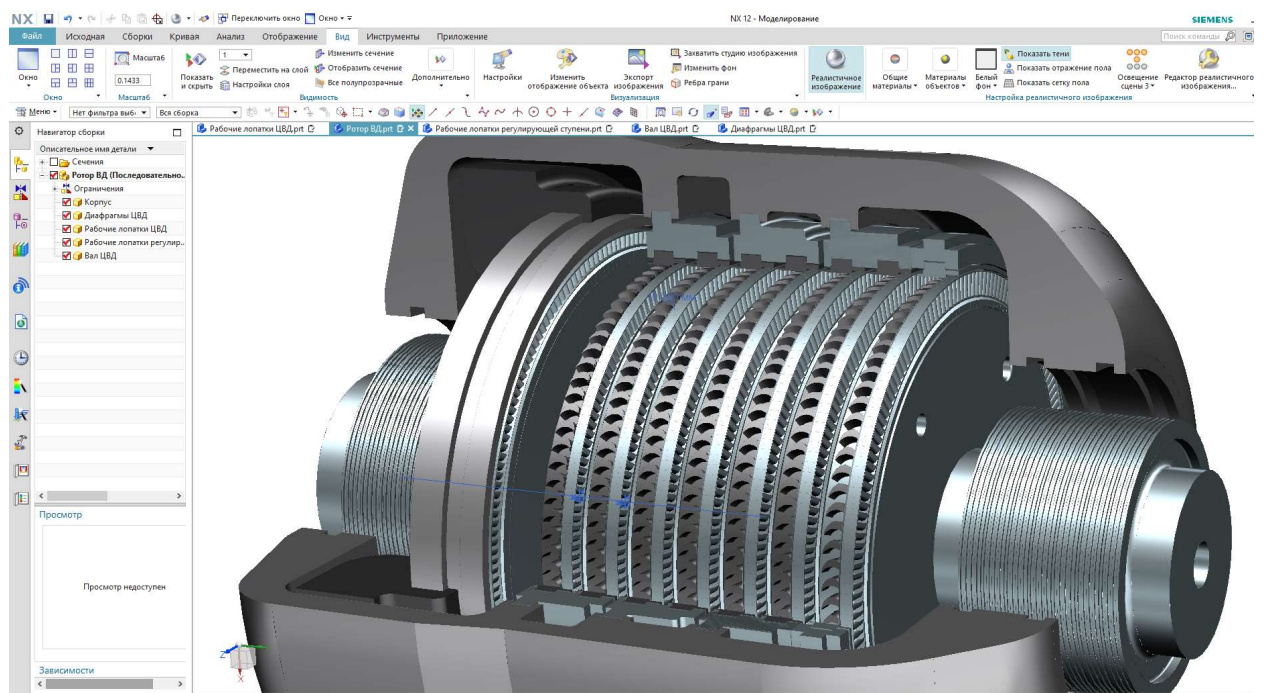


Рисунок 34 – Геометрия после изменения параметров

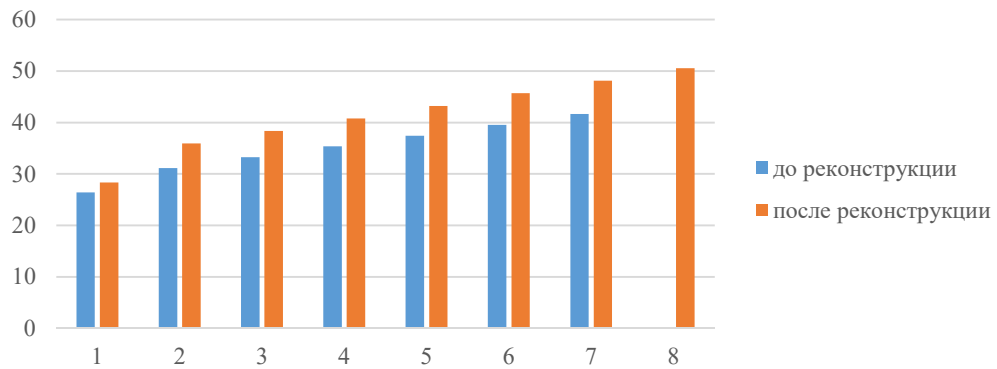


Рисунок 35 – Изменение высот рабочих лопаток и числа ступеней

### 2.3 Математический анализ элементов оборудования

Инженерный анализ начинается с создания конечно-элементной (КЭ) модели. Для этого переходим в меню «Файл» и выбираем «пре/постпроцессор» и в открывшейся вкладке выбираем «Новая КЭ модель и симуляция» и задаём параметры модели.

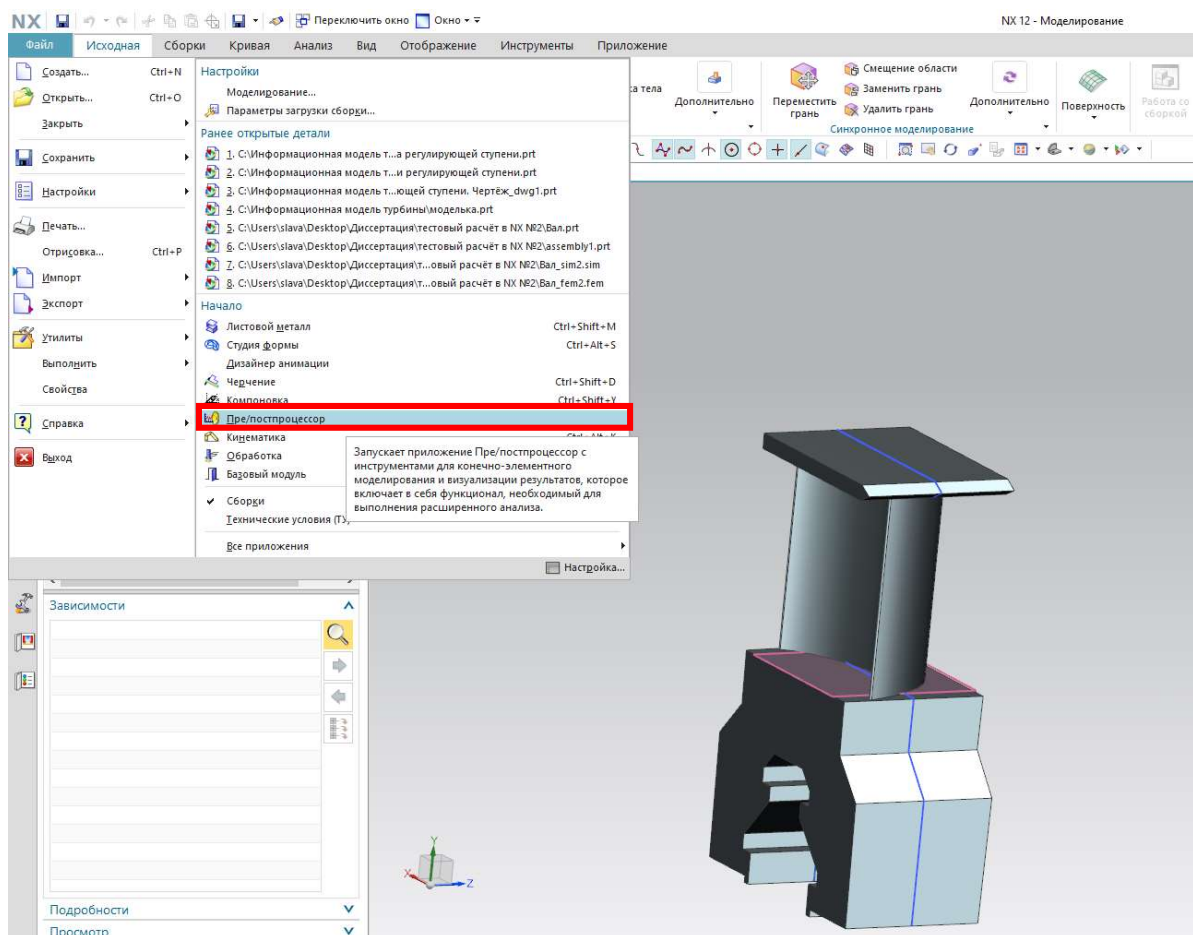


Рисунок 36 – Переход к построению КЭ-модели

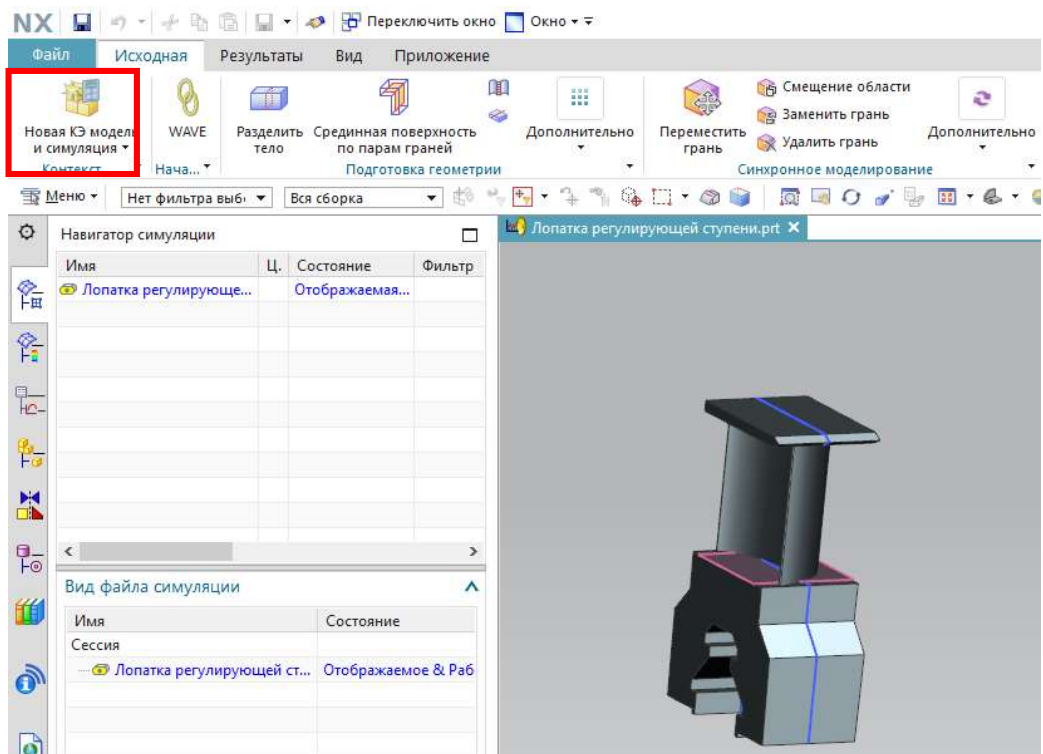


Рисунок 37 – Создание КЭ модели

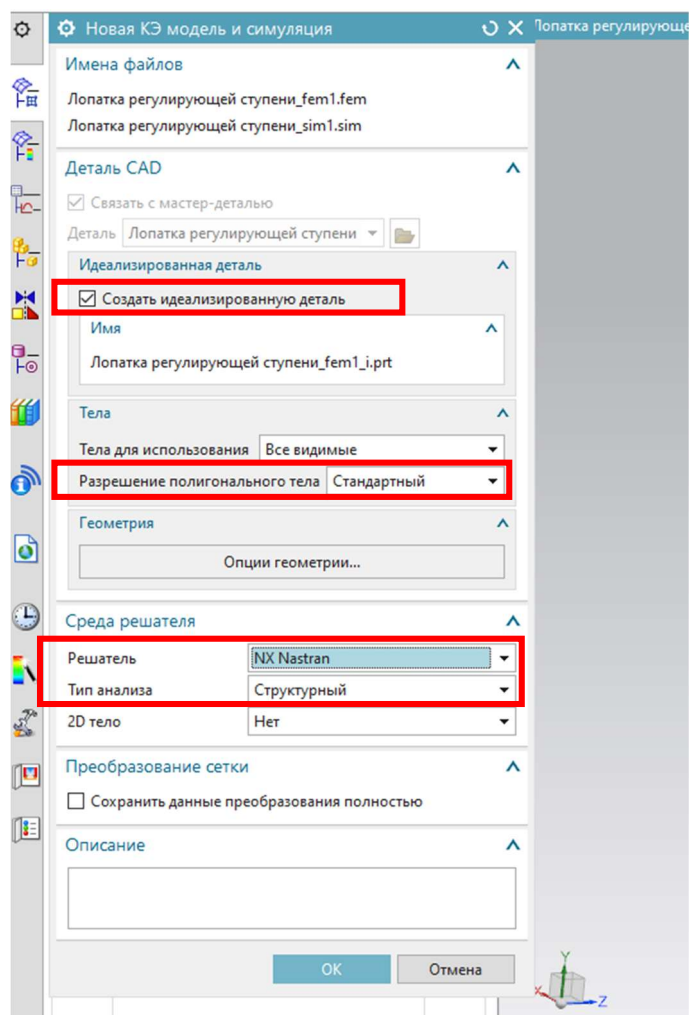


Рисунок 38 – Задание параметров КЭ модели



Создадим расчётную сетку. Для этого выбираем «3D тетраэдральная» и задаём параметры сетки.

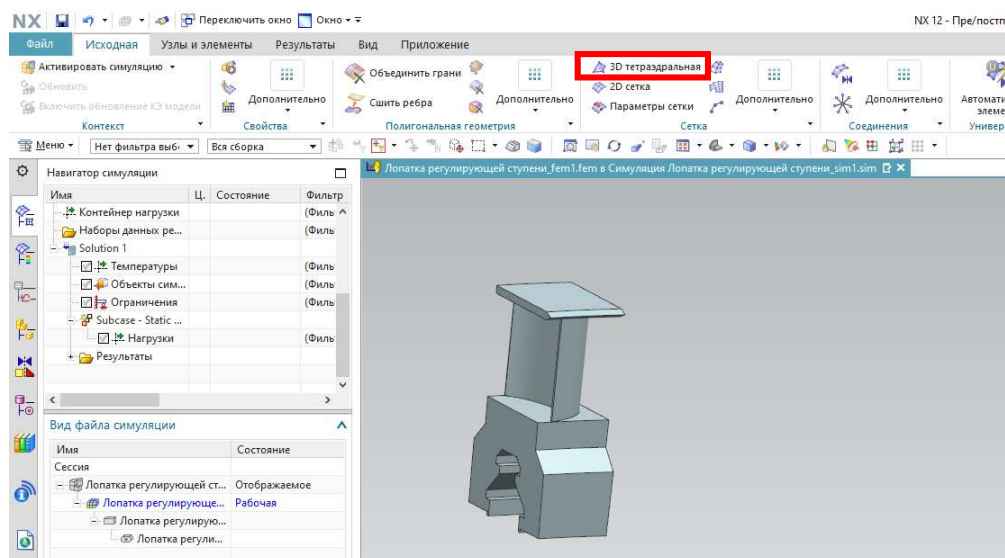


Рисунок 39 – Выбор типа сетки

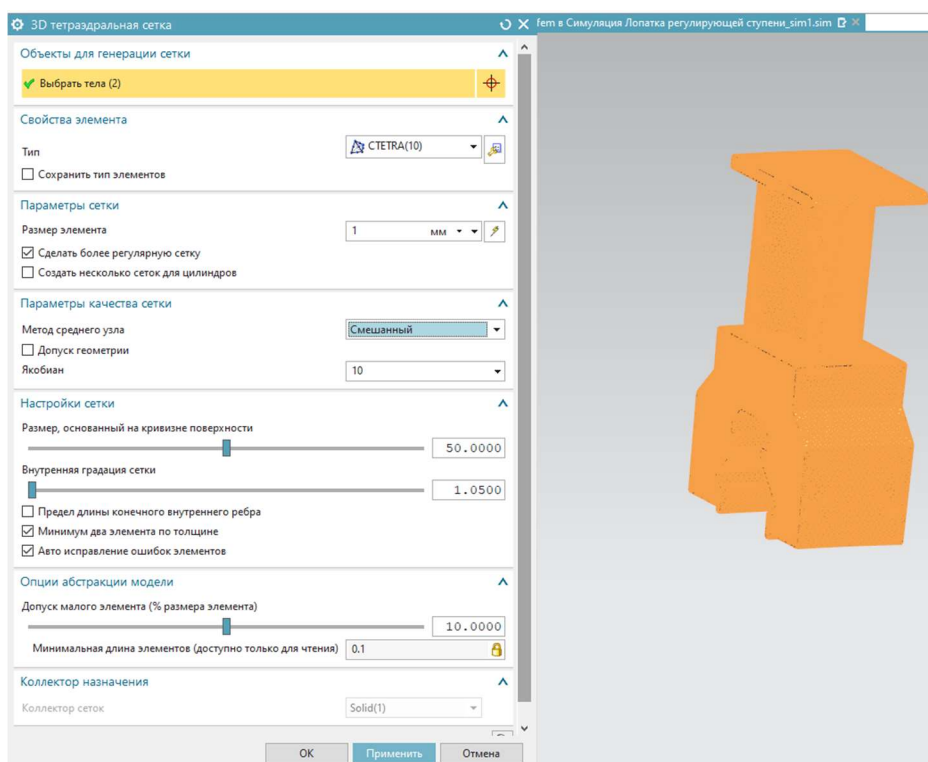


Рисунок 40 – Параметры сетки

Зададим физические свойства материалов. Для этого в панели инструментов переходим к «физическим свойствам». В окне физических свойств двойным нажатием выбираем PSOLID1, затем переходим к выбору материала. Выбираем материал лопатки из предложенного списка или создаём с нуля.

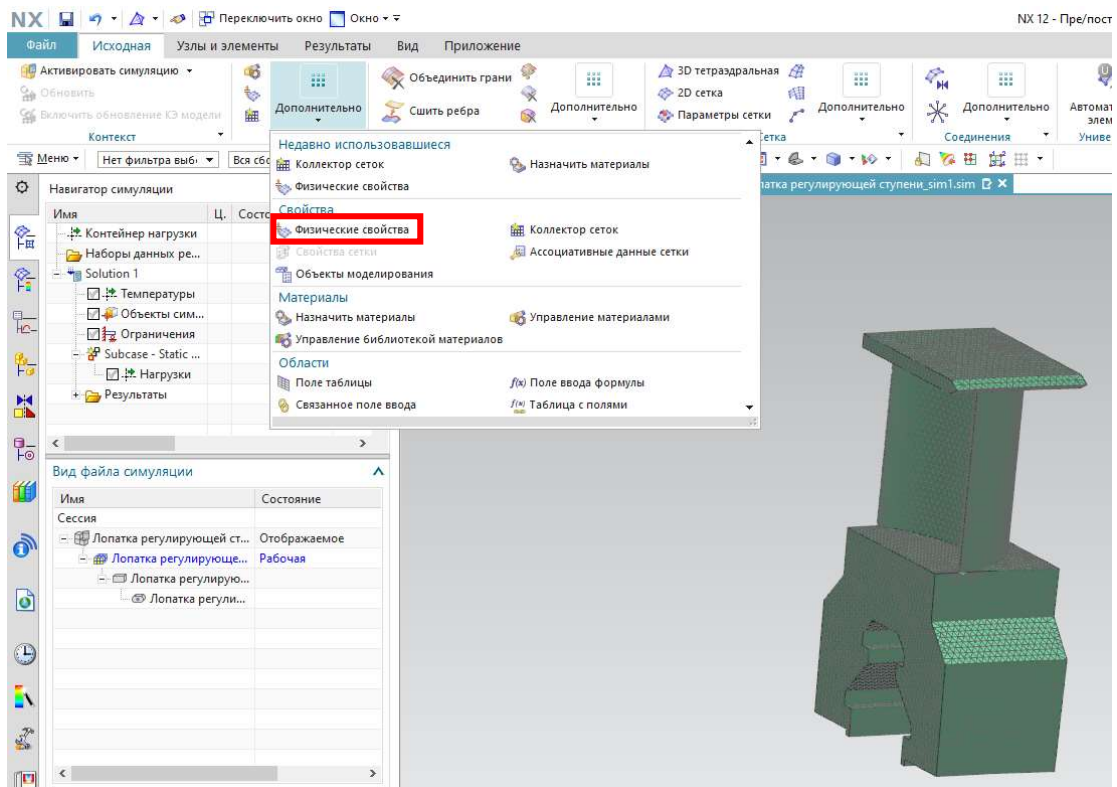
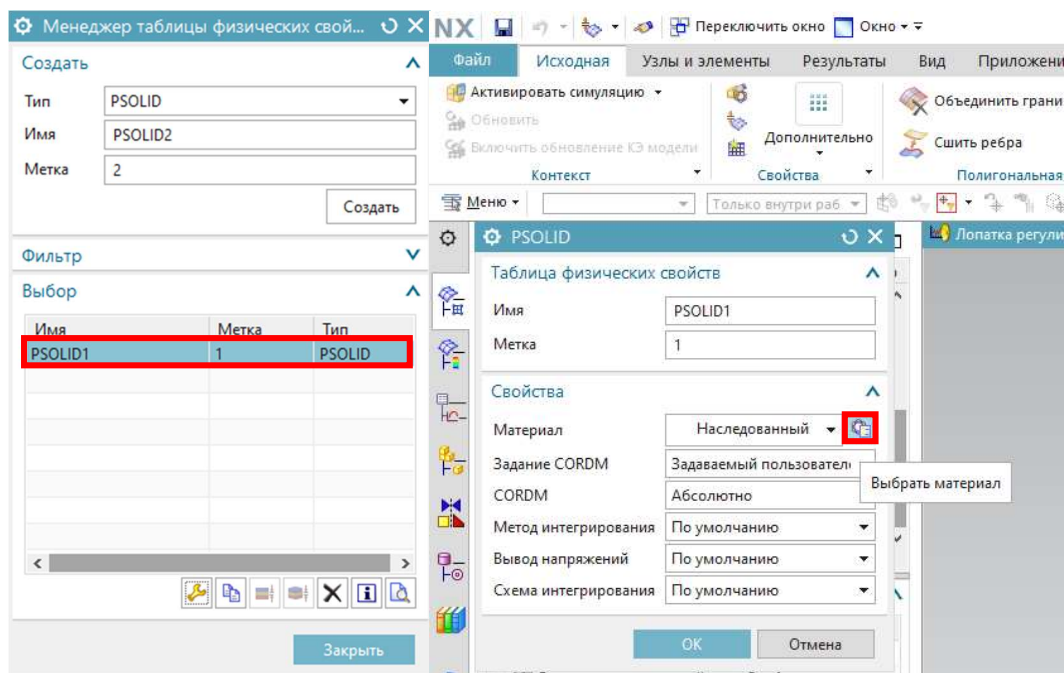


Рисунок 41 – Физические свойства



а)

б)

Рисунок 42 а, б – Задание материала

Теперь необходимо задать граничные условия для расчёта:

1. Двойным нажатием выбираем файл симуляции «sim1» в окне «Вид файла симуляции» и открывают расчётную модель;
2. Для задания ограничения на степени свободы выполняют команду «Заделка» (выпадающее меню «Тип ограничения» на панели инструментов);
3. Задаём ограничение перемещения для хвостовика.

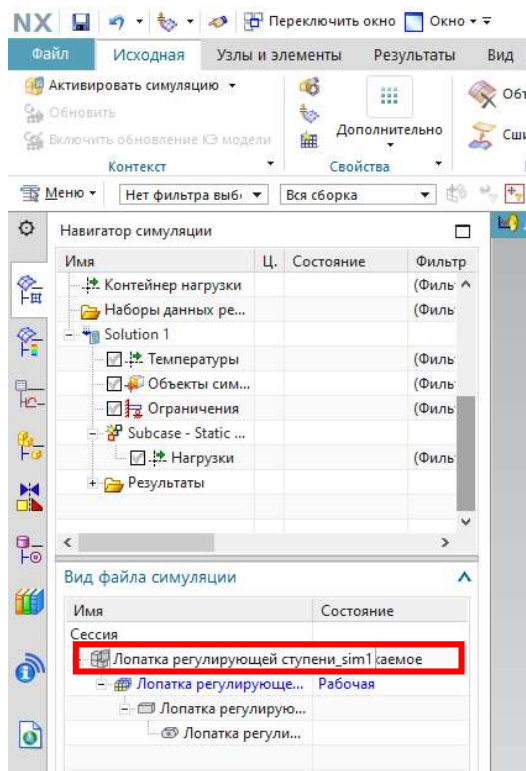


Рисунок 43 – Переход к симуляции

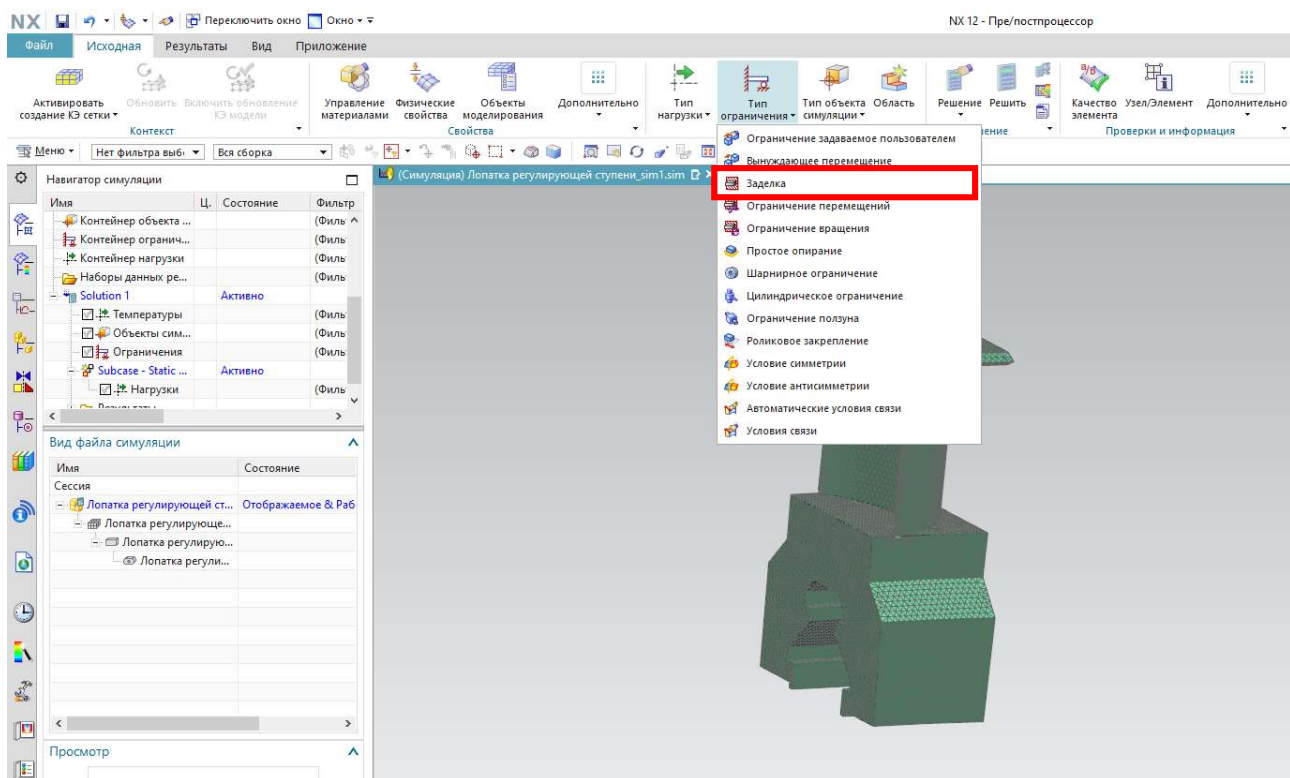


Рисунок 44 – Выбор типа ограничений

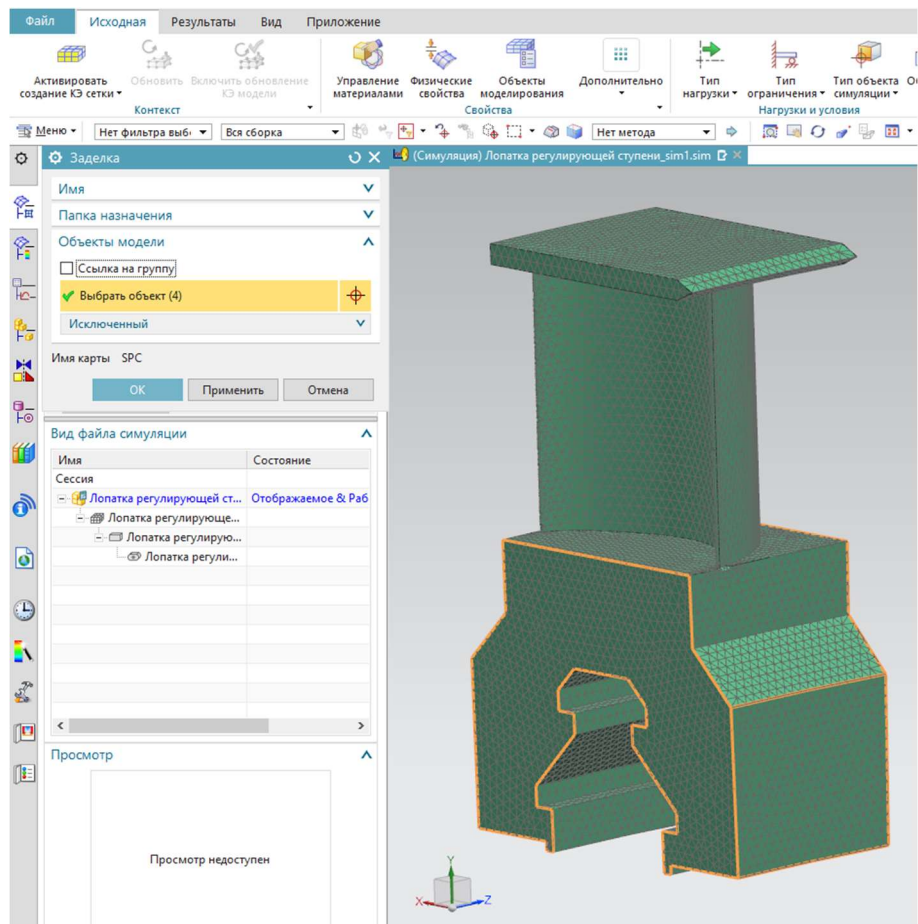


Рисунок 45 – Задание ограничения перемещений

4. Прикладываем к модели усилия. В панели инструментов выбираем «Тип нагрузки» – «Сила» и задаём параметры нагрузки. Аналогично геометрическим параметрам величина нагрузки может быть задана в виде функции, то есть значения нагрузок могут быть импортированы из файла Excel. В данном случае это осевое усилие на лопатки.

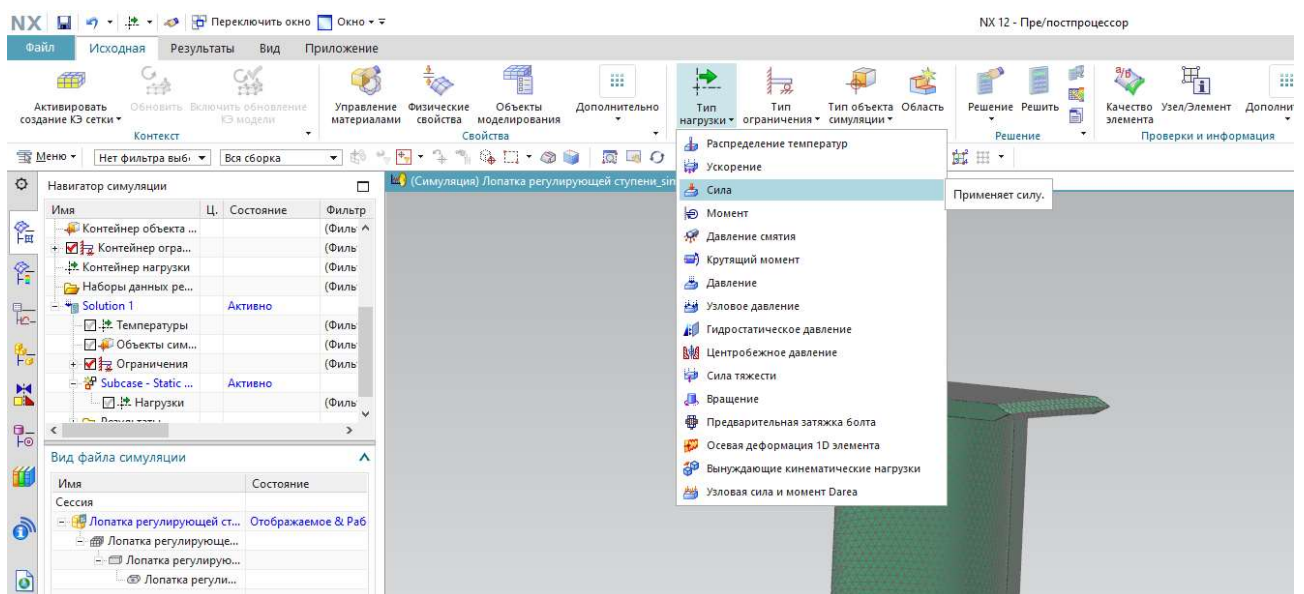


Рисунок 46 – Выбор типа нагрузки



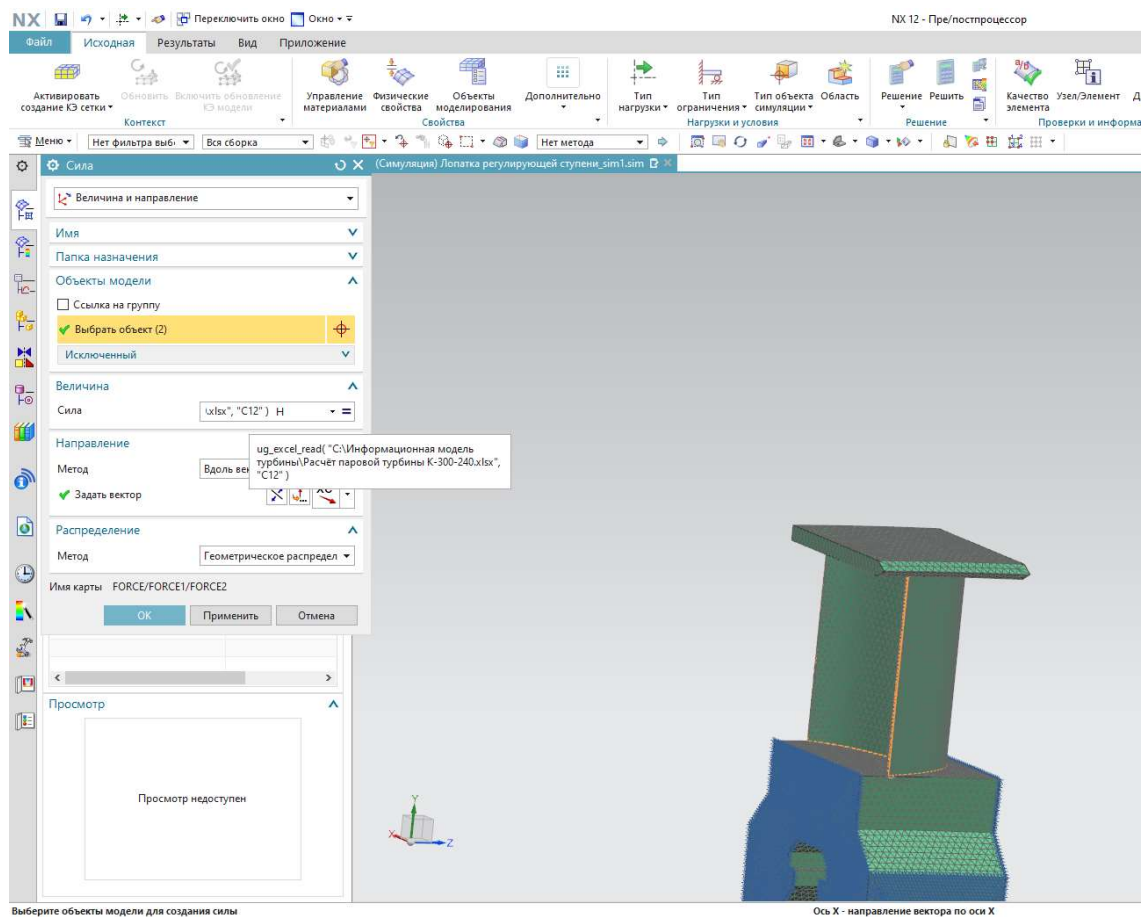


Рисунок 47 – Задание параметров нагрузки

Устанавливаем параметры решения задачи. Для этого в дереве симуляции выбираем «solution 1» – «изменить».

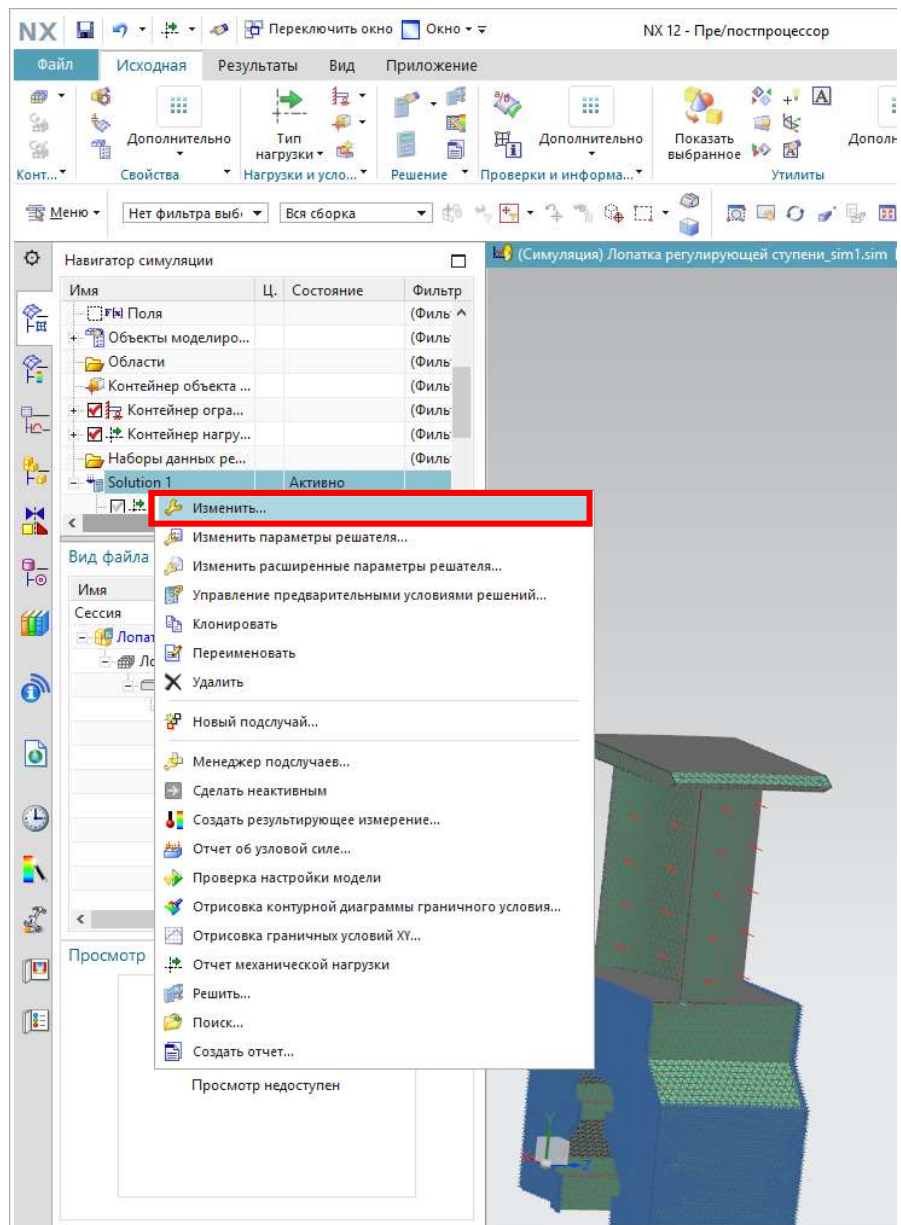


Рисунок 48 – Переход к заданию параметров решения

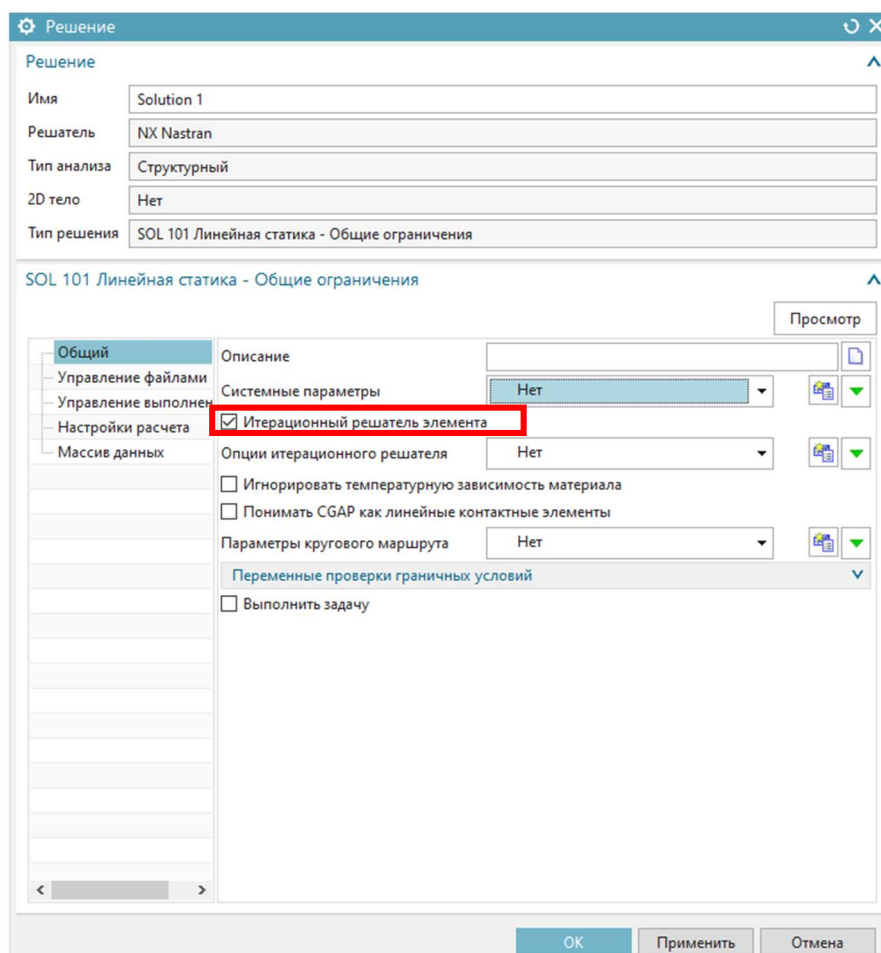


Рисунок 49 – Параметры решателя

Приступаем к решению задачи. В панели «Инструментов» выбираем «Решение». По завершении решения появится окно, в котором отображено количество итераций. В навигаторе симуляции двойным нажатием выбираем «Результаты».

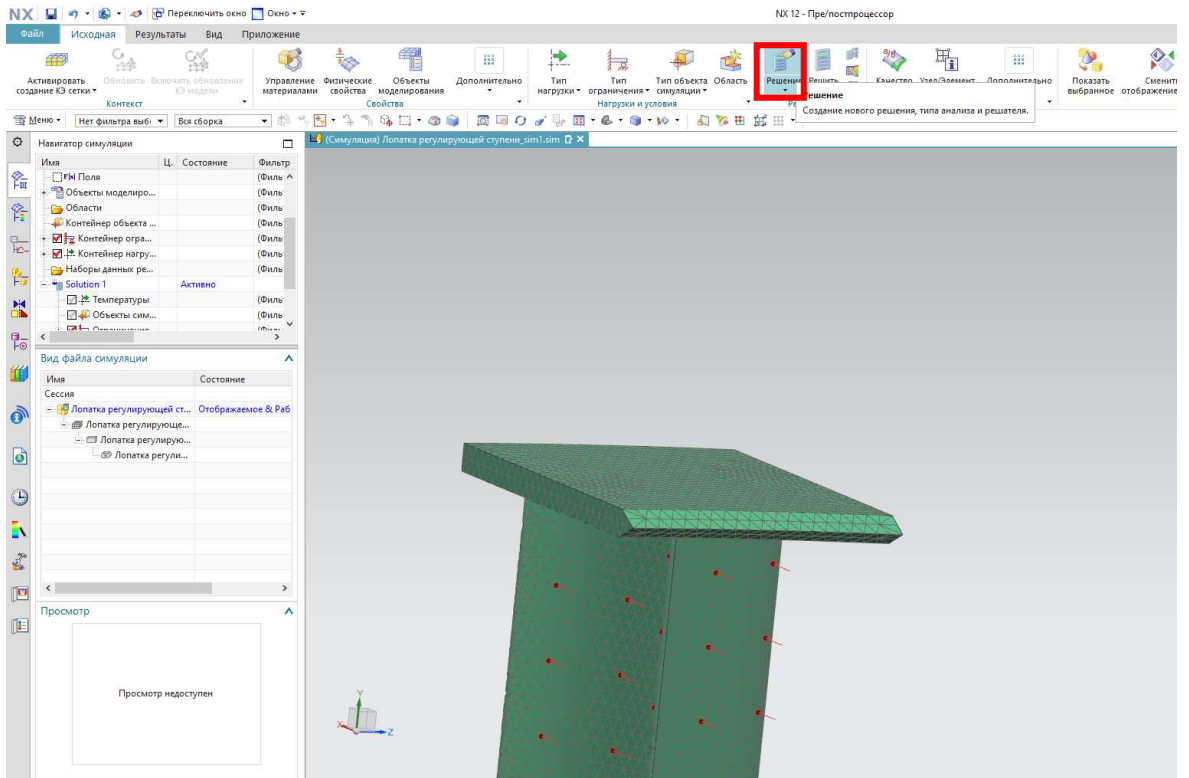


Рисунок 50 – Переход к решению

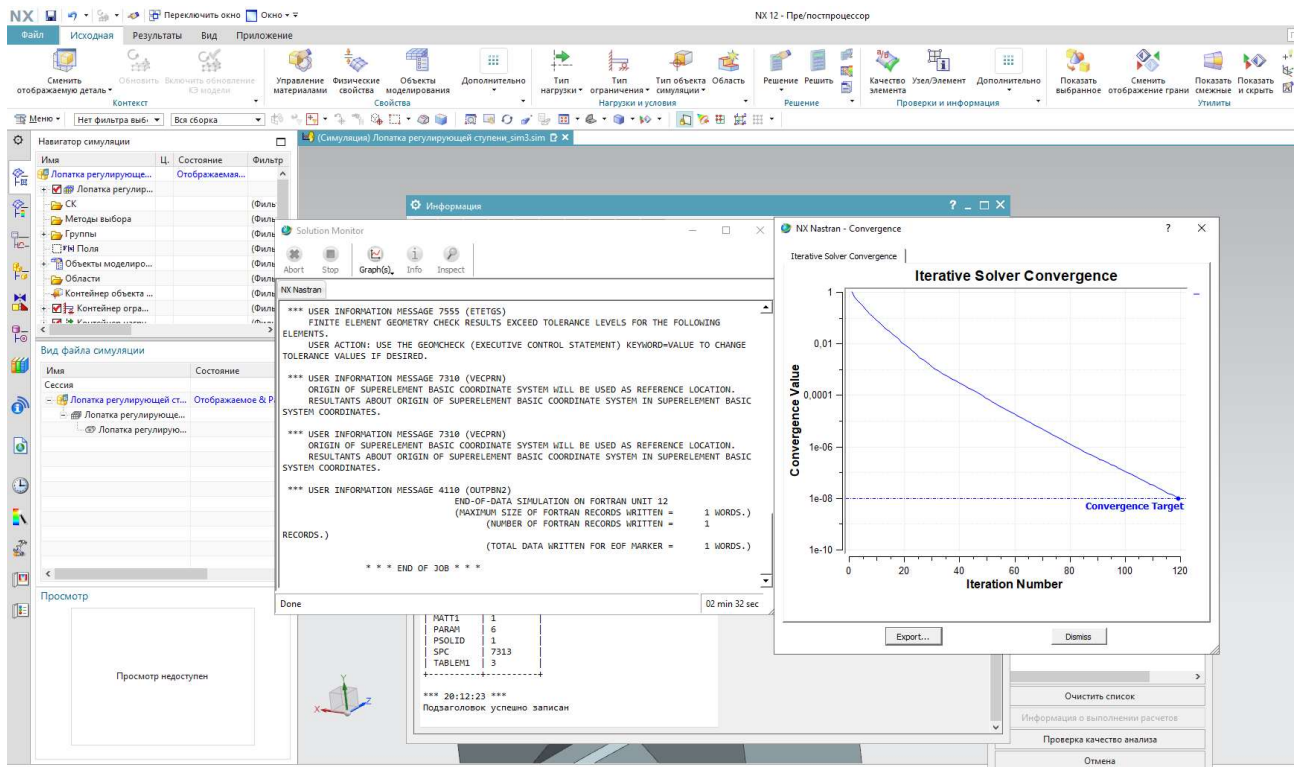


Рисунок 51 – Окончание расчёта



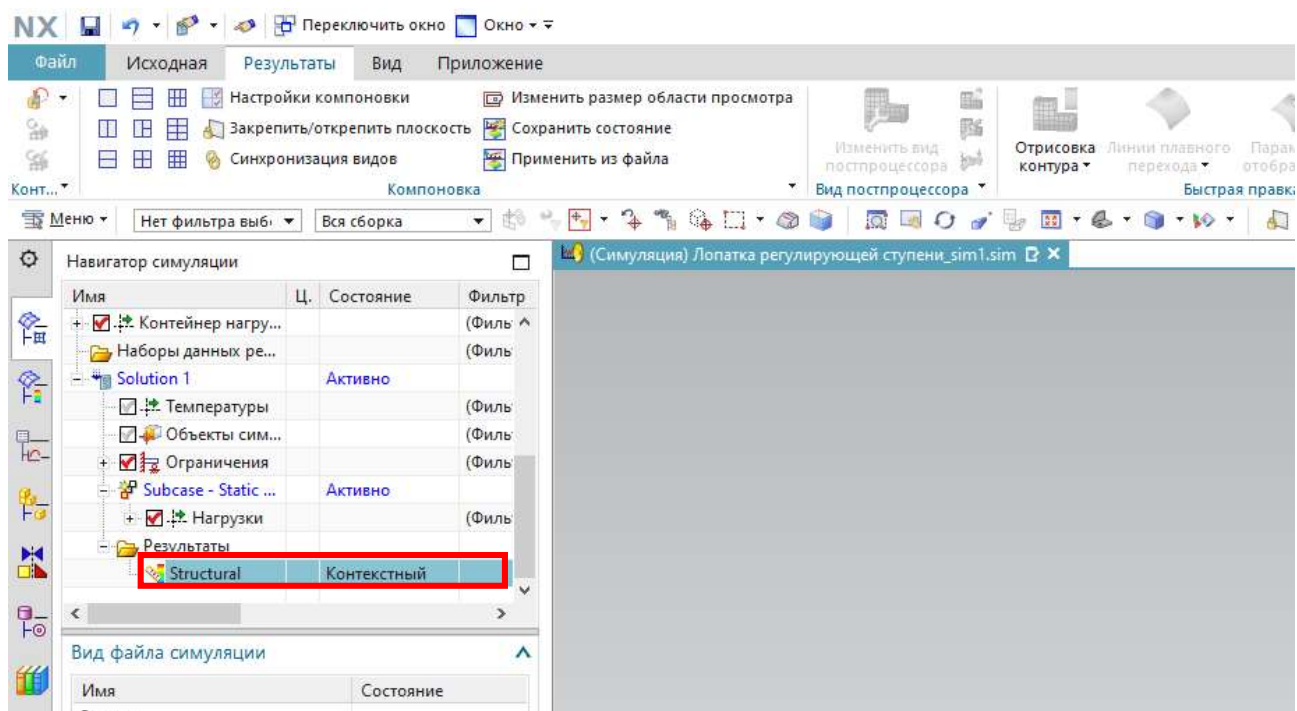


Рисунок 52 – Выбор результатов

Лопатка PC\_sim2 : Solution 1 Результат  
 Subcase - Static Loads 1, Статический шаг 1  
 Перемещение - По узлам Величина  
 Мин.: 0,000, Макс.: 0,430, Единица = мм  
 Деформация: Перемещение - По узлам Величина  
 Частота кадров анимации 8 из 8

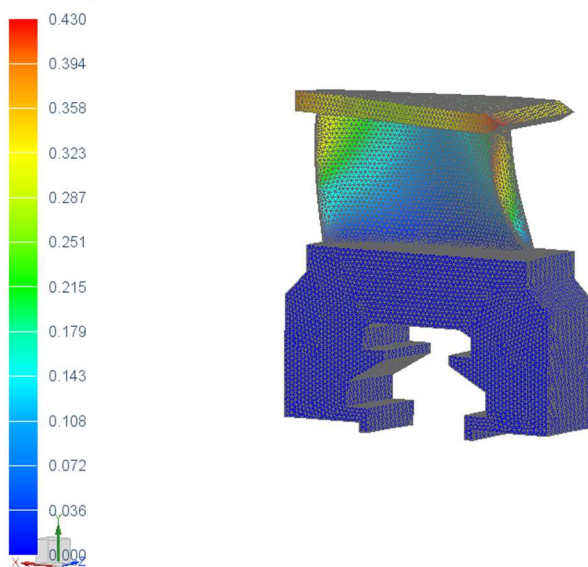


Рисунок 53 – Результаты анализа

В рассмотренном случае получено значение величины деформации, равное 0,43 мм, что превышает допустимое значение в 0,3 мм. Используя инструментарий автоматизированной информационной модели, а именно возможность внесения правок в расчётный макет без вмешательства в алгоритм действия самой модели, возвращаемся к формуле (8) и меняем ранее принятое значение теплоперепада регулирующей ступени со 100 на 80 кДж/кг. Производим перестроение геометрии и расчётной сетки по ранее описанному алгоритму и получаем результат, соответствующий требованиям (рисунок 54).

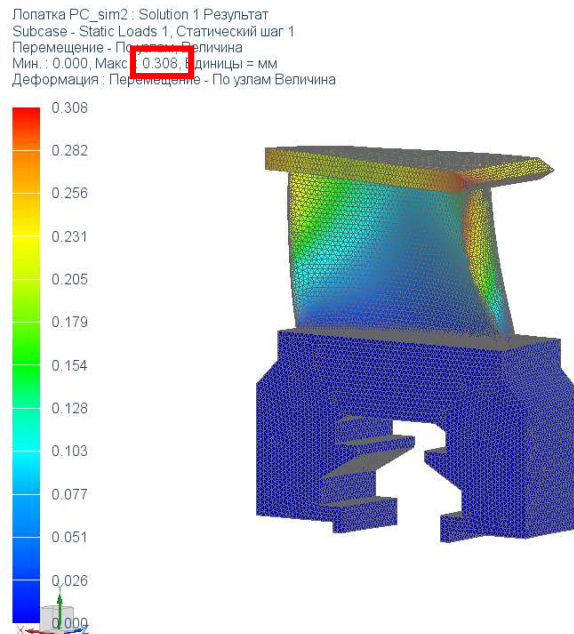


Рисунок 54 – Обновлённый результат

По итогу математического анализа получена визуализация деформаций профиля рабочей лопатки регулирующей ступени по действие осевых усилий потока пара. На основании данной симуляции в дальнейшем производится оценка эффективности конструкции с последующими корректировками и/или утверждением детали в изготовление.

Siemens NX также позволяет редактировать параметры расчёта на всех этапах (моделирование, создание КЭ модели, симуляция), что в конечном итоге выстраивается в последовательную цепочку моделирования и анализа работоспособности полученной модели.

Разработана автоматизированная информационная модель, которая позволяет наглядно оценить влияние тех или иных факторов на геометрические и прочностные характеристики изделия на этапе проектирования и при необходимости своевременно внести корректировки в проект.

### 3 Оценка экономического эффекта от внедрения автоматизации

Заключительным этапом проектирования является разработка комплекта конструкторской документации, предназначенного для изготовления (детализированные чертежи сборочных единиц проектируемого оборудования), транспортировки и монтажа (монтажно-сборочные чертежи) изделия.

Для определения снижения трудозатрат необходимо определить трудозатраты на разработку проекта до внедрения автоматизации [9].

Разработка проекта делится на следующие этапы:

- разработка технического задания;
- разработка технического предложения;
- разработка эскизного проекта;
- разработка технического проекта;

– разработка рабочей (конструкторской) документации.

В ранее описанной автоматизированной информационной модели объединена большая часть этапов (кроме разработки ТЗ и ТП) создания проекта. Таким образом были определены границы автоматизации.

Для определения трудозатрат на разработку проекта до внедрения автоматизации жизненного цикла за основу взят проект турбины Т-185/220-12,8-NG Красноярской ТЭЦ-3 производства АО «УТЗ».

Первостепенно определяется группа новизны и конструктивной сложности:

– Группа новизны В – проектирование предусматривает модификацию базовых моделей с использованием унифицированных элементов;

– Группа конструктивной сложности V – сложные машины автоматического и полуавтоматического действия с применением сложных электрических, гидравлических или электронных схем, в которых рабочие и вспомогательные функции работы изделия автоматизированы.

Общая трудоёмкость создания конструкции:

$$T = \sum_1^m T_i + T_0, \quad (79)$$

где  $T_i$  – затраты времени на соответствующую стадию проектирования, нч;

$T_0$  – время изготовления опытного образца не учитывается, так как производство изделий является единичным (1-10 штук в год);

$m$  – количество стадий проектирования.

Исходя из количества этапов, получаем:

$$T = T_{ТЗ} + T_{ТЗ}^{согл} + T_{ТП} + T_{ТП}^{согл} + T_{ЭП} + T_{ТехПр} + T_{РД}, \quad (80)$$

где  $T_{ТЗ} = 500$  – затраты времени на разработку ТЗ, нч;

$T_{ТЗ}^{согл} = 80 \div 100$  – затраты времени на согласование ТЗ, нч;

$T_{ТП} = 510$  – затраты времени на разработку ТП, нч;

$T_{ТП}^{согл} = 80 \div 100$  – затраты времени на согласование ТП, нч;

$T_{ЭП}$  – затраты времени на разработку эскизного проекта, нч. Определяется как:

$$T_{ЭП} = \sum_1^n t \cdot k \cdot N, \quad (81)$$

где  $t$  – норма времени на разработку документа, нч.;

$k$  – поправочный коэффициент на формат документа;

$N$  – количество фактически заданных листов КД одного наименования, шт.;

$n$  – количество наименований видов конструкторской документации. Результаты расчёта трудозатрат на разработку эскизного проекта приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Затраты времени на разработку эскизного проекта

Наименование документа	Формат	$t$ , нч	$k$	$N$	Фактическая трудоёмкость
Чертёж общего вида	A1	63,4	1	10	634
Теоретический чертёж	A1	12,1	1	10	121
Габаритный чертёж	A1	10,1	1	5	50,5
Схемы	A2	53,4	1	20	1068
Пояснительная записка	A4	4,2	1	100	420
Программа и методика испытаний	A4	2,8	1	50	140
Таблицы	A4	0,6	1	10	6
Расчёты	A4	2,9	1	20	58
Итого:					2497,5

$T_{\text{ТехПр}}$  – затраты времени на разработку технического проекта, нч. Определяется аналогично затратам на эскизный проект. Результаты расчёта трудозатрат на разработку технического проекта приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Затраты времени на разработку технического проекта

Наименование документа	Формат	$t$ , нч	$k$	$N$	Фактическая трудоёмкость
Чертёж общего вида	A1	79,2	1	10	792
Чертёж детали	A4	1,6	1	20	32
Электрическая схема	A2	60,2	1	10	602
Кинематическая схема	A2	32,8	1	10	328
Гидравлическая схема	A2	44,8	1	10	448
Ведомость покупных изделий	A4	1,1	1	20	22
Пояснительная записка	A4	4,3	1	100	430
Расчёты	A4	2,6	1	20	52
Спецификация	A4	0,8	1	10	8
Нормоконтроль текстовых документов	A4	0,3	1	150	45
Нормоконтроль чертежа	A4	0,3	[9, табл. 5]	60	52,56
Технологический контроль	A4	1	[9, табл. 5]	60	175,2
Согласование и утверждение тех.проекта					80
Итого					3066,76

$T_{\text{РД}}$  – затраты времени на разработку рабочей документации, нч. Результаты расчёта трудозатрат на разработку технического проекта приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Затраты времени на разработку РД

Наименование документа	Формат	$t$ , нч	$k$	$N$	Фактическая трудоёмкость
Монтажный чертёж	A1	79,2	1	10	792
Сборочный чертёж	A1	54	1	10	540
Габаритный чертёж	A1	54,9	1	10	549
Упаковочный чертёж	A1	12	1	10	120
Чертёж детали	A4	2,8	1	20	56
Электрическая схема	A2	132,7	1	10	1327
Кинематическая схема	A2	125,1	1	10	1251
Гидравлическая схема	A2	116	1	10	1160
Спецификация	A4	0,8	1	10	8
Ведомость покупных изделий	A4	1,1	1	20	22
Программа и методика испытаний	A4	3,6	1	50	180
Пояснительная записка	A4	1	1	100	100
Технические условия	A4	3,1	1	20	62
Таблицы	A4	1	1	10	10
Расчёты	A4	7,9	1	20	158
Аннотация	A4	2,6	1	5	13
Техническое описание и инструкции по эксплуатации	A4	3,5	1	100	350
Нормоконтроль текстовых документов	A4	0,2	1	335	67
Нормоконтроль чертежа	A4	0,2	[9, табл. 5]	90	69,84
Технологический контроль	A4	0,2	[9, табл. 5]	90	125,76
Копирование работы	A4	0,1	1	1325	132,5
Итого					7093,1

Возвращаясь к формуле (80), получаем:

$$T = 500 + 80 + 510 + 80 + 2497,5 + 3066,76 + 7093,1 = 13827,36 \text{ нч.}$$

Структура трудозатрат представлена в таблице 7.

Таблица 7 – Структура трудозатрат проекта

Этап проектирования	Трудозатраты, нч	Доля
Разработка ТЗ	580	4%
Разработка ТП	590	4%
Разработка эскизного проекта	2498	18%
Разработка технического проекта	3067	22%
Разработка РД	7093	51%
Итого	13827	100%

Предположим, что автоматизация процессов проектирования сокращает затраты времени на разработку конструкторской документации на 90% (10% – резерв на корректировки и внесение правок на основании расчёта или математического анализа). Сравнительный анализ распределения трудозатрат по

этапам проекта до и после автоматизации жизненного цикла на этапе проектирования представлен на рисунке 55.

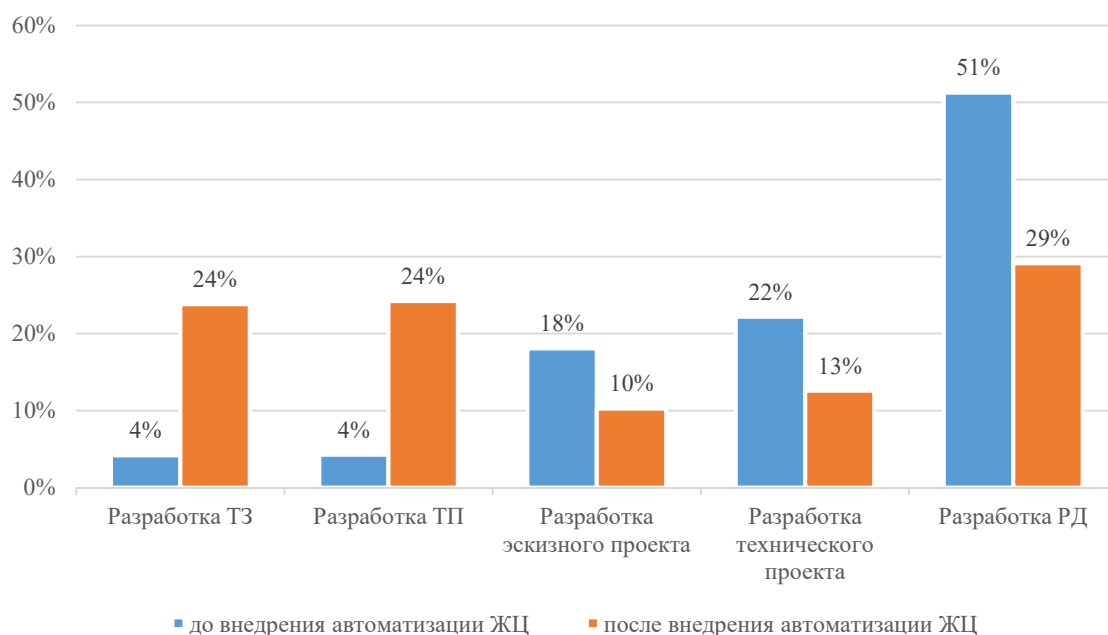


Рисунок 55 – Структура трудозатрат на проектирование оборудования до внедрения автоматизации процессов ЖЦ

Таким образом была определена величина сокращения трудозатрат на разработку проекта в связи с применением PLM-систем: общая трудоёмкость проекта составила 2435,7 нч, что на 82% ниже исходной величины.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования были достигнуты следующие результаты и сформированы выводы:

1. Сформирован алгоритм автоматизации процессов жизненного цикла теплоэнергетического оборудования на этапе его проектирования. В качестве примера был взят цилиндра высокого давления турбины К-300-240. В рамках проработки данного алгоритма был составлен расчётный макет в среде MS Excel, объединивший в себе расчётную часть проекта, разработана расчётнозависимая трёхмерная модель цилиндра и произведён математический анализ элементов полученной геометрии на предмет деформаций под действием осевых усилий в PLM-среде Siemens NX. Все вышеперечисленные элементы в совокупности представляют собой автоматизированную информационную модель, являющуюся основой автоматизации процессов ЖЦИ на этапе проектирования. Ход исследования оформлен в виде методического пособия и может быть воспроизведён в рамках реального производства.

2. Определён технико-экономический эффект от внедрения системы автоматизации ЖЦИ на этапе проектирования от момента получения ТЗ до выдачи РД: расчётные трудозатраты на разработку проекта сократятся на 82% относительно затрат того же проекта до внедрения рассматриваемых систем.

3. Разработанный алгоритм составлен на примере теплоэнергетического оборудования различной сложности и конфигурации (от рабочих лопаток и вала до диафрагм, обойм, корпуса и общей сборки цилиндра), при этом на практике данный алгоритм может быть применим в любой технической отрасли, где имеет место проектирование с применением трёхмерной графики.

4. В ходе создания автоматизированной информационной модели установлена последовательная взаимосвязь как между этапами проектирования, так и между отдельными элементами в рамках графической и расчётной части проекта, что привело к сокращению роли человека в процессе проектирования и сокращению влияния человеческого фактора на конечный результат и закономерное повешение надёжности оборудования.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ Р 53791-2010. Ресурсосбережение. Стадии жизненного цикла изделий производственно-технического назначения. Общие положения = Resources saving. Stages of technological cycle. General principles : национальный стандарт Российской Федерации : официальное издание : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 31 мая 2010 г. № 85-ст : введен впервые : дата введения 2011-01-01 / разработан Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский центр стандартизации, информации и сертификации сырья, материалов и веществ» (ФГУП «ВНИЦСМВ»). – Москва : Стандартинформ, 2018. – V, 8 с.;
2. Смирнов, А. В. Технология параллельного проектирования: основные принципы и проблемы внедрения / А. В. Смирнов, Р. М. Юсупов // Автоматизация проектирования. – 1997. – № 2. – С. 50–55.;
3. Косяк, Ю. Ф. Паровая турбина К-300-240 ХТГЗ / иллюстрированное издание / Ю. Ф. Косяк ; Энергоиздат. – Москва: Энергоиздат, 1982. – 272 с.;
4. Турбины тепловых и атомных электрических станций: учебник для вузов / А. Г. Костюк, В. В. Фролов, А. Е. Булкин, А. Д. Трухний ; под ред. А. Г. Костюка, В. В. Фролова. – Москва : Издательство МЭИ, 2001. – 488 с.;
5. Подборский, Л. Н. Тепловые двигатели : методическое пособие к курсовому проектированию / Л. Н. Подборский ; Сибирский федеральный университет, Политехнический институт. – Красноярск : СФУ, 2018. – 150 с.;
6. Рязанов, А. И. Параметрическое твердотельное САД моделирование в Siemens NX : учебное пособие / А. И. Рязанов, Е. С. Горячкин, В. С. Мелентьев ; Самарский университет. – Самара : Издательство Самарского университета, 2017. – 164 с. – ISBN 978-5-7883-1360-3;
7. Унянин, А. Н., Евстигнеев, А. Д. Моделирование и инженерный анализ с помощью программного комплекса NX : учебное пособие / А. Н. Унянин, А. Д. Евстигнеев – Ульяновск : УлГУ, 2017. – 212 с. – ISBN 978-5-9795;
8. Данилов, Ю. В. Практическое использование NX ; специализированное издание / Ю. В. Данилов – Москва : ДМК Пресс, 2011. – 332 с. – ISBN 978-5-94074-717-8;
9. Технологическая подготовка производства изделия: методические указания по выполнению курсовой работы / А. Г. Лякишев, Т. К. Смородинова, В. М. Маслов, К. В. Аксёнов ; под редакцией В. Л. Моисеевой. – Орёл : ОрёлГТУ, 2006. – 70 с.



Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

\_\_\_\_\_  
Политехнический институт  
институт  
\_\_\_\_\_  
Тепловые электрические станции  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_  
Е.А. Бойко  
подпись инициалы, фамилия  
« 24 » 06 20 23 г

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Разработка системы информационной поддержки жизненного цикла  
теплоэнергетического оборудования на этапе проектирования  
\_\_\_\_\_  
тема  
13.04.01 – Теплоэнергетика и теплотехника  
\_\_\_\_\_  
код и наименование направления  
13.04.01.02 – Энергоэффективные технологии производства  
электрической и тепловой энергии  
\_\_\_\_\_  
код и наименование магистерской программы

Руководитель

\_\_\_\_\_  
подпись, дата  
\_\_\_\_\_  
должность, учёная степень

Л.Н. Подборский

инициалы, фамилия

Выпускник

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

К.Е. Азанов

инициалы, фамилия

Рецензент

\_\_\_\_\_  
подпись, дата  
\_\_\_\_\_  
должность, учёная степень

В.Д. Труфанов

инициалы, фамилия

Нормоконтролер

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

П.В. Шишмарев

инициалы, фамилия

Красноярск 2023



Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

институт

Тепловые электрические станции

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

Е.А. Бойко

подпись

инициалы, фамилия

« 29 »

10 20 21 г

**ЗАДАНИЕ**

**НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ**

в форме

магистерской диссертации

бакалаврской работы, дипломного проекта, дипломной работы, магистерской диссертации

Красноярск 2023

