

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

по дисциплине
«Численные методы механики»

Методические указания
для студентов специальности 1-36 01 03
«Технологическое оборудование
машиностроительного производства»
дневной формы получения образования

Брест 2022

УДК 518:624.04(075)

В методических указаниях представлены лабораторные работы по дисциплине «Численные методы механики», в которых рассматриваются вопросы решения численными методами и методами математического моделирования задач создания и расчета машиностроительных деталей, узлов и механических систем (механизмов), в том числе с использованием компьютерного пакета прикладной математики MathCad и автоматизированной системы проектирования SolidWorks.

Методические указания предназначены для студентов специальности 1-36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительного производства» дневной формы получения образования .

Составители: Бочарова Н. В., ст. преподаватель
Игнатюк В. И., профессор кафедры прикладной механики

ВВЕДЕНИЕ

Численные методы – это методы приближенного решения сложных математических задач, позволяющие свести решение задачи к выполнению конечного числа более простых математических операций.

Применение численных методов тесно связано с моделированием систем на основе более мелких их элементов, частей и составляющих. Одним из методов расчета, который при этом используется, является метод конечных элементов (МКЭ). Реализация таких подходов при расчетах и исследованиях сложных систем и элементов, учитывая большое число составляющих элементов, число которых может быть очень большим, невозможно без использования компьютерных программ, созданных на базе современных методов расчета, и программных комплексов (ПК), выполняющих и расчет, и исследование (анализ), и проектирование систем. К таким компьютерным комплексам относятся ANSYS, Nastran, SolidWorks и другие.

Для изучения численных методов, их реализации и решения простых задач можно использовать компьютерный пакет прикладной математики MathCad.

При решении задач численными методами следует иметь в виду, что эти методы являются приближенными и при их использовании погрешности расчетов могут быть достаточно большими, поэтому важное значение имеет оценка достоверности решений и их соответствие действительной работе рассматриваемых объектов, что может выполняться как с использованием более точного моделирования, так и экспериментальной проверкой результатов.

В процессе изучения курса «Численные методы механики» и выполнения лабораторных работ у обучающихся формируются следующие компетенции (способности осуществлять профессиональную деятельность, БПК-10):

- способность применять численные методы и выполнять исследование (анализ) деталей, узлов и механизмов;
- владение методами математического (компьютерного) моделирования с использованием программно-вычислительных комплексов (ПК) и автоматизированных систем проектирования машиностроительных систем;
- применяя аналитические и численные методы, в том числе МКЭ, решать профессиональные задачи в машиностроении.

В данных методических указаниях рассматривается использование компьютерного пакета прикладной математики MathCad и применение ПК SolidWorks к задачам проектирования, расчета и исследования деталей, узлов и механических систем (механизмов). В рамках выполнения отдельных лабораторных работ рассмотрено создание (моделирование), проектирование, расчет и исследование прочности, деформативности, работы и поведения (движение-анимация) фермы, опорного узла, плоскогубцев /пассатижей, винта и узла карданной передачи.

Цель выполнения рассматриваемых лабораторных работ – изучить применение средств ПК SolidWorks для создания, проектирования, расчета и исследования деталей, узлов и механических систем (механизмов).

Материал при описании лабораторных работ излагается в последовательности, соответствующей порядку выполнения работ.

1 АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПРОЕКТИРОВАНИЯ SOLIDWORKS

1.1 Общая характеристика

Система автоматизированного проектирования SolidWorks содержит широкий набор функций трехмерного моделирования пространственных твердотельных и деформируемых объектов, направленных на создание единых электронных моделей деталей, сборочных узлов из этих деталей и механических систем в целом.

Система SolidWorks включает базовые конфигурации SolidWorks Standart, SolidWorks Professional, SolidWorks Premium, а также различные прикладные модули: для инженерных расчетов – SolidWorks Simulation Standart, SolidWorks Simulation Professional, SolidWorks Flow Simulation, для анализа технологичности – SolidWorks Plastics и другие.

Система SolidWorks позволяет осуществлять:

- гибридное параметрическое моделирование – твердотельное моделирование, моделирование поверхностей, каркасное моделирование, а также их комбинации;

- проектирование деталей с учетом специфики и способов изготовления – пресс-формы, штамповка, литье и т. п.

- проектирование сборок.

Система SolidWorks содержит:

- *библиотеки проектирования*, включая библиотеки: физических свойств материалов; текстур и штриховок; типовых конструктивных элементов; стандартных деталей и узлов; прокатного сортамента; элементов листовых деталей;

- *экспертные системы* для поиска оптимальных решений; редактирования 3D-моделей и сборок, стандартных компонентов; анализа сопряжений сборок.

Система SolidWorks позволяет:

- выполнять инженерный анализ, включая расчеты прочности, массово-инерционных характеристик, кинематики и динамики механизмов;

- проводить анализ технологичности моделей;

- оформлять чертежи;

- создавать анимации механизмов.

Система SolidWorks позволяет моделировать трехмерные объекты практически любой степени сложности. При этом в программе предусмотрено создание трех видов трехмерных моделей:

твердотельная модель – трехмерная электронная геометрическая модель, представляющая форму пространственного изделия в виде сплошного твердого либо деформируемого тела;

поверхностная модель – трехмерная электронная геометрическая модель, представленная рядом ограниченных поверхностей, определяющих форму изделия в пространстве;

каркасная модель – трехмерная электронная геометрическая модель, представленная пространственным набором (композицией) точек, отрезков и кривых, определяющих в пространстве форму изделия.

По накладываемым геометрическим взаимосвязям и простановке размерных взаимосвязей для деталей и между деталями электронные модели классифицируют следующим образом:

редактируемые – модели деталей, в которых размерные взаимосвязи не связаны между собой и изменение одного или нескольких значений размерных взаимосвязей приводит к планируемым изменениям формы моделей деталей;

нередатируемые – модели деталей, в которых размерные взаимосвязи не связаны между собой, но изменение одного или нескольких значений их приводит к непредсказуемым изменениям формы моделей деталей;

частично связанные – модели деталей, в которых несколько размерных взаимосвязей связаны между собой или они образуют несколько групп связанных размерных взаимосвязей, которые между собой не связаны;

полностью связанные – модели деталей, в которых все размерные взаимосвязи связаны между собой и зависят от одного значения основной (доминирующей) размерной взаимосвязи.

Система SolidWorks позволяет выполнять построение электронных моделей деталей, используя различные пути (последовательности) построения, определяющие стратегию построения электронных моделей.

Система SolidWorks 2018 использует ленточный интерфейс, структура которого показана ниже на рисунке и представлена панелями команд, разделенных вкладками.

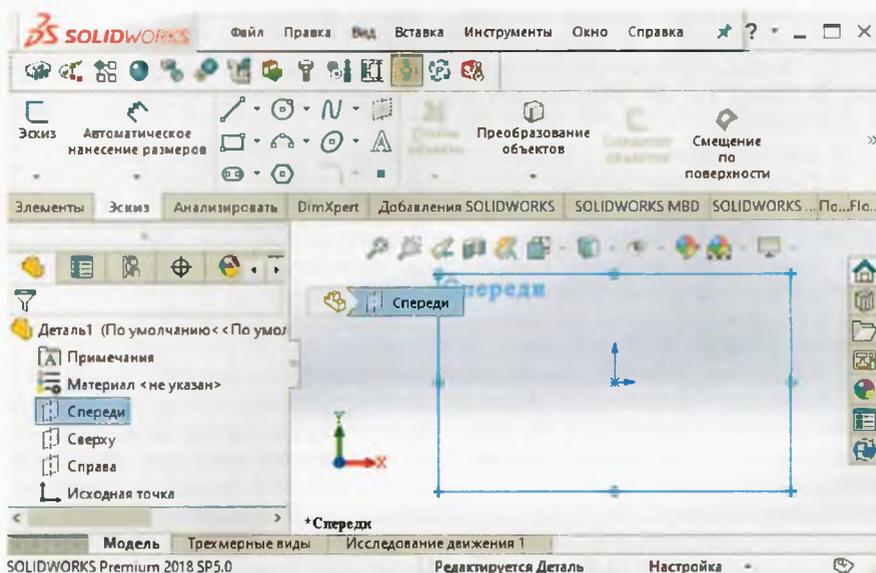


Рисунок 1.1 – Интерфейс программы SolidWorks

Основные элементы интерфейса:

1. **Кнопка «SolidWorks»** – представляет доступ к командам работы с файлами (создать, отрыгнуть, сохранить, печатать файл и т. д.) и к настройкам и параметрам систем SolidWorks. Команды становятся доступными при наведении курсора с помощью мыши.

2. **Панель команд** – элемент интерфейса, в котором сгруппированы команды и инструменты. Панель команд может располагаться в любом месте поля интерфейса.

3. **Панель «Быстро доступа»** – панель команд, в которой сгруппирован набор наиболее используемых команд.

4. **Диспетчер задач (Command Manager)** – основной элемент ленточного интерфейса.

5. **Вкладка** – элемент ленточного интерфейса, в котором сгруппированы определенные наборы панелей команд.

6. **Команда** – элемент интерфейса, позволяющий запустить действие, которое необходимо выполнить.

7. **Панель «Дерево построений»** – панель команд, в которой сгруппированы команды и инструменты, позволяющие вносить изменения в свойства, в параметры и корректировать созданные объекты. Панель разделена на вкладки, основные из которых:

7.1. **Вкладка «Дерево конструирования» (Feature Manager)** – отображает структуру моделей – детали, сборочной единицы или электронного чертежа.

7.2. **Вкладка «Менеджер свойств» (Property Manager)** – предназначена для настройки свойств и других параметров команд в SolidWorks.

7.3. **Вкладка «Менеджер конфигурации» (Configuration Manager)** – служит для создания, выбора и просмотра конфигураций моделей, деталей и сборок в документе.

8. **Строка состояния** – отражает информацию о выполняемых задачах.

9. **Панель «Управляемый просмотр»** – содержит команды навигации и отображения объектов в графическом окне.

10. **Панель задач** – отображает команды, обеспечивающие доступ к ресурсам, библиотекам повторно используемых элементов проектирования SolidWorks, к видам и другим объектам и сведениям системы.

11. **Графическое окно** – область отображения объектов в SolidWorks.

1.2 Общие сведения о проектировании конструкций в SolidWorks

SolidWorks – современное решение для автоматизации конструкторской и технологической подготовки производства, система создает удобную интегрированную среду трехмерного проектирования, охватывая все стадии разработки продукции. Программный комплекс (ПК) SolidWorks позволяет построить трехмерную твердотельную параметрическую модель деталей, а также сборочного узла и выполнить статический расчет в SolidWorks Simulation.

Деталью в SolidWorks называется трехмерный объект, состоящий из некоторого количества элементов. Элементы – это отдельные геометрические формы, в сочетании образующие деталь. Основные формообразующие элементы – бобышки и вырезы строятся на базе плоских эскизов. Другие элементы – оболочки, скругления, фаски преобразуют уже существующую 3D-модель.

Для проектирования деталей выполняется сначала создание эскиза на плоскости, затем по эскизу создаётся объёмная модель детали при помощи инструментов: «Вытянутая бобышка», «Повернутая бобышка», «По траектории», а далее, при необходимости, вырезаются отверстия или выполняются скругления кромок.

Детали объединяются в сборки, используя необходимые сопряжения. Существуют сборки двух типов: первый тип – полностью определенная сборка, в которой зафиксированы все степени свободы; второй тип – это сборки, в которых некоторые степени свободы оставлены незафиксированными, так что некоторые компоненты можно перемещать или вращать. Эти типы сборок используются для механизмов.

К детали/сборке предъявляются такие требования, как прочность, жёсткость, виброустойчивость, надёжность, технологичность. Эти требования называются критериями работоспособности.

✓ Прочность – способность сопротивляться нагрузкам, не разрушаясь и не имея при этом больших пластических деформаций. Это один из главных критериев.

✓ Жёсткость – это способность детали сопротивляться изменению формы под действием сил.

✓ Виброустойчивость. Вибрация вызывает дополнительные переменные напряжения и приводит к усталостному разрушению деталей. Особенно опасными являются резонансные колебания.

✓ Надёжность – свойство объекта выполнять заданные функции, сохраняя значения установленных эксплуатационных показателей в требуемых пределах.

✓ Технологичность – одна из комплексных характеристик сборочного узла, которая выражает удобство его производства, ремонтпригодность и эксплуатационные качества.

Инструкции для создания деталей и сборок в SolidWorks

Последовательность проектирования конструкций:

– выбор конструктивной плоскости для создания двумерного эскиза (Сверху, Спереди, Справа);

– преобразование эскиза в твердотельный элемент («Вытянутая бобышка», «Повернутая бобышка», «По траектории»);

– формирование детали из различных элементов, компоновка созданных деталей в сборку.

При этом гибкие инструменты конструктора SolidWorks позволяют изменять значения любого размера, накладывать взаимосвязи на взаимное расположение объектов в течение всего процесса проектирования.

Эскиз состоит из некоторого числа простейших геометрических объектов: отрезков, сплайнов, дуг и т. п., соединенных между собой. Построение эскизов основано на применении различных инструментов рисования, создания взаимосвязей и задания размеров. Плоский эскиз можно создавать на любой плоскости (Спереди, Сверху или Справа), на плоскости, созданной инструментами «Справочной геометрии»; на плоских гранях твердотельных объектов.

В SolidWorks существует возможность создавать **трехмерные эскизы**. Графические объекты (трехмерные линии, сплайны, точки) в таких эскизах

располагаются в трехмерном пространстве и не связаны с определенными плоскостями эскизов.

Взаимосвязи представляют собой ограничения на расположения плоских объектов эскиза. Основной целью добавления взаимосвязей является уменьшение числа управляющих размеров.

Эскиз может находиться в одном из трех состояний:

1. **Полностью определенный** – все линии и кривые в эскизе, а также их расположение однозначно описываются размерами и (или) взаимосвязями. Цвет объектов эскиза – черный, в «Дереве построения» такой эскиз отображается без каких-либо значков.

2. **Переопределенный** – размеры или взаимосвязи находятся в противоречии либо дублируют друг друга. В переопределенном эскизе графические объекты, для которых не было найдено решение, имеют красный цвет, объекты, находящиеся в конфликте друг с другом, – желтый. В «Дереве построения» такой эскиз отображается со значком «+».

3. **Недоопределенный** – не определены некоторые размеры или взаимосвязи, их можно изменять. Цвет объектов эскиза – синий. В «Дереве построения» такой эскиз отображается со значком «-».

Сборкой называется документ, в котором детали и другие сборки сопряжены друг с другом в единую конструкцию. Сборку можно создавать, используя проектирование «снизу вверх», проектирование «сверху вниз» или комбинацию этих двух методов.

Файл сборки в SolidWorks (расширение *.SLDASM) не содержит в себе описание геометрии деталей. Без полного комплекта составляющих деталей, сборок (узлов), типовых библиотечных элементов файл сборки является пустым объектом. Добавление компонента в сборку создает связь между ними. Изменения в компоненте сборки автоматически отражаются на сборке.

В общем случае сборочное изделие представляет собой многоуровневую древовидную структуру. Файл сборки, как и реальное изделие, может включать не только отдельные детали, а также и другие сборки (узлы). Уровень вложенности при этом не ограничен.

Общий принцип создания сборочной модели по методу «снизу вверх» полностью соответствует указанному процессу сборки. Предварительно необходимо построить трехмерные модели деталей, а затем объединить их в единую конструкцию путем наложения ограничений на пространственное положение объектов.

При проектировании «сверху вниз» трехмерные модели деталей разрабатываются в контексте одной сборки на основе геометрических элементов других деталей. В соответствии с данным методом первоначально создаваемая сборка является исходной информацией для выполнения последующей детализации.

После размещения деталей и узлов в сборке необходимо задать **сопряжения** между ними – геометрические взаимосвязи между компонентами сборки. При добавлении сопряжений следует определить допустимые направления линейного или вращательного движения компонентов. Последовательность, в которой добавляются сопряжения в группу, значения не имеет, все сопряжения решаются одновременно.

Для создания сопряжений необходимо активизировать команду «Условия сопряжения» на панели инструментов «Сборки», выбрать сопрягаемые поверхности деталей, указать тип сопряжения.

Системой поддерживаются следующие типы сопряжений:

✓ Совпадение – выбранные грани, плоскости и кромки (в комбинации друг с другом или с одной вершиной) разделяют одну и ту же бесконечную линию.

✓ Параллельность – выбранные элементы одинаково направлены и находятся на постоянном расстоянии.

✓ Перпендикулярность – выбранные элементы располагаются под углом 90° друг к другу.

✓ Касательность – выбранные элементы касаются (как минимум один элемент должен быть цилиндрическим, коническим или сферическим).

✓ Концентричность – выбранные элементы разделяют центральную точку.

✓ Расстояние – выбранные элементы расположены на заданном расстоянии.

✓ Угол – выбранные элементы расположены под заданным углом.

Физическая динамика позволяет увидеть реалистичное движение компонентов сборки. Все детали отождествляются с абсолютно упругими телами и при попытке смещения/поворота одного из них выполняется попытка повторить кинематику движений всего механизма, описанную множеством сопряжений (т. е. происходит перемещение или вращение всей цепочки затрагиваемых компонентов в пределах допустимых степеней свободы).

Для расчёта на прочность в SolidWorks Simulation необходимо последовательное выполнение основных шагов:

1. Задать материал для детали или сборки.

2. Задать набор контактов компонентов, которые указываются в разделе «контакт компонентов», для сборочных узлов.

3. Определить виды и места креплений (ограничений) конструкции.

4. Приложить заданную внешнюю нагрузку.

5. Построить сетку для исследования. Создание сетки зависит от активных параметров формирования сетки.

6. Запустить исследование.

Использование SolidWorks Simulation даёт возможность быстро и точно получить эпюры напряжений, перемещений, деформаций детали или сборки. Имеется возможность проработки разных вариантов нагружения, закрепления, контакта компонентов сборки или механизмов. Это даёт возможность определить наиболее подходящий материал деталей, размеры конструктивных элементов, варианты крепёжных элементов, а также при расчёте оптимизировать характеристики конструкции. Возможность получить визуализированные эпюры напряжений, перемещений, деформаций и запаса прочности позволяет наиболее точно определить места опасных сечений, изменить характеристики конструкции на стадии проектирования без затрат на изготовление и испытание опытных образцов.

После выполнения статического расчёта и получения необходимого запаса прочности, если конструкция подвергается динамическим нагрузкам, можно

перейти к расчёту усталостной прочности, который подразумевает действие циклической нагрузки. Это необходимо для того, чтобы проверить, выдержит ли данная конструкция заданное количество циклов нагружения.

Следующим шагом в разработке конструкции является частотный анализ. Каждая конструкция имеет тенденцию вибрировать на определенных частотах, называемых собственными. Каждая частота собственных колебаний ассоциируется с определенной формой, называемой формой колебаний, которую модель стремится принимать при вибрировании на этой частоте. Когда конструкция возбуждена динамической нагрузкой на частоте, которая совпадает с одной из ее собственных частот (такое состояние называется резонансом), в конструкции возникают большие перемещения и напряжения. Частотные исследования в SolidWorks Simulation могут помочь избежать резонанса.

По данным модели детали или сборки, используя инструмент «Создать чертежи из детали / сборки», есть возможность сформировать листы для выпуска пакета чертежей готовой продукции. А также возможность создания спецификаций в автоматическом режиме, что очень экономит время на проектирование и корректировку сборочных узлов.

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Применение общей системы уравнений равновесия механики к расчету статически определимых ферм

Задачи работы:

- определить усилия в статически определимой ферме;
- создать модель фермы и выполнить ее исследование на прочность и деформативность в ПК SolidWorks.

Выполнение работы (излагается в порядке выполнения работы)

1. Рассмотрим расчет статически определимой фермы, представленной на рисунке 1.2, статическим методом. Внешнюю нагрузку в виде сосредоточенных сил P_1, P_2, P_3, P_4 приложим в узлы верхнего пояса фермы. Пронумеруем стержни фермы (1–13) и обозначим реакции в опорах (R_A, R_B, H_B).

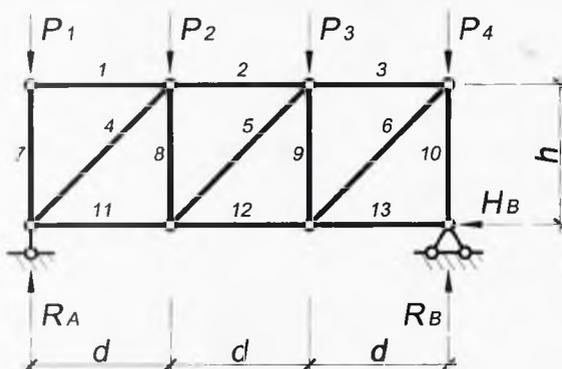


Рисунок 1.2 – Расчетная схема фермы ферма

Вырезая каждый узел фермы, обозначим неизвестные продольные усилия в стержнях фермы N_1, N_2, N_3, \dots и т. д. (рисунок 1.3).

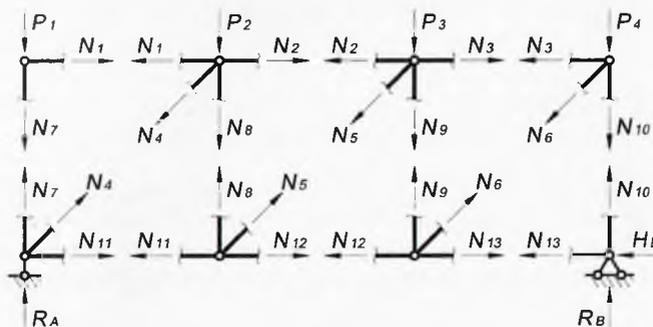
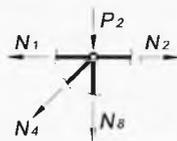


Рисунок 1.3 – Расчетная схема фермы с неизвестными усилиями N

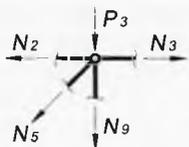
Составим уравнения равновесия для каждого узла фермы:



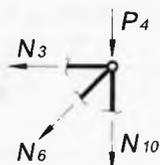
$$\begin{aligned} \Sigma X = 0; & \quad N_1 = 0; \\ \Sigma Y = 0; & \quad -P_1 - N_7 = 0; \end{aligned}$$



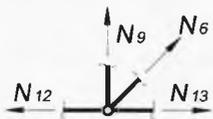
$$\begin{aligned} \Sigma X = 0; & \quad -N_1 - N_4 \cdot \cos \beta + N_2 = 0; \\ \Sigma Y = 0; & \quad -P_2 - N_4 \cdot \sin \beta - N_8 = 0; \end{aligned}$$



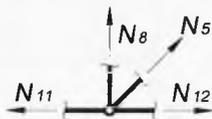
$$\begin{aligned} \Sigma X = 0; & \quad -N_2 - N_5 \cdot \cos \beta + N_3 = 0; \\ \Sigma Y = 0; & \quad -P_3 - N_5 \cdot \sin \beta - N_9 = 0; \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \Sigma X = 0; & \quad -N_3 - N_6 \cdot \cos \beta = 0; \\ \Sigma Y = 0; & \quad -P_4 - N_6 \cdot \sin \beta - N_{10} = 0; \end{aligned}$$



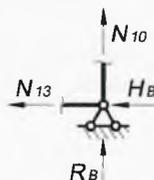
$$\begin{aligned} \Sigma X = 0; & \quad -N_{12} + N_6 \cdot \cos \beta + N_{13} = 0; \\ \Sigma Y = 0; & \quad N_9 + N_6 \cdot \sin \beta = 0; \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \Sigma X = 0; & \quad -N_{11} + N_5 \cdot \cos \beta + N_{12} = 0; \\ \Sigma Y = 0; & \quad N_8 + N_5 \cdot \sin \beta = 0; \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \Sigma X = 0; & \quad N_4 \cdot \cos \beta + N_{11} = 0; \\ \Sigma Y = 0; & \quad R_A + N_4 \cdot \sin \beta + N_7 = 0; \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \Sigma X = 0; & \quad -N_{13} - H_B = 0; \\ \Sigma Y = 0; & \quad N_{10} + R_B = 0. \end{aligned}$$

Для определения усилий N_1, N_2, N_3, \dots и опорных реакций решаем систему уравнений, составленную из уравнений равновесия всех узлов фермы.

По результатам расчета следует выполнить статическую проверку равновесия всей фермы, в которую входят внешние нагрузки и опорные реакции:

$$\begin{aligned} \Sigma M_B = 0; & \quad R_A \cdot 3d - P_1 \cdot 3d - P_2 \cdot 2d - P_3 \cdot d = 0; \\ \Sigma M_A = 0; & \quad -R_B \cdot 3d + P_2 \cdot d + P_3 \cdot 2d + P_4 \cdot 3d = 0; \end{aligned} \quad \Sigma X = 0; \quad H_B = 0.$$

Расчеты произведем в системе компьютерной алгебры MathCad:

параметры фермы $d := 2\text{ м}$ $h := 2\text{ м}$

$$\cos := \frac{d}{\sqrt{d^2 + h^2}} \quad \sin := \frac{h}{\sqrt{d^2 + h^2}}$$

значения переменных

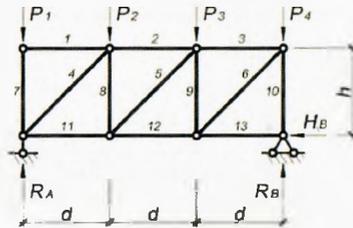
$$R_A := 0 \quad R_B := 0 \quad H_B := 0 \quad N_1 := 0 \quad N_2 := 0 \quad N_3 := 0$$

$$N_4 := 0 \quad N_5 := 0 \quad N_6 := 0 \quad N_7 := 0 \quad N_8 := 0$$

$$N_9 := 0 \quad N_{10} := 0 \quad N_{11} := 0 \quad N_{12} := 0 \quad N_{13} := 0$$

внешняя нагрузка

$$P_1 := 1\text{ кН} \quad P_2 := 1\text{ кН} \quad P_3 := 1\text{ кН} \quad P_4 := 1\text{ кН}$$



задание системы уравнений

Given

$$N_1 = 0$$

$$-P_1 - N_7 = 0$$

$$-N_1 - N_4 \cdot \cos + N_2 = 0$$

$$-P_2 - N_4 \cdot \sin - N_8 = 0$$

$$-N_2 - N_5 \cdot \cos + N_3 = 0$$

$$-P_3 - N_5 \cdot \sin - N_9 = 0$$

$$-N_3 - N_6 \cdot \cos = 0$$

$$-P_4 - N_6 \cdot \sin - N_{10} = 0$$

$$N_4 \cdot \cos + N_{11} = 0$$

$$R_A + N_4 \cdot \sin + N_7 = 0$$

$$-N_{11} + N_5 \cdot \cos + N_{12} = 0$$

$$N_8 + N_5 \cdot \sin = 0$$

$$-N_{12} + N_6 \cdot \cos + N_{13} = 0$$

$$N_9 + N_6 \cdot \sin = 0$$

$$-N_{13} - H_B = 0$$

$$N_{10} + R_B = 0$$

Поиск решения

$$\text{Find}(R_A, R_B, H_B, N_1, N_2, N_3, N_4, N_5, N_6, N_7, N_8, N_9, N_{10}, N_{11}, N_{12}, N_{13}) \rightarrow$$

2	0
2	0
0	1
0	2
0	2
-1	3
-1	4
$-\sqrt{2}$	5
0	6
$\sqrt{2}$	7
-1	8
0	9
-1	10
-2	11
1	12
1	13
1	14
0	15

кН

Проверка опорных реакций

$$R_A := 2\text{ кН} \quad R_B := 2\text{ кН} \quad H_B := 0\text{ кН}$$

$$R_A \cdot 3 \cdot d - P_1 \cdot 3 \cdot d - P_2 \cdot 2 \cdot d - P_3 \cdot d = 0$$

$$-R_B \cdot 3 \cdot d + P_2 \cdot d + P_3 \cdot 2 \cdot d + P_4 \cdot 3 \cdot d = 0$$

$$H_B = 0$$

2. Создание фермы и ее статический расчет в автоматизированной системе проектирования SolidWorks

2.1 Создаем новую деталь



На плоскости «Спереди» рисуем эскиз фермы и нанесем ее размеры.

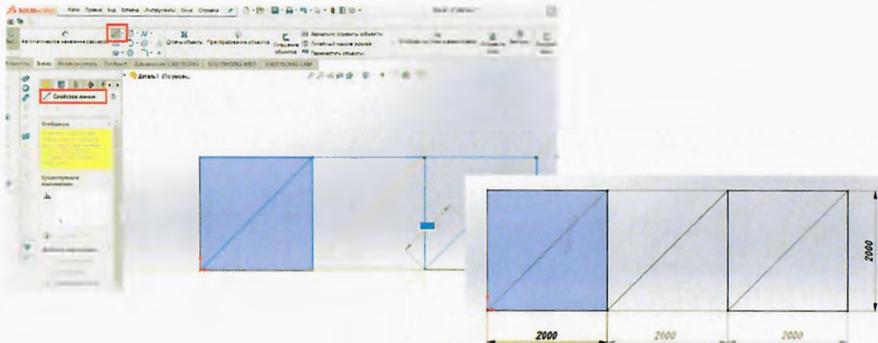


Рисунок 1.4 – Создание эскиза детали и его определение (задание размеров)

Затем в пункте меню «Вставка» активируем компоненты «Сварные детали», «Конструкции» (рисунок 1.5, 1.6).

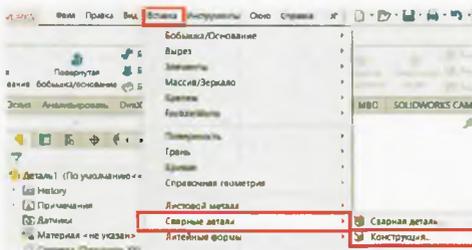


Рисунок 1.5 – Активация компонента «Конструкции»

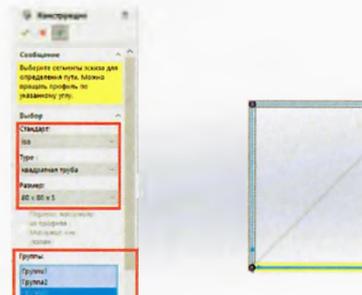


Рисунок 1.6 – Задание жесткости элементов

На вкладке «Конструкции» выбираем стандарт – «ISO»; тип – квадратная труба; размер профилей – 80x80x5. Создаем группу элементов для верхнего и нижнего поясов и для решетки фермы и закрепляем выбор, нажимая «ОК».

Для выполнения корректного расчета конструкции необходимо указать, как профили соединяются в углах – для этого используется команда «Отсечь/удлиннить», которая активируется:

- Вставка → Сварные детали → Отсечь/удлиннить;
- выбираются: элементы фермы, тип угла.

Нужно задать последовательно все углы для узлов конструкции фермы и определить их соединение профилей в углах, как представлено на рисунке 1.6.

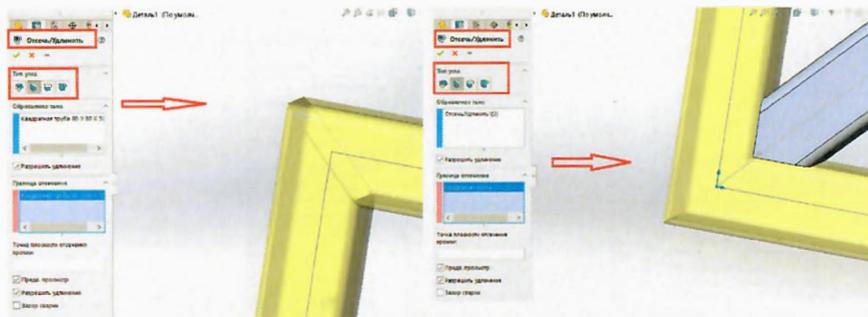


Рисунок 1.7 – Задание соединения углов конструкции

2.2 Для выполнения исследования фермы активируем на вкладке «Добавления» компонент «Simulation» («Исследование»), затем «Новое исследование».

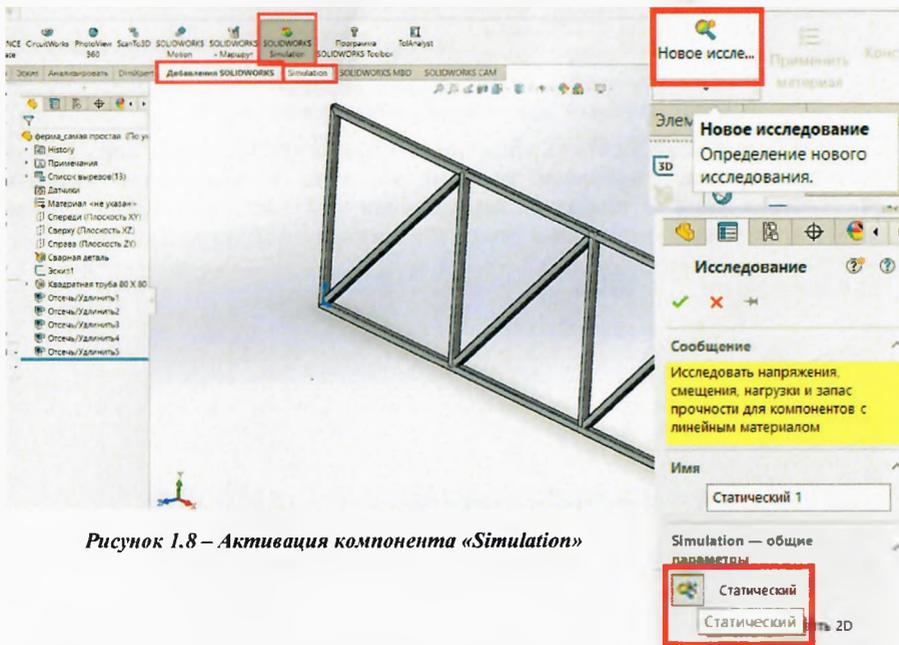


Рисунок 1.8 – Активация компонента «Simulation»

Из предложенных параметров выбираем параметр «Статический», после чего необходимо задать начальные параметры для выполнения исследования:

- материалы для детали / деталей (рисунок 1.9);
- ограничения по перемещениям для узлов или плоскостей (рисунки 1.10, 1.11);
- «тип контакта», если детали соединены между собой;
- внешние силы (рисунок 1.12): сосредоточенные, распределенные нагрузки;
- создать сетку по заданным параметрам.

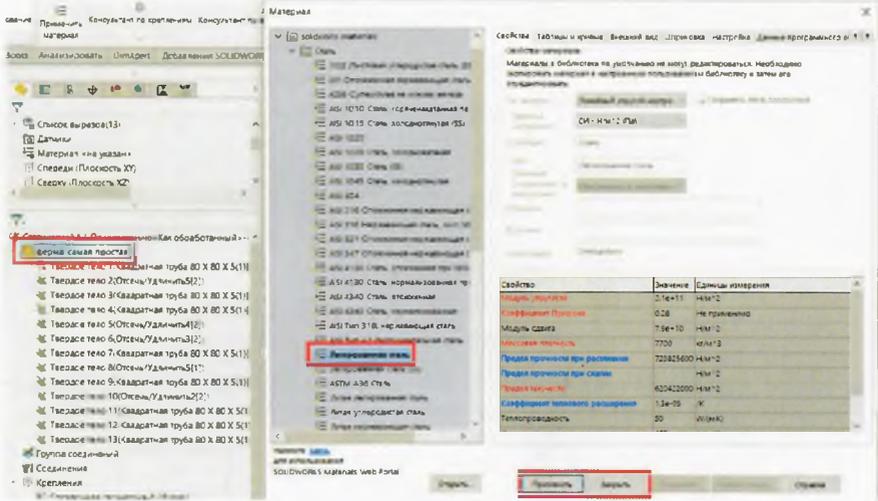


Рисунок 1.9 – Задание материала для элементов фермы

В свойствах компонента «Крепления» выбираем «Использовать справочную геометрию», далее выбираем мышкой все узлы и необходимо выбрать плоскость, в которой возможны перемещения – «Плоскость Спереди», далее необходимо указать – смещения равны «0» перпендикулярно плоскости.

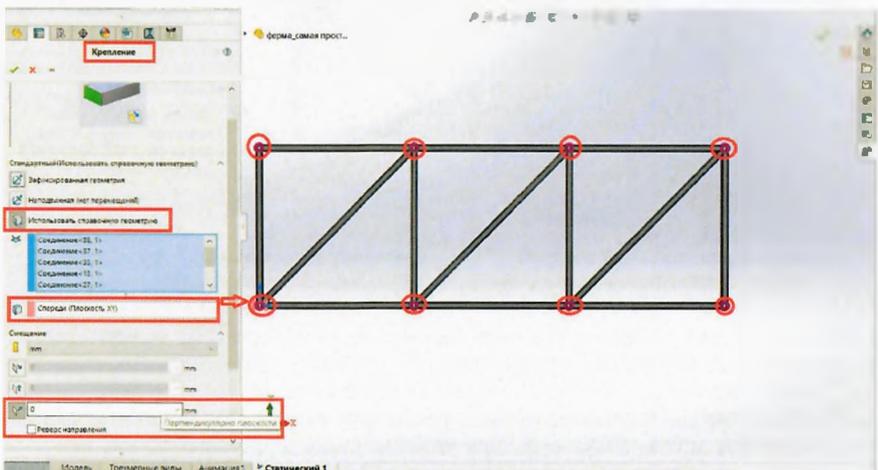
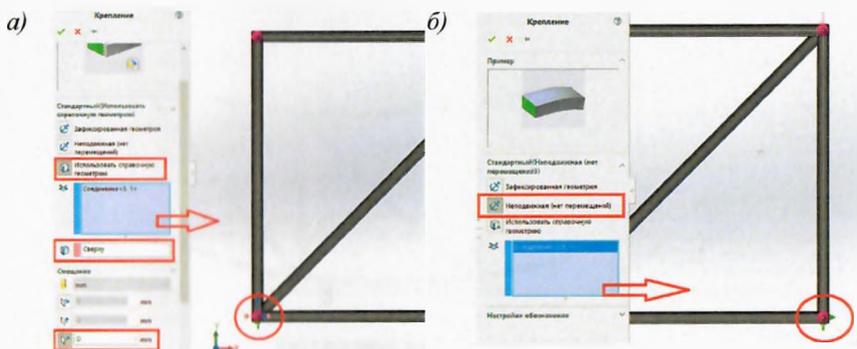


Рисунок 1.10 – Моделирование шарнирных узлов

Указываем ограничения перемещений для опорных узлов:



а) шарнирно-подвижная опора;
 б) шарнирно-неподвижная опора

Рисунок 1.11 – Назначение связей опорных узлов

В свойствах статического исследования нажимаем правой кнопкой на «внешние нагрузки» из выпадающего списка выбираем:

«Сила» → задаем плоскость: «Сверху» → значение силы – «150 кН» (перпендикулярно плоскости сверху) → и закрепляем выбор нажатием «ОК».

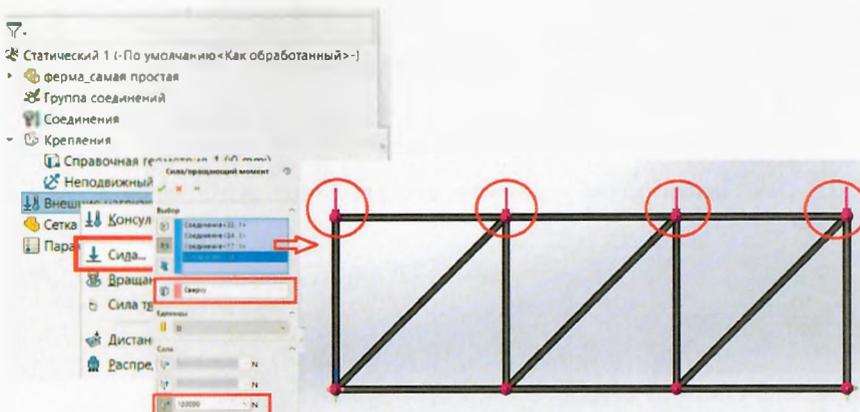


Рисунок 1.12 – Задание внешней нагрузки на ферму

От точности описания расчетной модели зависит правильность полученного результата.

Когда все начальные условия определены, запускаем исследование.

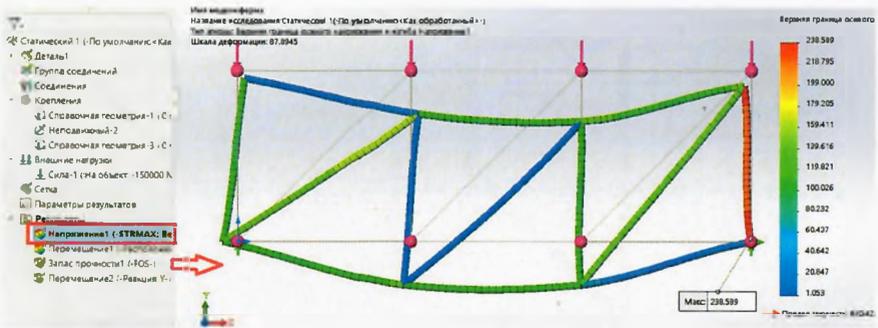


Рисунок 1.13 – Эпюра напряжений

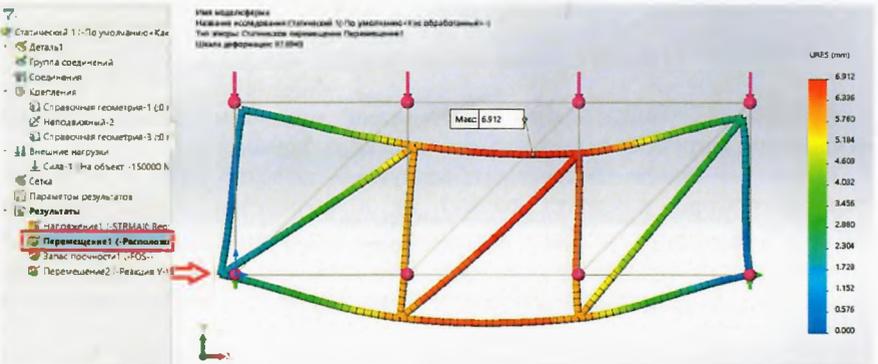


Рисунок 1.14 – Эпюра перемещений

2.3 Для оценки запаса прочности выбираем этот пункт меню в разделе «Результаты».

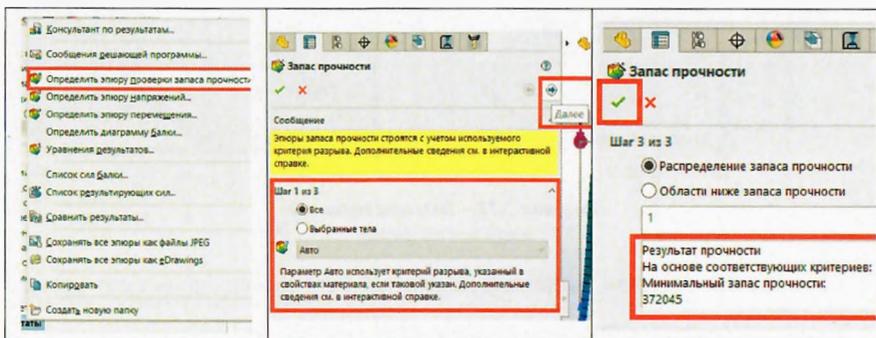


Рисунок 1.15 – Эпюра проверки запаса прочности

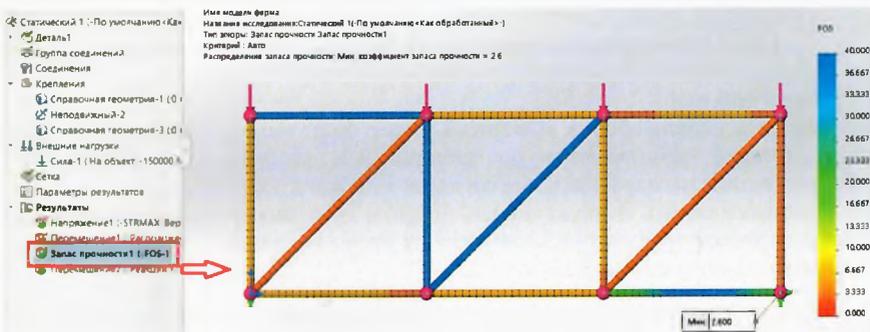


Рисунок 1.16 – Оценка запаса прочности фермы

Коэффициент запаса прочности для в общем случае должен быть больше 1, что означает выполнение условия прочности в сечении. Если коэффициент запаса прочности меньше 1, это свидетельствует о разрушении элемента или конструкции в этом сечении.

2.4 Для определения значений опорных реакций в свойствах «Этюры перемещений» выбираем отображения «Силы реакций Y», вид «N» и нажимаем «Ok» (рисунок 1.17). Используя функцию «Зондирование», выделим узлы, в которых будут действовать реакции, и получим табличку со значениями реакций (рисунок 1.18).

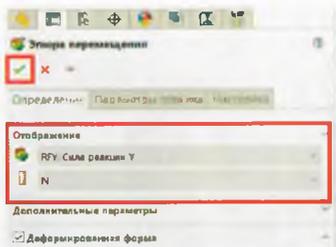


Рисунок 1.17 – Этюра перемещений

Значения реакций в опорных узлах равны по 300 кН. Проверка:

$$\sum F_y = 0; R_A + R_B - 4 \cdot F = 0; 300 + 300 - 4 \cdot 150 = 0. \text{ Реакции найдены верно.}$$

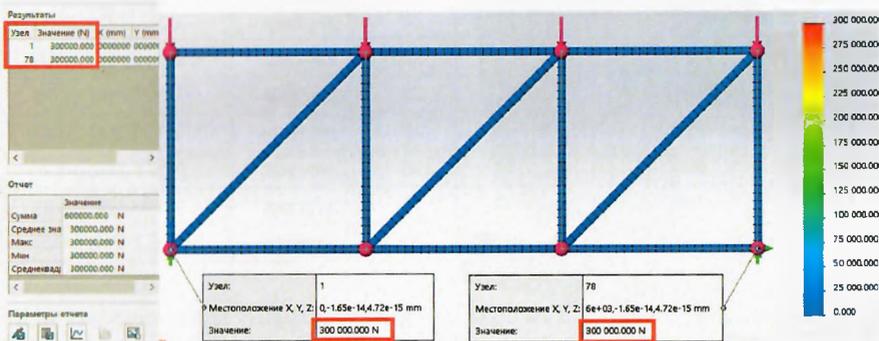


Рисунок 1.18 – Значение реакций в опорных узлах

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Проектирование опорного узла с болтовыми соединениями

Задачи работы:

- создать модель сборки «Опорный узел с болтовыми соединениями» (размеры деталей принимаются по таблице 2.1, стойки – по ГОСТу/СТО в соответствии с номером задания согласно таблице 2.1);
- оптимизировать данную модель по двум критериям: максимизация коэффициента запаса прочности и минимизация массы металла;
- оценить полученные результаты.

Таблица 2.1 – Числовые данные к выполнению лабораторной работы № 2

№	А, мм	В, мм	С, мм	Р, мм	d, мм	Стойка (сечение)	
1	250	280	380	40	12	двутавр	СТО АСЧМ 20-93
2	250	200	380	50	20	швеллер	ГОСТ 19425-74
3	200	150	350	30	10	двутавр	ГОСТ 26020-83
4	300	300	360	50	18	двутавр	ГОСТ 26020-83
5	220	250	300	45	15	двутавр	СТО АСЧМ 20-93
6	320	300	450	35	23	двутавр	СТО АСЧМ 20-93
7	300	280	350	30	14	швеллер	ГОСТ 19425-74
8	250	350	300	35	20	двутавр	ГОСТ 26020-83
9	400	380	500	60	24	двутавр	СТО АСЧМ 20-93
10	350	300	350	50	20	двутавр	ГОСТ 26020-83
11	230	200	350	25	8	швеллер	ГОСТ 8240-89
12	350	300	380	60	18	двутавр	ГОСТ 26020-83
13	360	200	350	50	25	двутавр	ГОСТ 26020-83
14	320	280	400	35	20	двутавр	СТО АСЧМ 20-93
15	360	350	380	40	20	двутавр	СТО АСЧМ 20-93
16	380	300	320	30	20	двутавр	СТО АСЧМ 20-93
17	320	350	360	60	25	двутавр	СТО АСЧМ 20-93
18	330	300	420	50	20	двутавр	ГОСТ 26020-83
19	250	380	400	40	12	двутавр	СТО АСЧМ 20-93
20	350	200	430	50	20	швеллер	ГОСТ 19425-74

Выполнение работы:

1. В соответствии с ГОСТам/СТО согласно сортаменту металлических изделий [7] вычерчиваем по размерам эскиз сечения (двутавр или швеллер) стойки (рисунок 2.1) (для размеров эскиза при этом необходимо использовать глобальные переменные) и создаем параметрическую 3D-модель детали «Стойка» (рисунок 2.2). При этом высота стойки принимается равной $3 \cdot A$, опорная часть проектируется произвольно, например, толщиной 100 мм, на одной из

граней детали выполняются четыре отверстия под крепежные элементы детали «Полка».

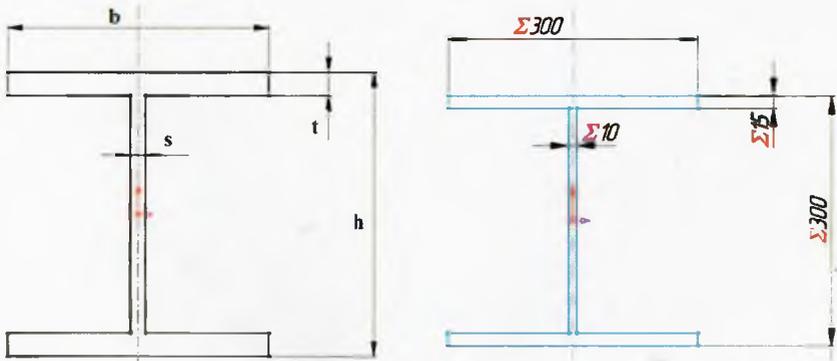


Рисунок 2.1 – Эскиз двутавра для детали «Стойка»

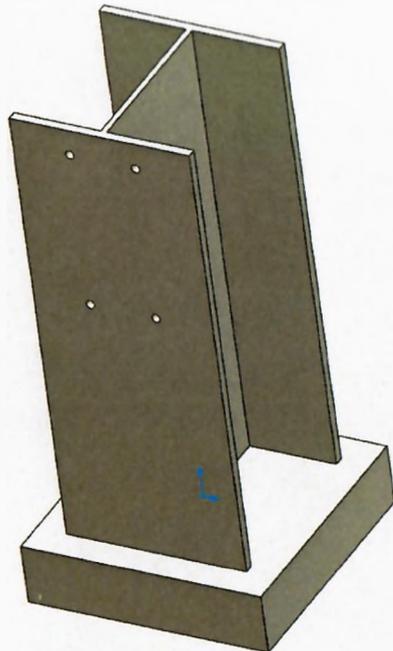
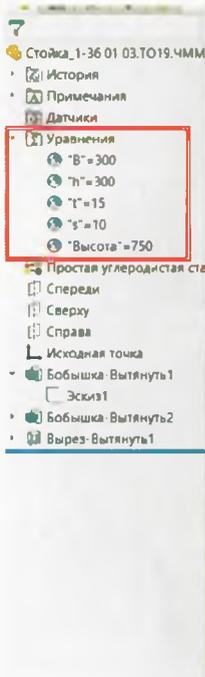


Рисунок 2.2 – Твёрдотельная параметрическая модель детали «Стойка»

2. Вычерчиваем плоский эскиз и создаем параметрическую 3D-модель детали «Шаровой палец» (рисунок 2.3) по параметрам A , B , C , R , d (см. таблицу 2.1).

Деталь «Шаровой палец», состоящий из шара (радиусом R) и стержня (радиусом d) с двумя кольцами (радиусом $2d$), получаем путем вращения эскиза вокруг центральной оси (рисунок 2.3). Для крепления детали к полке предусматриваем паз (рисунок 2.4): эскиз паза выполняем в виде трапеции высотой 10 мм, скошенной под углом 60° , с основаниями, представляющими собой дуги; после этого, используя команду «Вытянутый вырез», получаем паз. По центру шара проводим «Линию разреза», которая применяется в дальнейшем для задания нагрузки только на часть тела (на верхнюю полусферу).

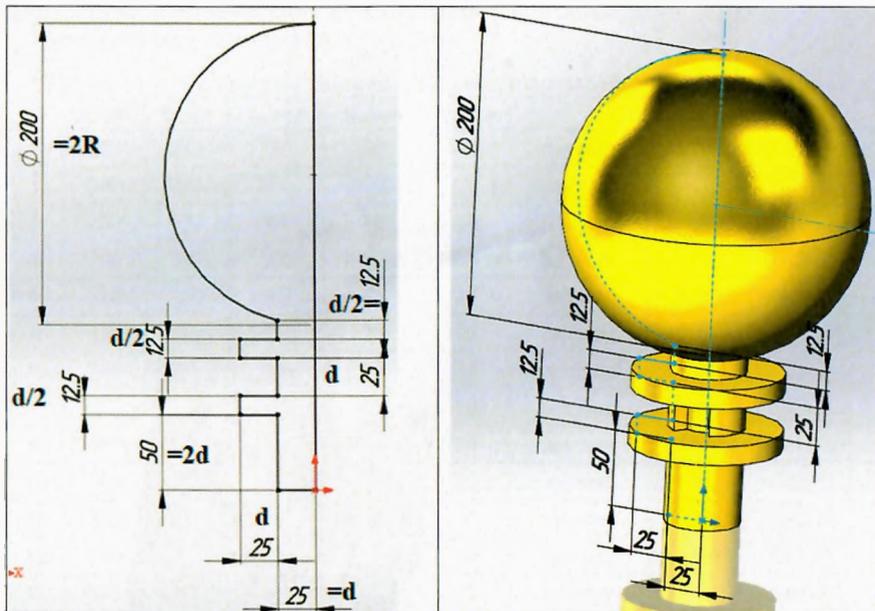


Рисунок 2.3 – Создание детали «Шаровой палец»

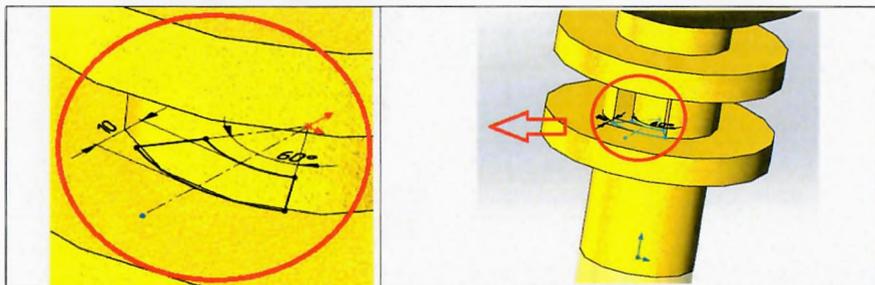


Рисунок 2.4 – Создание паза в детали «Шаровой палец»

Создаем деталь «Полка» (рисунок 2.5). Этапы создания детали показаны на рисунках 2.5–2.6. Параметры полки принимаем по данным из таблицы 2.1;

принимается: высота опорной пластины – A , ширина опорной пластины – B , вылет – C , толщина – d , диаметр отверстий – $2d$. Positionирование отверстий показано на рисунке, диаметры отверстий должны быть на 2 мм больше диаметров болтов. В нижней части полки нужно предусмотреть ребро жесткости, размеры которого принимаем произвольно (рисунок 2.6).

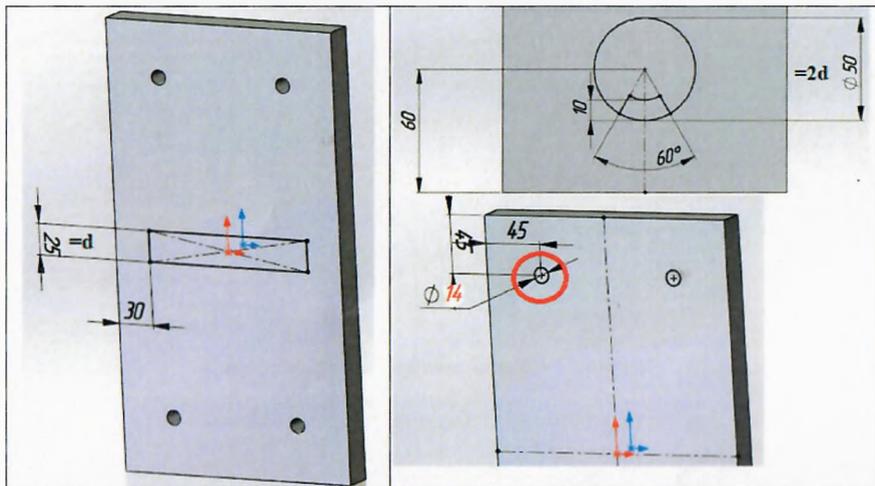


Рисунок 2.5 – Этапы создания детали «Полка»

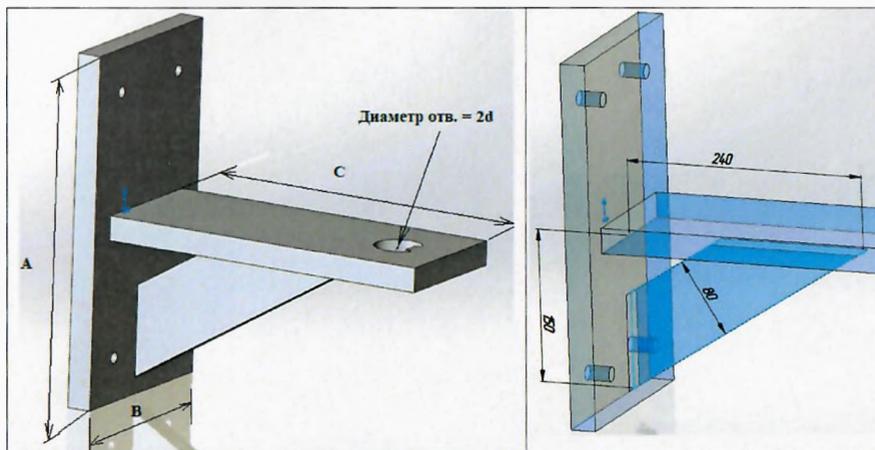


Рисунок 2.6 – Деталь «Полка»

Сборка «Опорный узел» (рисунок 2.8) состоит из компонентов: стойка, полка и шаровой палец, которые объединяем, используя условия сопряжения SolidWorks: «Совпадение», «Концентричность», «Параллельность», а затем, используя «Библиотеку проектирования» SolidWorks, раздел ToolBox, выполняем

крепление полки к стойке, устанавливая болты, шайбы и гайки в соответствующее положение (рисунок 2.7). Эти компоненты SolidWorks при расчете распознает и преобразует к болтам.

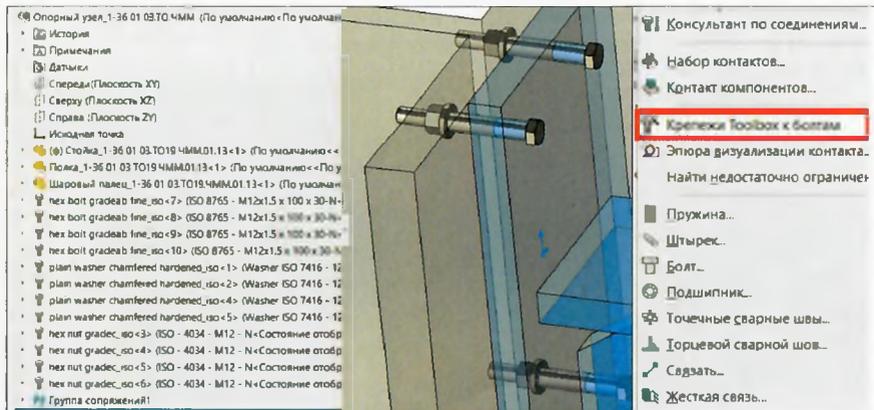
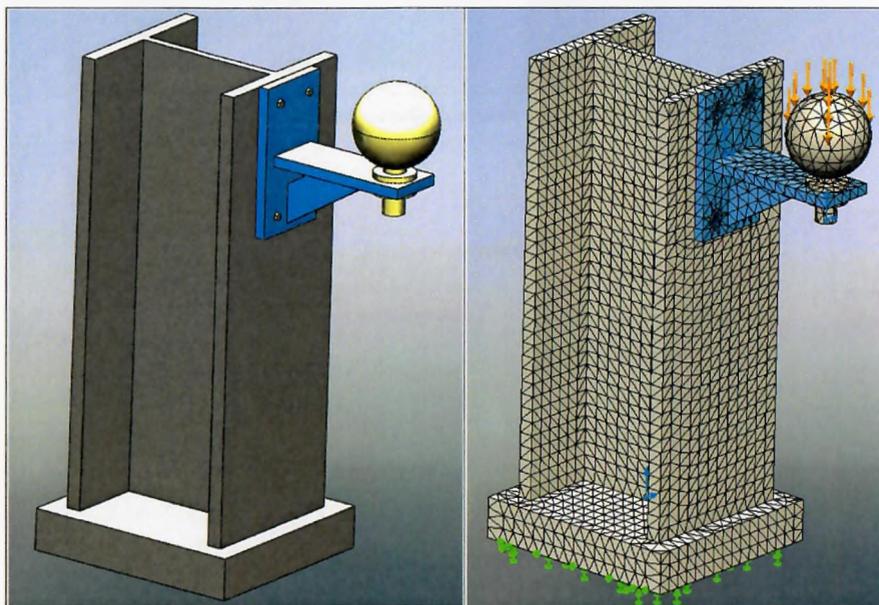


Рисунок 2.7 – Установка крепежных изделий



**Рисунок 2.8 – Сборка «Опорный узел»,
конечно-элементная модель**

3. Выполняем статический расчет сборки «Опонный узел»:

3.1. Активируем вкладку «Simulation» на закладке «Добавления SolidWorks».

3.2. Выбираем «Новое исследование» ► «Статический».

При этом крепления необходимо преобразовать к болтам: «Соединения» → «Крепежи ToolBox к болтам» (рисунок 2.7), для деталей «Стойка» и «Полка» устанавливаем контакт двух граней → «Нет проникновения»; и задается автоматически из базы SolidWorks параметр «Осевая нагрузка» (рисунки 2.9, 2.10).

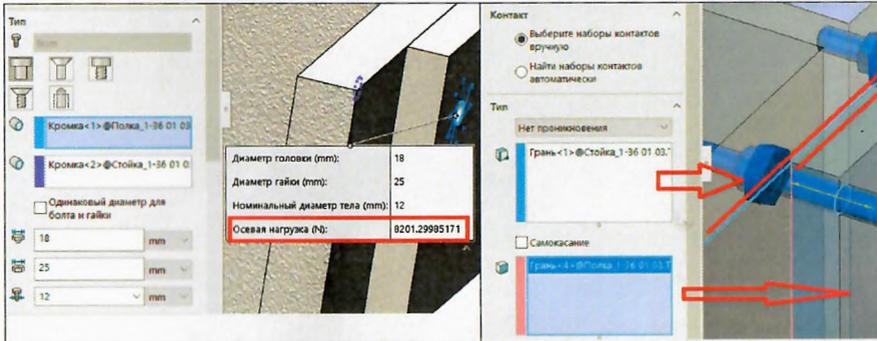


Рисунок 2.9 – Особенности учета крепежных изделий в расчете

Для компонентов сборки «Полка» и «Шаровой палец» также устанавливаем контакт «Нет проникновения», чтобы детали при расчете перемещались отдельно.

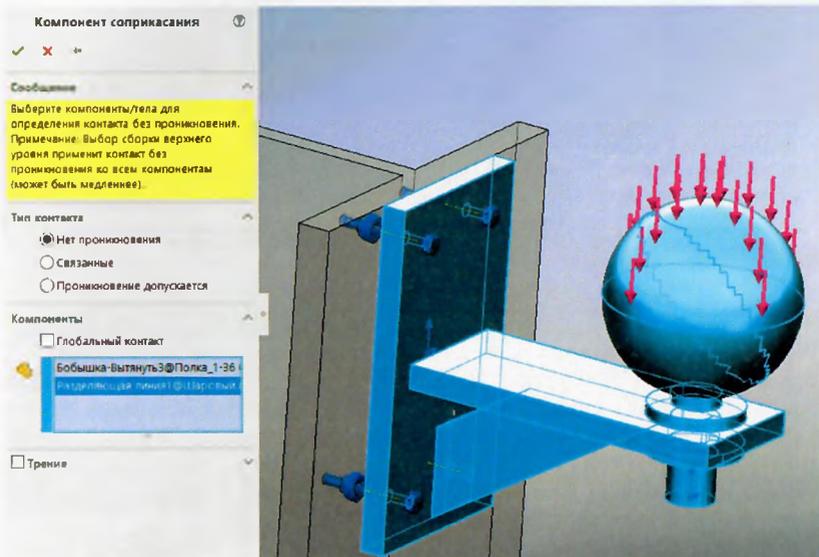


Рисунок 2.10 – Контакты компонентов «Полка» и «Шаровой палец»

3.3. Выбираем «Крепление» ► Задаем для детали «Стойка» жесткое крепление нижней грани – «Зафиксированная геометрия» (рисунок 2.11).

3.4. Выбираем «Внешние нагрузки» ► «Сила» ► внешняя нагрузка устанавливается на верхнюю часть полусферы шара детали «Шаровой палец».

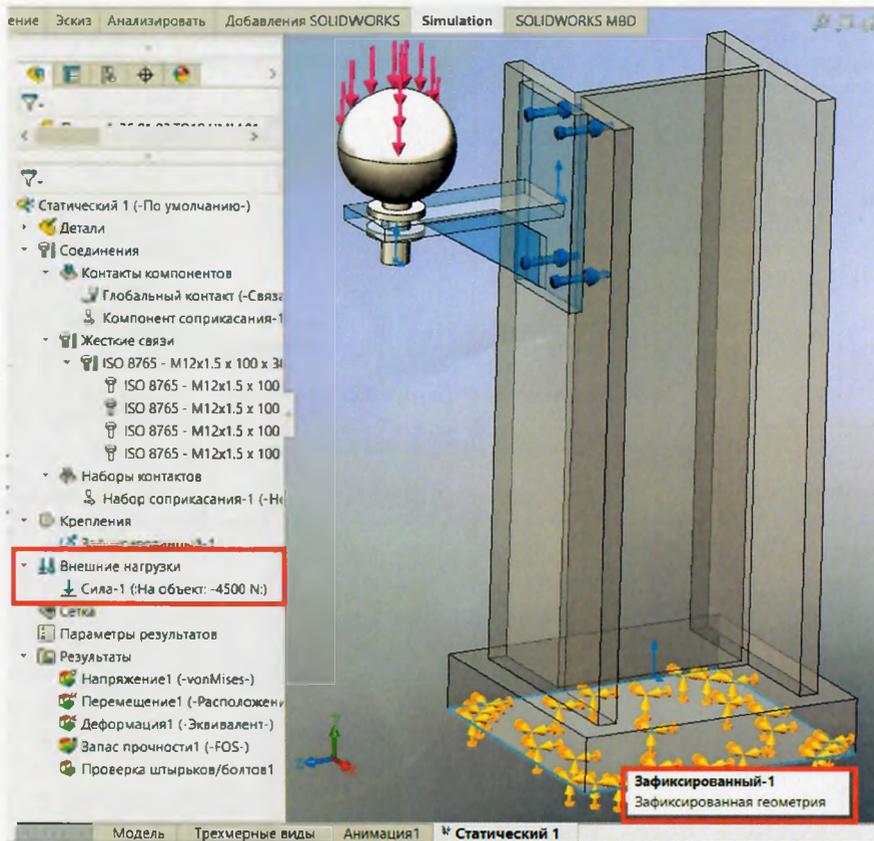


Рисунок 2.11 – Задание креплений и внешней нагрузки

3.5. Выбираем «Материал» ► «Легированная сталь» для деталей узла.

3.6. Активируем «Запустить исследование» ► и выводим дополнительно эпюру коэффициента запаса прочности и эпюру проверки штырьков / болтов; при этом должны выполняться одновременно два условия: $2 \leq FOS \leq 3$ для сборки и $FOS \geq 2$ для болтов; если условия не выполняются, необходимо изменить внешнюю нагрузку или диаметры крепежных изделий и заново провести расчет, чтобы определить несущую способность опорного узла.

Результаты расчета представлены на рисунке 2.12, оптимальная нагрузка $F = 4500$ Н, а диаметр крепежных изделий болтов М12.

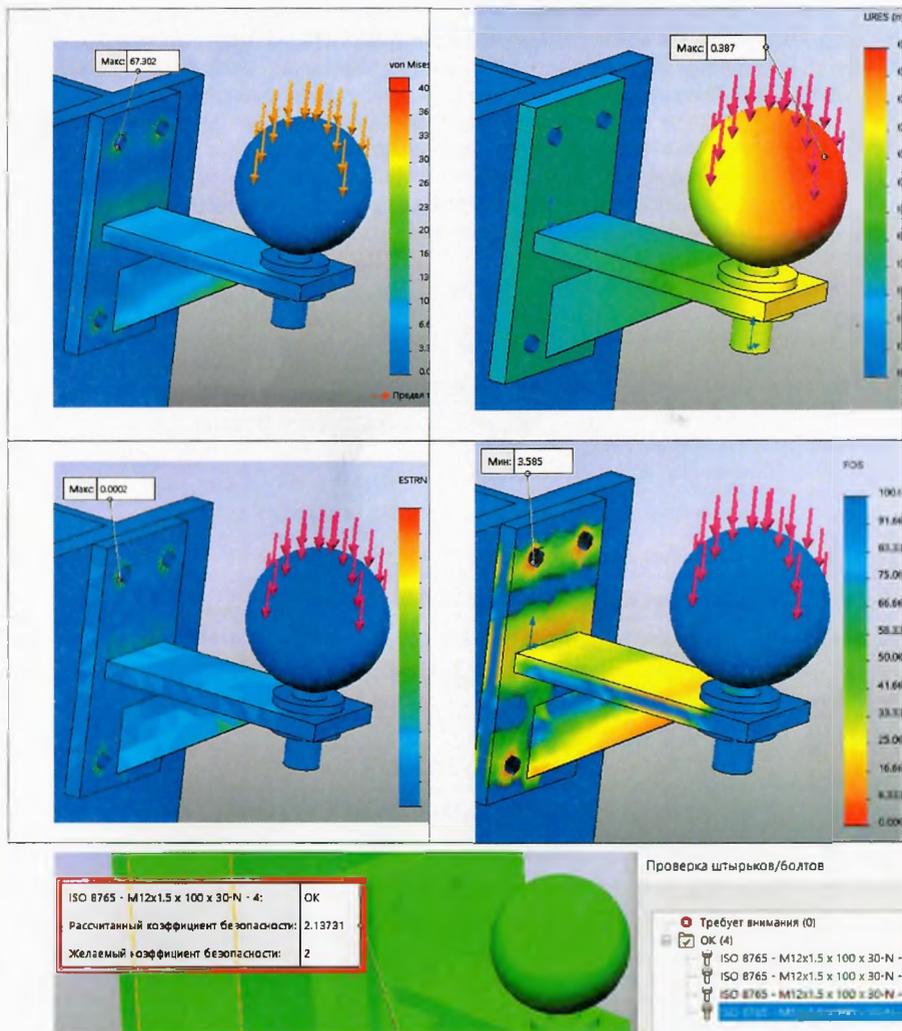


Рисунок 2.12 – Эпюры напряжений, перемещений, деформаций и запаса прочности (FOS), эпюра «Проверка штырьков/болтов»

4. Выполняем оптимизацию параметров сборки, используя модуль «Исследование проектирования», устанавливая цели: максимизация коэффициента запаса прочности и минимизация массы металла.

5. Оформляем чертеж сборки «Опорный узел» со спецификацией элементов (Приложение А).

3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Проектирование и испытание плоскогубцев либо пассатижей

Задачи работы:

- создать детали «Рычаг» и «Заклепка» (размеры деталей принимаются по ГОСТу в соответствии с номером задания согласно таблице 4.1);
- создать сборку «Пассатижи» или «Плоскогубцы»;
- выполнить виртуальное испытание изделия на прочность рукояток;
- выполнить нелинейное исследование изделия с учетом пластичности материала;
- определить разрушающую нагрузку на изделие и места возможного разрушения;
- выполнить чертеж изделия и спецификацию элементов.

Таблица 4.1 – Нормативные документы к выполнению лабораторной работы

№ задания	Название / Обозначение / ГОСТ [8, 9, 10]
1	Пассатижи 7814-0162 ГОСТ 17478-72
2	Плоскогубцы комбинированные 7814-0258 ГОСТ 5547-93
3	Плоскогубцы комбинированные 7814-0259 ГОСТ 5547-93
4	Плоскогубцы комбинированные 7814-0261 ГОСТ 5547-93
5	Пассатижи 7814-0407 ГОСТ 17478-72
6	Пассатижи 7814-0411 ГОСТ 17478-72
7	Плоскогубцы комбинированные 7814-0264 ГОСТ 5547-93
8	Плоскогубцы комбинированные 7814-0265 ГОСТ 5547-93
9	Плоскогубцы комбинированные 7814-0266 ГОСТ 5547-93
10	Пассатижи 7814-0412 ГОСТ 17478-72
11	Пассатижи 7814-0413 ГОСТ 17478-72
12	Плоскогубцы комбинированные 1-125-Х9-ГОСТ 53925-2010
13	Плоскогубцы комбинированные 2-165-Х9-ГОСТ 53925-2010
14	Плоскогубцы комбинированные 1-185-Х9-ГОСТ 53925-2010
15	Плоскогубцы комбинированные 2-215-Х9-ГОСТ 53925-2010
16	Пассатижи 7814-0161 ГОСТ 17478-72
17	Плоскогубцы комбинированные 1-220-Х9-ГОСТ 53925-2010
18	Плоскогубцы комбинированные 2-250-Х9-ГОСТ 53925-2010
19	Пассатижи 7814-0412 ГОСТ 17478-72
20	Плоскогубцы комбинированные 7814-0257 ГОСТ 5547-93

1.2 Создаем модель детали «Заклепка», например, по чертежу 6 ГОСТ 17438-72 [9] эскиз заклепки представлен на рисунке 3.3. Далее для создания пространственной модели используем команду «Повернуть» вокруг центральной оси.

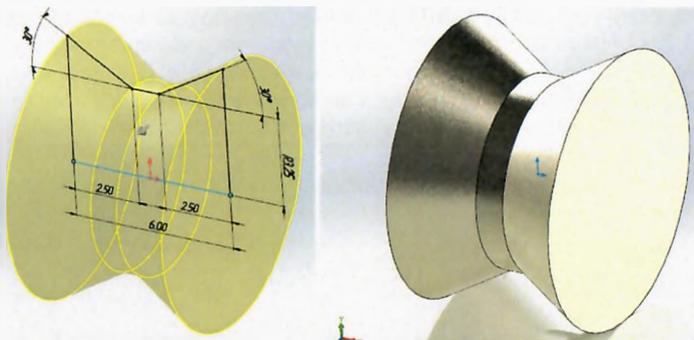


Рисунок 3.3 – Создание твердотельной модели детали – «Заклепка»

1.3 Детали «Рычаг» и «Заклепка» объединяем в сборку.

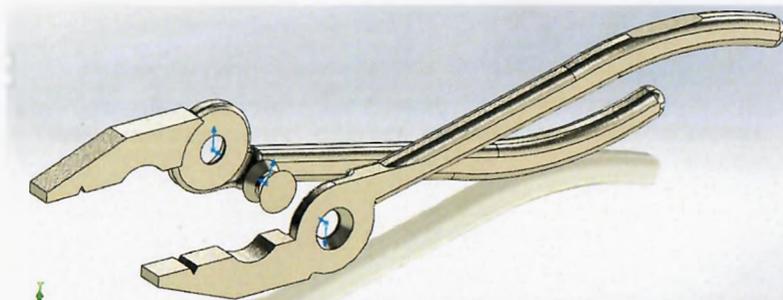


Рисунок 3.4 – Создание сборки «Пассатижи»

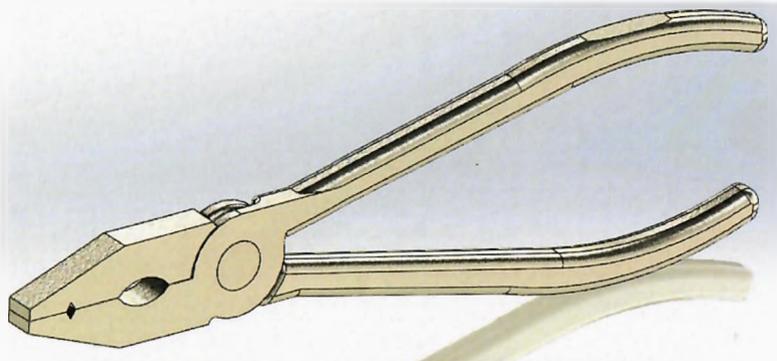


Рисунок 3.5 – Твердотельная модель изделия «Пассатижи»

При создании сборки задаем следующие условия сопряжения: «Концентрично» – диаметр заклепки и диаметр отверстия рычага, а также «Совпадение» боковых плоскостей в отверстии рукоятки и в заклепке.

2. Выполняем виртуальное испытания изделия на прочность рукояток изделий «Пассатижи» или «Плоскогубцы», используя модуль Simulation.

2.1 Выбираем «Новое исследование» ► «Статический».

2.2 Выбираем «Крепление» ► «Зафиксированная геометрия» в месте, где рукоятки захватывают пластину, на заданном расстоянии, для примера п. 2.4. [9] «Наименьшие диаметры зажимных изделий пассатижами исполнения 1 длиной 160 мм принимается 3 мм»; расстояние L_1 принимаем из таблицы 2а.

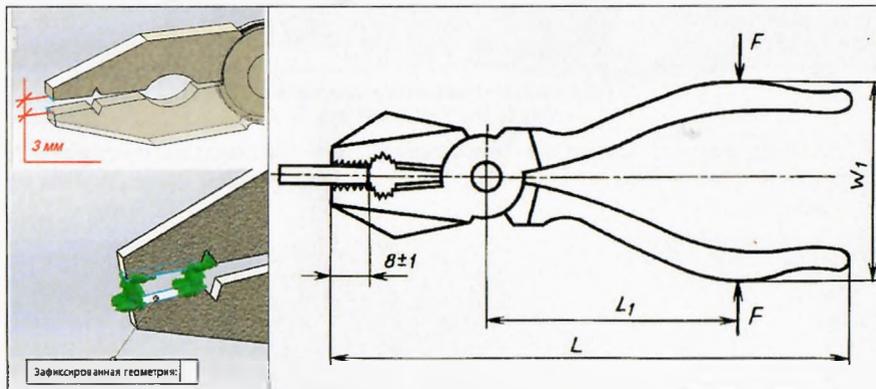


Рисунок 3.6 – Схема приложения нагрузки для испытания пассатижей на прочность рукояток

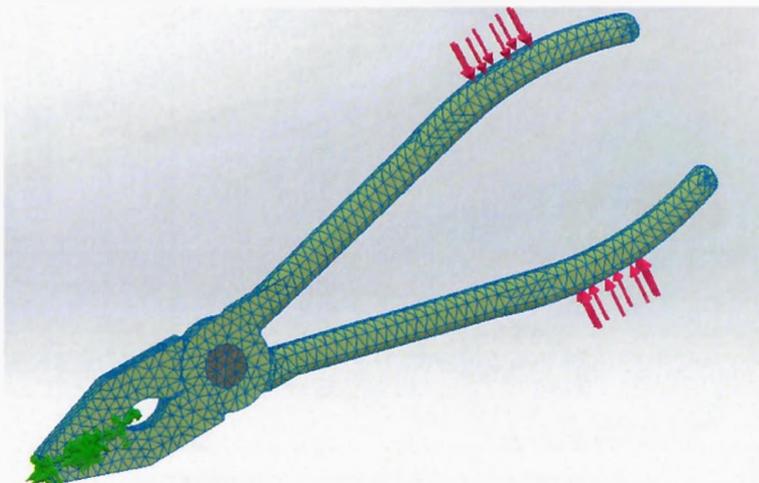


Рисунок 3.7 – Конечно-элементная модель пассатижей и граничные условия

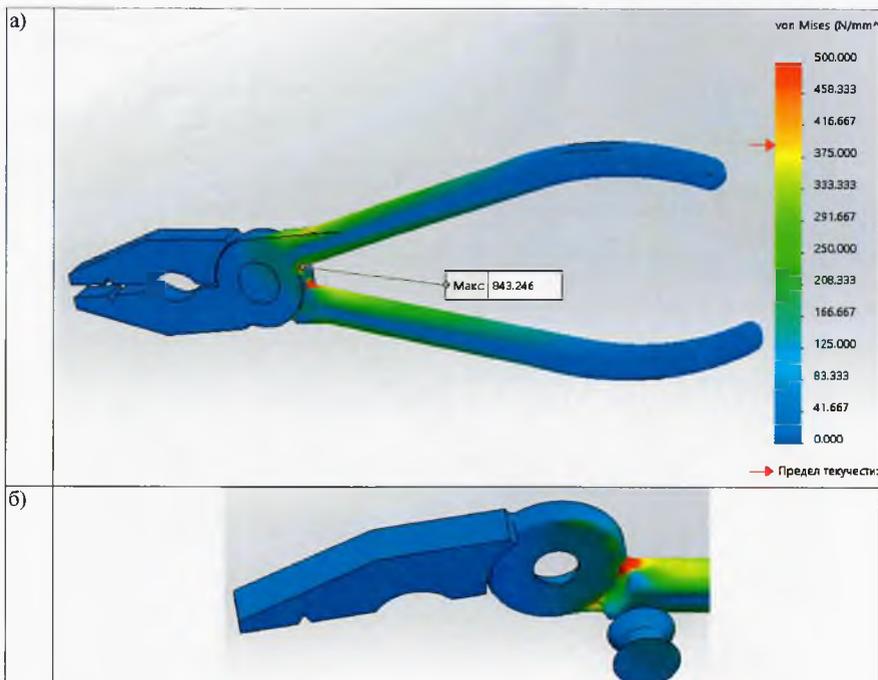
2.3 Выбираем «Внешние нагрузки» ► «Сила» ► принимаем силу $F = 200 \text{ Н}$, см. схему на рисунке 3.6.

2.4 Выбираем «Материал» ► «Сталь углеродистая 50Г ГОСТ 535-88».

Свойство	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости	2.049959995e+11	Н/м ²
Коэффициент Пуассона	0.29	Не применимо
Модуль сдвига	7.900000256e+10	Н/м ²
Объемная плотность	7830	кг/м ³
Предел прочности при растяжении	670000000	Н/м ²
Предел прочности при сжатии		Н/м ²
Предел текучести	390000000	Н/м ²
Коэффициент теплового расширения	1.2e-05	/К
Теплопроводность	86	Вт/мК

Рисунок 3.8 – Свойства материала «Сталь 50Г ГОСТ 535-88»

2.5 Активируем «Запустить исследование» ► выполняем проверочный расчет при заданной нагрузке $F = 200 \text{ Н}$; результаты расчета представлены на рисунках 3.9, 3.10.



а) напряженное состояние изделия «Пассатижи»;

б) максимальное напряжение на рукоятке

Рисунок 3.9 – Эпюры напряжений

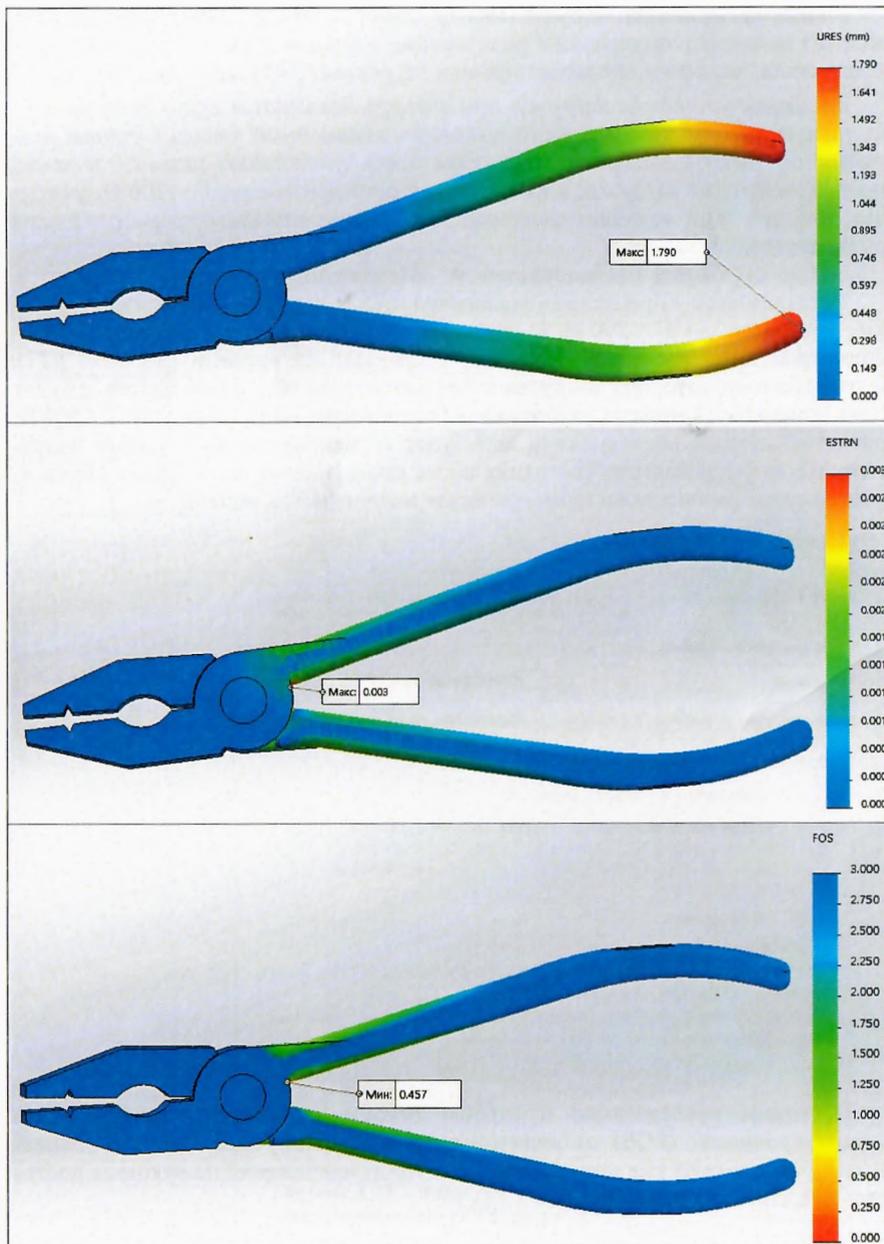


Рисунок 3.10 – Этюра перемещений, деформаций и запаса прочности (FOS)

Видно, что принятая нагрузка (сжатие двумя силами $F = 200$ Н) для данного изделия является разрушающей (напряжение в модели превышает предел текучести стали, коэффициент запаса прочности, равный 0,457, меньше единицы).

2.6. Далее установим нагрузку, при которой появляются существенные пластические деформации; для этого выполним нелинейный анализ с учетом пластической работы материала. При этом здесь необходимо задавать верхний предел изменения нагрузки, в качестве которого принимаем $F = 200$ Н, учитывая, что при этой величине нагрузки, как показал линейный расчет, изделие разрушается.

Выбираем «Новое исследование» ► «Нелинейное».

Устанавливаем «Крепление» аналогично п. 2.2.; выбираем: «Внешние нагрузки» → «Сила» → $F = 200$ Н. В свойствах исследования устанавливаем псевдо-временной интервал: «Зафиксирован»: 0,1 – шаг по времени (рисунок 3.11), в соответствии которому нагрузка будет разбита на 10 равных частей и будет прикладываться к модели, увеличиваясь постепенно: 20 Н; 40 Н; 60 Н ... 200 Н; при этом каждый последующий шаг будет корректироваться с учетом напряженно-деформированного состояния после предыдущего шага. Таким образом, учитывается физическая и геометрическая нелинейность модели.

Нелинейное - Статический

×

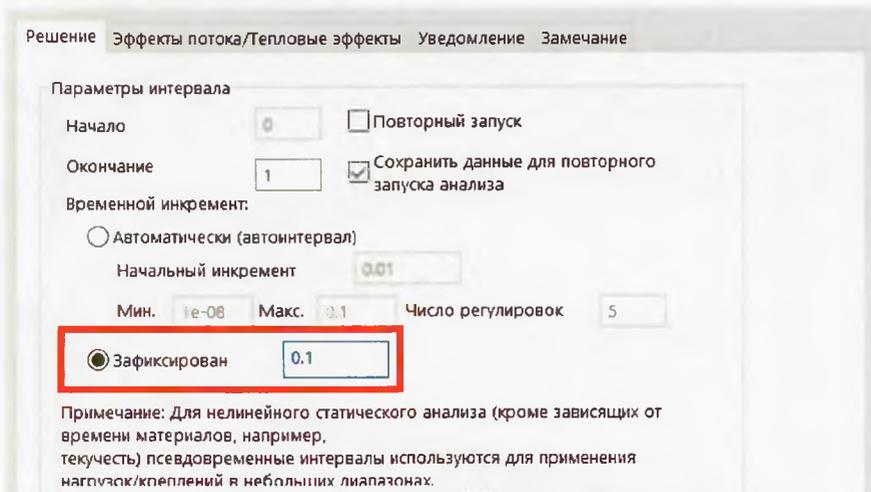


Рисунок 3.11 – Свойства нелинейного анализа

Проводим исследование и строим график зависимости коэффициента запаса прочности (FOS) от величины нагрузки. Получаем, что для данной модели пассатижей уже при нагрузке $F = 100$ Н напряжение на рукоятке достигает предела текучести (рисунок 3.12).

FOS	F
0.446	200
0.45	180
0.501	160
0.61	140
0.7	120
0.896	100
1.12	80
1.5	60
2.244	40
4.49	20

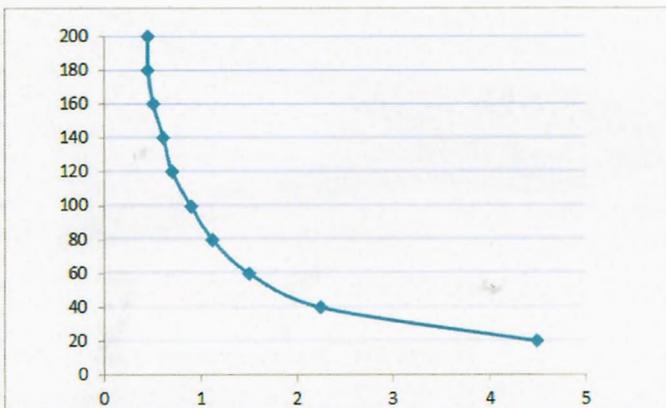


Рисунок 3.12 – Зависимость коэффициента запаса прочности (FOS) от нагрузки

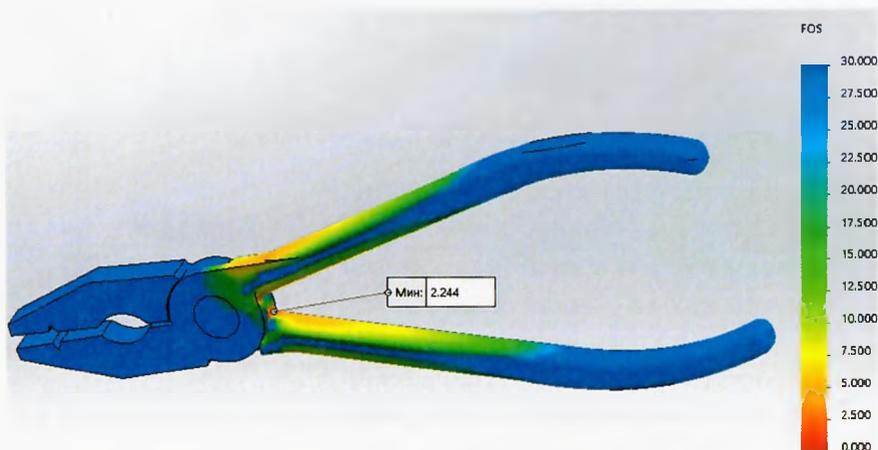


Рисунок 3.13 – Эпюра коэффициента запаса прочности (FOS) при $F = 40$ Н

4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 Проектирование и испытание гребного винта

Задачи работы:

- рассчитать параметры лопастей винта (возможный вид – см. на рисунке 4.9);
- выполнить твердотельную параметрическую модель винта;
- выполнить расчет в модуле SolidWorks Flow Simulation, получить картину распределения скорости жидкости и траекторию потока;
 - определить тягу винта, выполнить анализ тяги винта при разных углах наклона лопастей и определить наиболее оптимальный угол наклона;
 - оценить несущую способность наиболее оптимальной конструкции.

Исходные данные для выполнения лабораторной работы представлены в таблице 4.1 и соответствуют обозначениям на рисунке 4.2.

Таблица 4.1 – Данные к выполнению лабораторной работы

№ зад	R – радиус винта, мм	Уклон m_R , мм	Число лопастей	e_θ	e_R	Материал
1	400	45	3	0,008·R	0,1 R	Сталь 25Л ГОСТ 977-88
2	500	60	4	0,007·R	0,09 R	Сталь 30Л ГОСТ 977-88
3	600	80	5	0,007·R	0,08 R	Сталь 35Л ГОСТ 977-88
4	700	100	3	0,008·R	0,1 R	ЛМцЖ-55-3-1 ГОСТ 17711-72
5	800	120	4	0,007·R	0,09 R	ЛМцЖ-67-5-2 ГОСТ 17711-72
6	900	130	5	0,007·R	0,08 R	БрАЖН-9-4-4 ГОСТ 617-97
7	1000	150	3	0,008·R	0,1 R	БрАЖН-9-4-4 ГОСТ 617-97
8	1100	160	4	0,007·R	0,09 R	Сталь 25Л ГОСТ 977-88
9	400	45	5	0,007·R	0,08 R	Сталь 30Л ГОСТ 977-88
10	500	60	3	0,008·R	0,1 R	Сталь 35Л ГОСТ 977-88
11	600	80	4	0,007·R	0,09 R	ЛМцЖ-55-3-1 ГОСТ 17711-72
12	700	100	5	0,007·R	0,08 R	ЛМцЖ-67-5-2 ГОСТ 17711-72
13	800	120	3	0,008·R	0,1 R	БрАЖН-9-4-4 ГОСТ 617-97
14	900	130	4	0,007·R	0,09 R	БрАЖН-9-4-4 ГОСТ 617-97
15	1000	150	5	0,007·R	0,08 R	Сталь 35Л ГОСТ 977-88
16	1100	160	3	0,008·R	0,1 R	ЛМцЖ-55-3-1 ГОСТ 17711-72
17	400	45	4	0,007·R	0,09 R	ЛМцЖ-67-5-2 ГОСТ 17711-72
18	500	60	5	0,007·R	0,08 R	БрАЖН-9-4-4 ГОСТ 617-97
19	600	80	3	0,008·R	0,1 R	БрАЖН-9-4-4 ГОСТ 617-97
20	700	100	4	0,007·R	0,09 R	Сталь 25Л ГОСТ 977-88

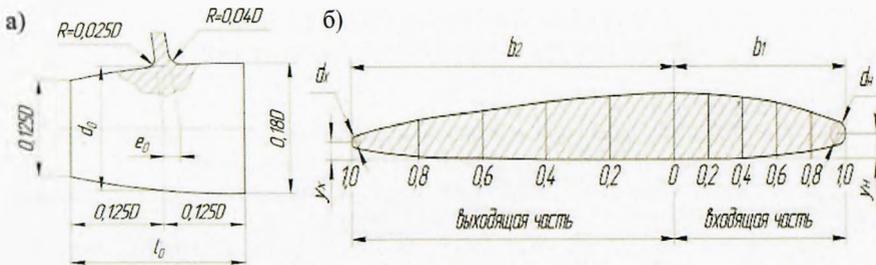


Рисунок 4.1 – Схемы ступицы (а) и лопасти (б) винта

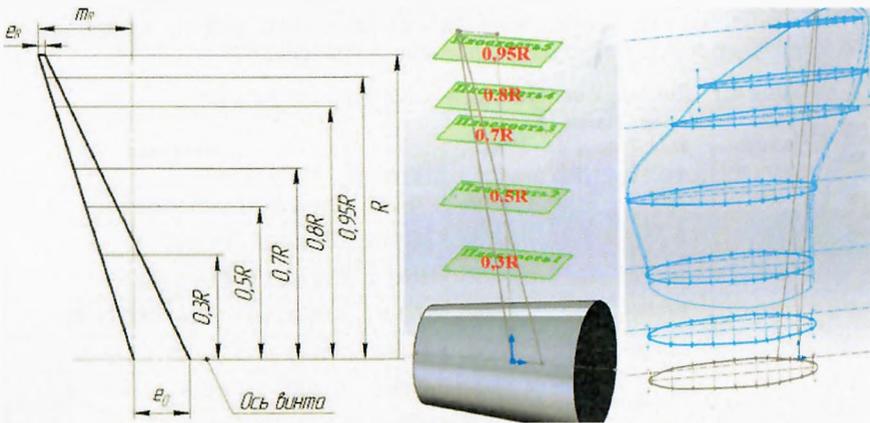


Рисунок 4.2 – Построение лопасти с использованием дополнительных плоскостей

Выполнение работы:

1. Выполняем твердотельную параметрическую модель детали «Ступица» (рисунок 4.1б), вычислив средний диаметр ступицы: $d_0 = 0,167 D$, где $D = 2R$, l_0 – длина ступицы, которая принимается самостоятельно, но она должна быть достаточной для размещения на ней лопастей.

2. Вычисляем среднюю ширину лопасти ($b_c = \frac{3,92 R Q}{z}$, где R – радиус винта; z – число лопастей; Q – дисковое отношение, которое принимаем равным 0,75) и максимальную ширину лопасти ($b_m = C \cdot b_c$, где константа C для винтов с числом лопастей 3, 4, 5 принимается равной 1,17).

3. Создаем эскиз лопасти по длине и проводим вспомогательные плоскости на расстояниях от оси винта 0,3R; 0,5R; 0,7R; 0,8R; 0,95R (рисунок 4.2).

Для определения наибольших толщин и параметров сечения лопасти выполним с использованием Excel по известным зависимостям проектирования гребных винтов, внесенным заранее в Excel (где их можно и увидеть), (рисунок 4.3) и получим значения для выполнения эскиза профиля лопасти для каждого сечения (рисунок 4.4а) по длине лопасти (рисунок 4.2, 4.5в).

dx	yx	ВЫХОДЯЩАЯ КРОМКА					наибольших толщ.	
		0.3Rb2= 239.92	1.00	0.80	0.60	0.40	0.20	0.3Em=32.55
5.86	8.79	239.92	191.94	143.95	95.97	47.98	0.00	
		0.5Rb2= 274.97	1.00	0.80	0.60	0.40	0.20	0.5Em=24.25
4.37	6.55	274.97	219.98	164.98	109.99	54.99	0.00	
		0.7Rb2= 234.91	1.00	0.80	0.60	0.40	0.20	0.7Em=15.95
2.87	4.31	234.91	187.93	140.95	93.96	46.98	0.00	
		0.8Rb2= 201.63	1.00	0.80	0.60	0.40	0.20	0.8Em=11.8
2.12	3.19	201.63	161.30	120.98	80.65	40.33	0.00	
		0.95Rb2= 109.13	1.00	0.80	0.60	0.40	0.20	0.95Em=5.58
1.00	1.51	109.13	87.30	65.48	43.65	21.83	0.00	
								-68.03



наибольших толщ.	ВХОДЯЩАЯ КРОМКА					yh	dh
0.3Em=32.55	0.00	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	
97.16	25.84	51.68	77.51	103.35	129.19	155.02	11.39
0.5Em=24.25	0.00	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	
99.62	29.61	59.22	88.84	118.45	148.06	177.67	8.49
0.7Em=15.95	0.00	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	
34.19	37.37	74.73	112.10	149.47	186.83	224.19	5.58
0.8Em=11.8	0.00	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	
6.28	37.07	74.15	111.22	148.30	185.37	222.44	4.13
0.95Em=5.58	0.00	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	
-68.03	20.23	40.46	60.68	80.91	101.14	121.37	1.65

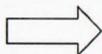


Рисунок 4.3 – Расчет параметров сечений в таблице Excel

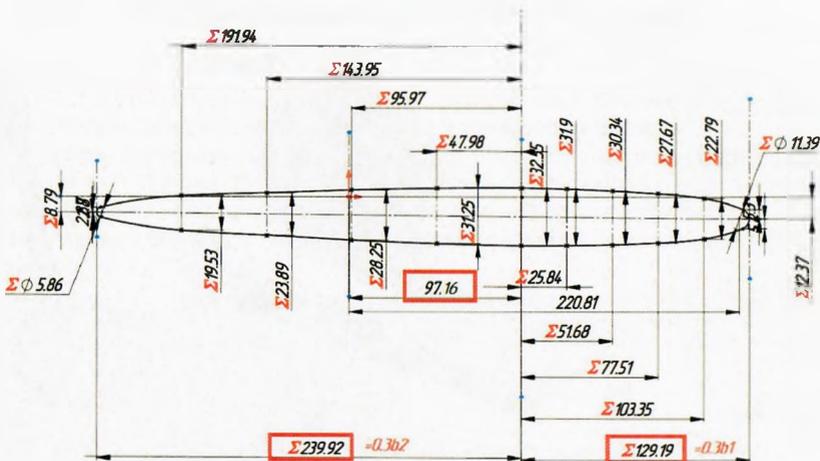


Рисунок 4.4 – Профиль лопасти винта на расстоянии от оси 0,3R (по первой строке в таблице на рисунке 4.3)

4. Построение лопасти:

4.1 На каждой вспомогательной плоскости выполняем эскиз лопасти по расчетным параметрам ее профиля (рисунок 4.4а).

4.2 Создаем модель лопасти, используя команду «По сечениям», которая объединяет все сечения в одно твердое тело с изменяющейся толщиной по длине лопасти (рисунок 4.5). Толщина лопасти должна обеспечивать ее прочность.

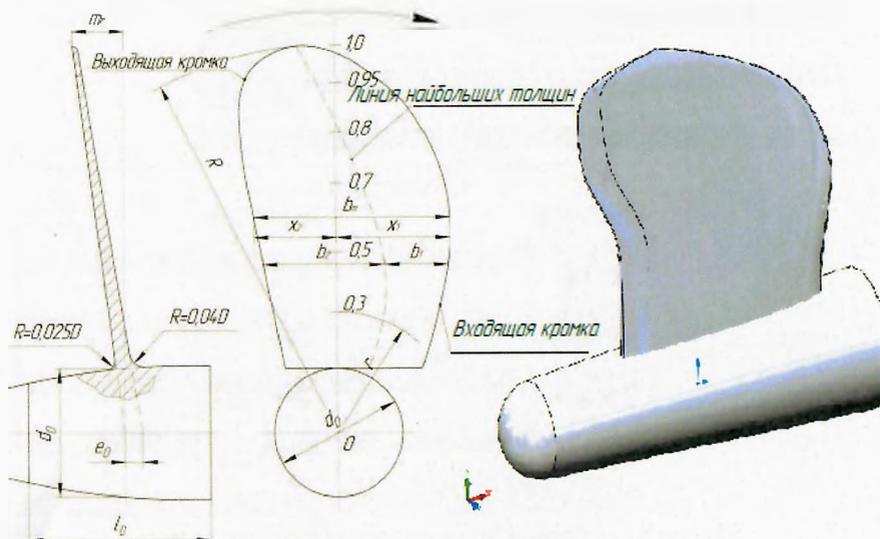


Рисунок 4.5 – Построение спрямленного контура лопасти

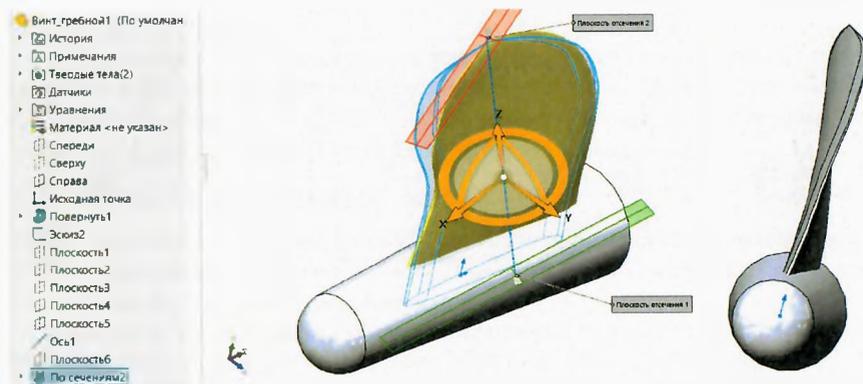


Рисунок 4.6 – Создание твердотельной параметрической модели лопасти

4.3 Теперь, используя команду: «Элементы» → «Гибкие» (рисунок 4.6), нужно повернуть лопасть на некоторый угол, учитывая, что углы поворота ло-



Рисунок 4.9 – Добавляем область вращения

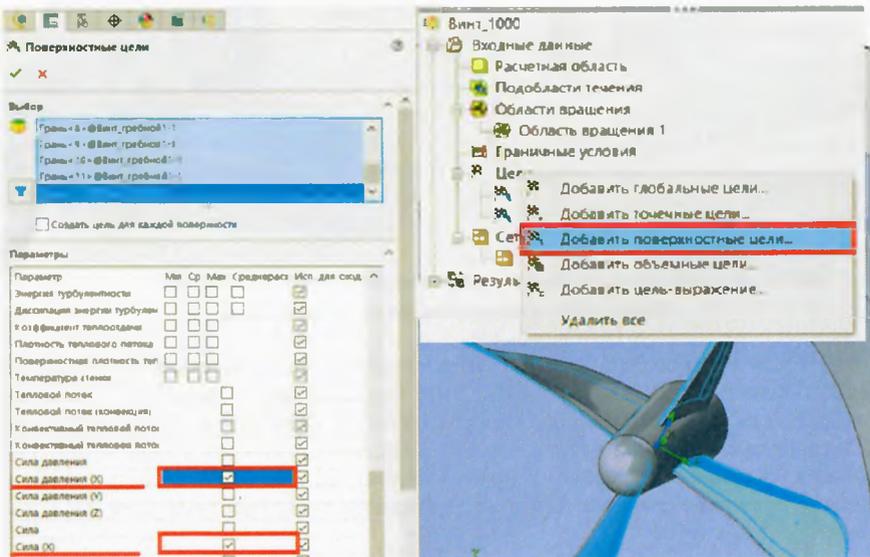


Рисунок 4.10 – Добавляем поверхностные цели исследования

8. Активируем расчет в модуле SolidWorks Flow Simulation и анализируем траекторию потока давления (рисунок 4.11), распределение скорости в поперечном и продольном сечениях (рисунок 4.12) и определяем тягу гребного винта при разных углах наклона лопасти 30°, 40°, 50° и 60°, а для винта с самым большим значением тяги проверяем запас прочности.

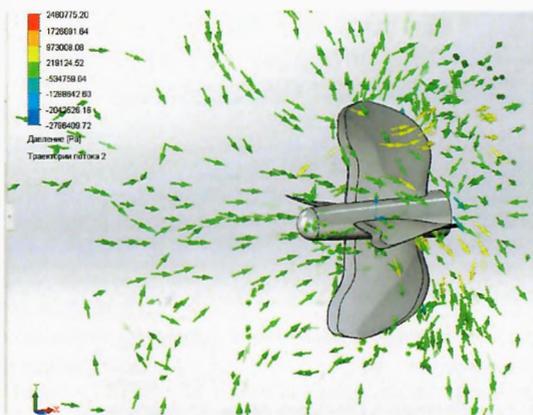
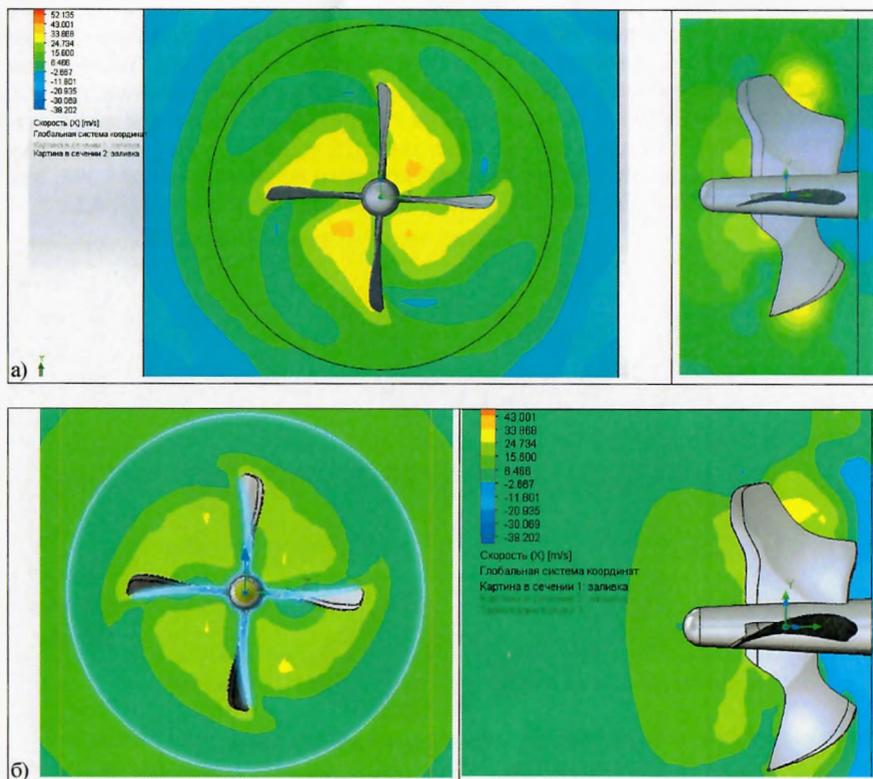


Рисунок 4.11 – Траектория потока давления



а) 30° и б) 50°

Рисунок 4.12 – Распределение скорости в поперечном и продольном сечениях при углах

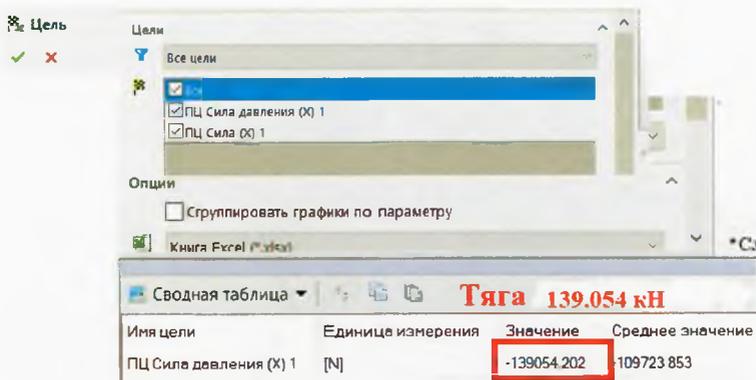


Рисунок 4.13 – Сила тяги (X) при угле 50°

По результатам расчетов получаем, что при угле поворота лопастей 30° сила тяги X составляет 69,48 кН, при угле 40° – 106,97 кН, при угле поворота 50° – 139,054 кН, при угле 60° сила тяги составляет 124,62 кН. Таким образом, наибольшее значение сила тяги здесь имеет при угле наклона лопасти 50°.

Импортируем результаты исследования в модуль Simulation и проводим статический анализ при наибольшей силе тяги (X = 139,054 кН) на проверку запаса прочности (рисунок 4.14), значение которого получим равным 3,398; при этом материал лопасти принимаем в соответствии с заданием таблицы 4.1.

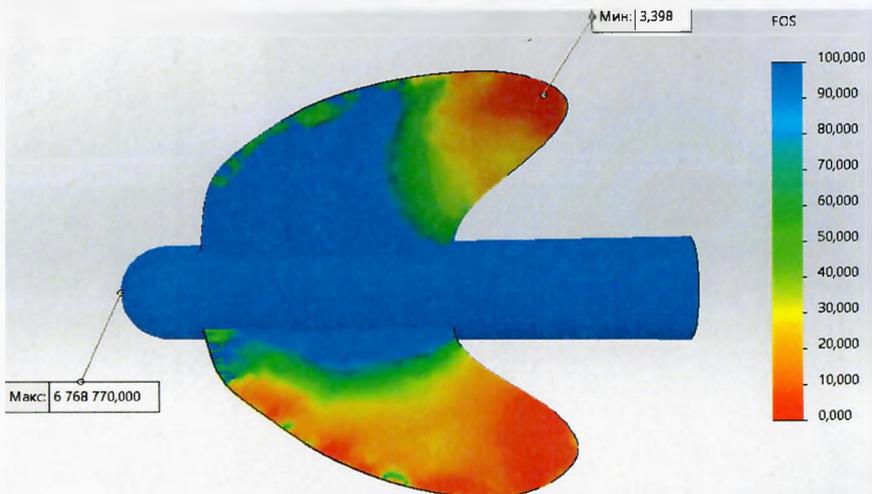


Рисунок 4.14 – Проверка запаса прочности

9. Выполняем чертеж гребного винта (см. Приложение В).

5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

Проектирование карданной передачи, состоящей из двух асинхронных шарниров

Задачи работы:

- построить детали: «Вилка», «Крестовина» (рисунок 5.1), составить сборку «Асинхронный шарнир»; выполнить статический расчет асинхронного шарнира в SolidWorks Simulation и оптимизацию крестовины;
- построить подвижный узел карданной передачи, состоящий из двух асинхронных шарниров; провести исследование параметров угловых скоростей для ведущего и ведомого валов;
- изучить инструмент «Анимация» – «Анализ движения» для асинхронного шарнира и карданной передачи;
- выполнить чертежи «Вилка», «Крестовина», «Карданная передача».

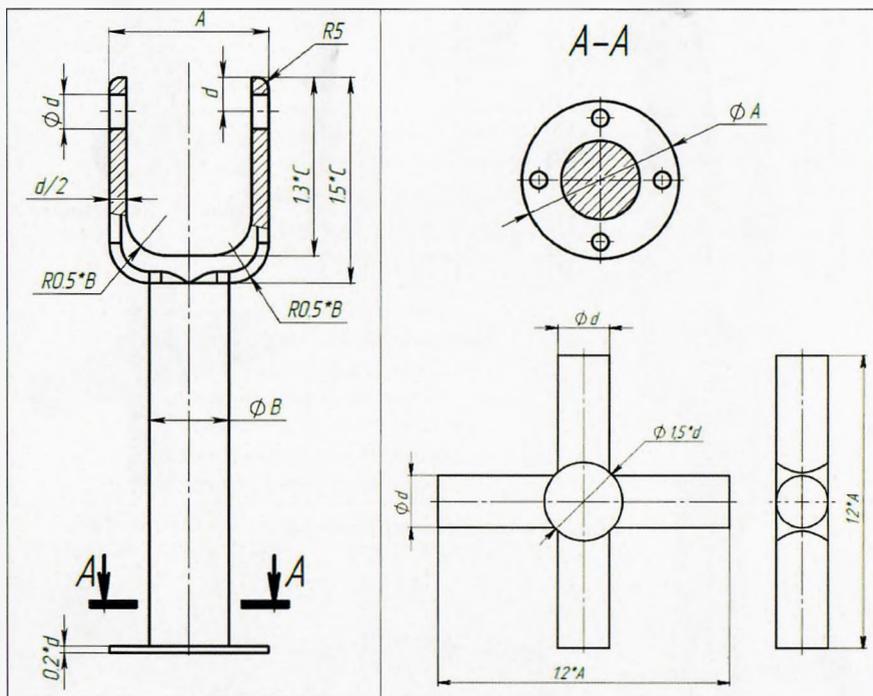


Рисунок 5.1 – Проектируемые детали «Вилка», «Крестовина»

Карданная передача служит для передачи крутящего момента между валами, оси которых не лежат на одной прямой; применяется в механизмах трансмиссии для передачи крутящего момента колесам, может применяться в рулевом управлении; основные элементы карданной передачи: шарниры и валы. Шарниры соединяют валы между собой, допуская угловое смещение и передавая

крутящий момент. Шарниры бывают синхронные (угловая скорость ведущего вала равна угловой скорости ведомого вала) и асинхронные (угловая скорость ведущего вала не равна угловой скорости ведомого). Здесь проектируется асинхронный карданный шарнир с крестовиной – «шарнир Гука».

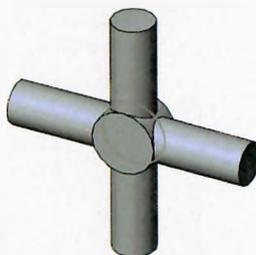
Таблица 5.1 – Числовые данные к выполнению лабораторной работы

№	А, мм	В, мм	С, мм	d, мм	Угол, °
1	70	35	60	15	2
2	84	42	72	18	4
3	98	49	84	21	6
4	112	56	96	24	10
5	126	63	108	27	12
6	133	67	114	29	15
7	140	70	120	30	20
8	154	77	132	33	24
9	168	84	144	36	28
10	178	89	153	38	30
11	190	95	163	41	35
12	201	101	172	43	3
13	213	106	182	46	5
14	224	112	192	48	7
15	235	118	202	50	13
16	247	123	212	53	34
17	258	129	221	55	16
18	270	135	231	58	32
19	281	141	241	60	18
20	292	146	251	63	19

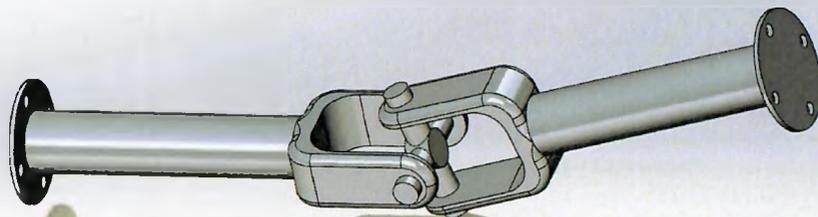
Деталь «Вилка»



Деталь «Крестовина»



Сборка «Асинхронный шарнир»



Выполнение работы:

1. Создаем компоненты сборки: ведущий вал, ведомый вал (деталь – «Вилка») и «Крестовина»; создаем сборку, состоящую из компонентов: две вилки и крестовина; задаем необходимые сопряжения деталей (рисунок 5.2), валы устанавливаем под заданным углом (согласно принимаемому «Эскизу 1», параллельно которому устанавливаются оси вилок); все размеры деталей принимаются в соответствии с заданием (см. таблицу 5.1 и рисунок 5.1).



Рисунок 5.2 – Сборка «Асинхронный шарнир», условия сопряжения

2. Проводим исследование движения механизма, оцениваем его работоспособность. Для этого задаем обороты ведущего вала, используя инструмент «Двигатель», например, 10 об/мин, после чего определяем угловые скорости для валов используя инструмент «Результаты», выбирая категорию «Перемещение/скорость/ускорение» и подкатегорию – «Угловая скорость». Выводим графики угловых скоростей, проверяем значения угловой скорости ведомого вала: $\frac{\omega_1}{\cos \gamma}$ (верхнее) $> \omega_2 > \omega_1 \cdot \cos \gamma$ (нижнее), γ — угол между осями валов (таблица 5.1). В нашем случае имеем: $60,925 < 60 < 59,089$. Отметим, что при увеличении угла асинхронность угловых скоростей должна увеличиваться.

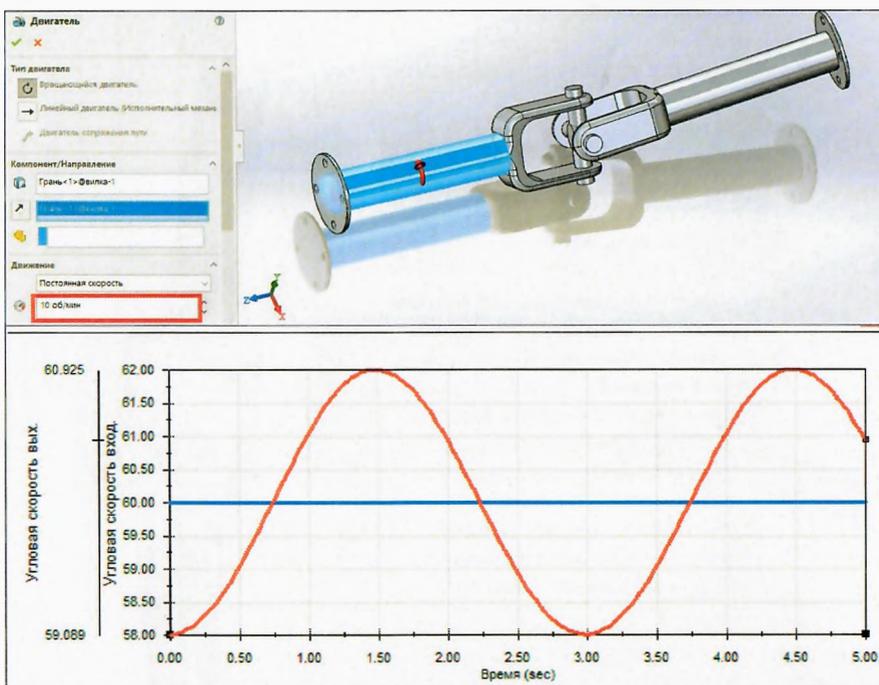


Рисунок 5.3 – Проверка работоспособности «Асинхронного шарнира»

3. Сохраняем анимацию движения шарнира в avi-файл;
4. Выполняем статический расчет сборки – «Асинхронный шарнир»:
 - 4.1 Активируем вкладку «Simulation» на закладке «Добавления SolidWorks».
 - 4.2 Выбираем «Новое исследование» ► «Статический».
 - 4.3 Выбираем «Крепление» и задаем для детали «Ведомый вал» жесткое крепление крайней грани – «Зафиксированная геометрия» (рисунок 5.4).

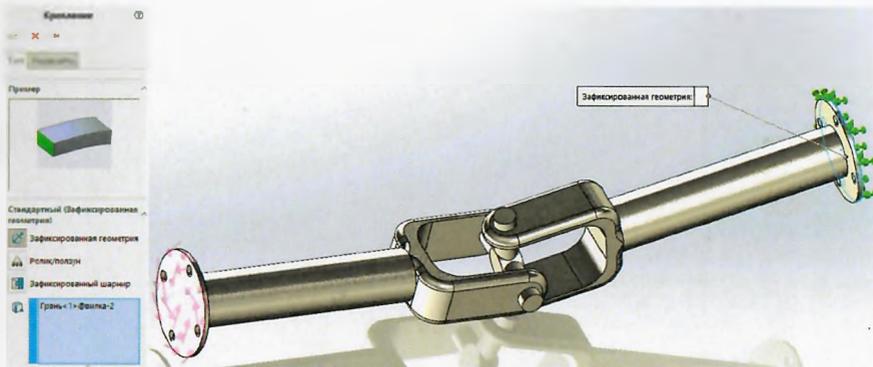


Рисунок 5.4 – Закрепление жестко одной грани

4.4 Выбираем «Внешние нагрузки» ► «Вращающийся момент» ► на крайнюю грань детали «Ведущий вал».

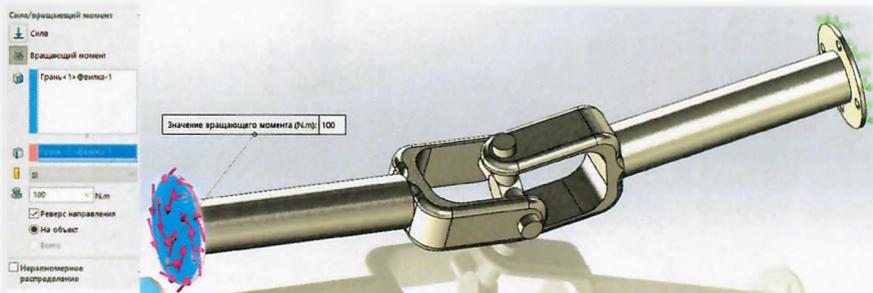
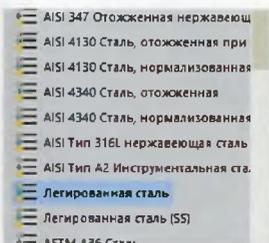


Рисунок 5.5 – Установка вращающего момента на вторую грань

4.5 Выбираем «Материал» ► задаем материал всем деталям сборки «Литая легированная сталь».



Свойство	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости	2.1e+11	Н/м ²
Коэффициент Пуассона	0.28	Не применимо
Модуль сдвига	7.9e+10	Н/м ²
Массовая плотность	7700	кг/м ³
Предел прочности при растяжении	723825600	Н/м ²
Предел прочности при сжатии		Н/м ²
Предел текучести	620422000	Н/м ²
Коэффициент теплового расширения	1.3e-05	/К
Теплопроводность	50	Вт/(м·К)

4.6 Активируем «Запустить исследование» ► выводим дополнительно эпюру коэффициента запаса прочности (коэффициент запаса прочности должен находиться в пределах: $2 \leq FOS \leq 3$) и при необходимости выполняем оптимизацию крестовины. Результаты расчета представлены на рисунках 5.6–5.9.

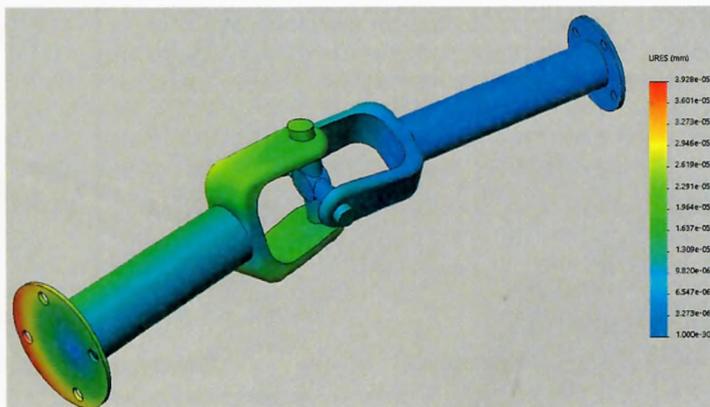


Рисунок 5.6 – Этюра перемещений

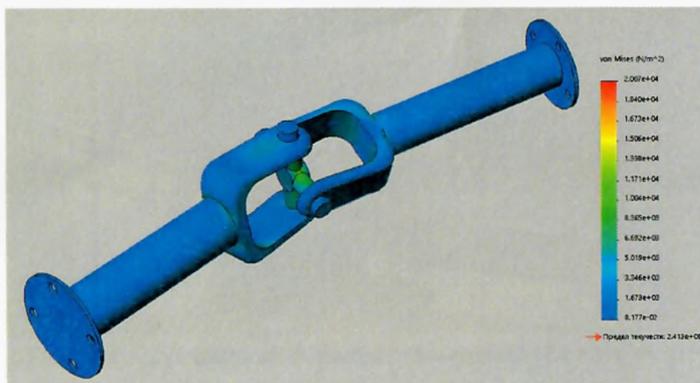


Рисунок 5.7 – Этюра напряжений

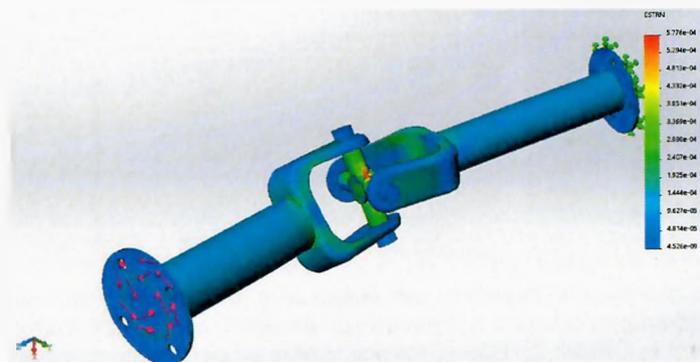


Рисунок 5.8 – Этюра деформаций

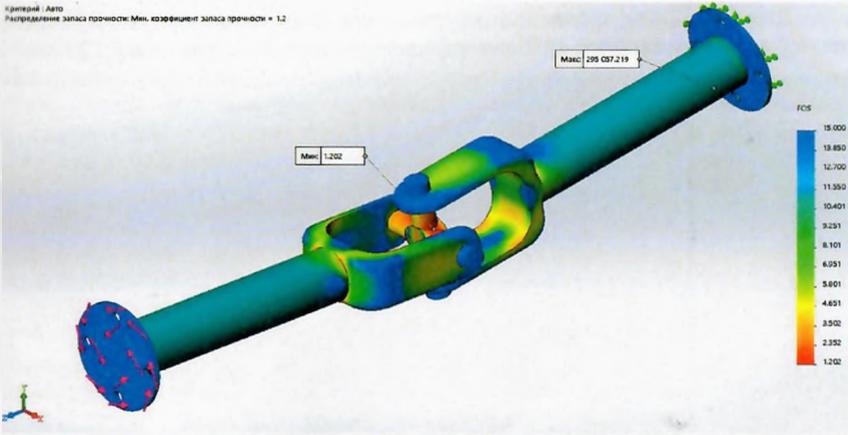


Рисунок 5.9 – Эюра запаса прочности

После расчета видно, что деталь – «Крестовина», имеет наибольшие деформации и напряжения и нужно выполнить оптимизацию геометрических параметров: выполняем скругление острых углов.

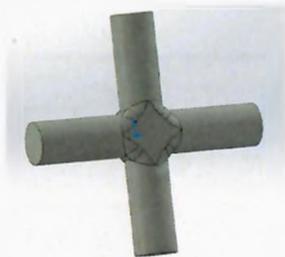


Рисунок 5.10 – Деталь «Крестовина-оптимизирована»

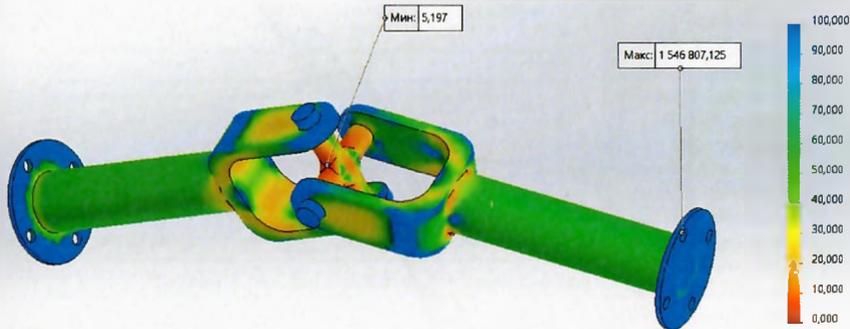


Рисунок 5.11 – Запас прочности оптимизированной сборки

После оптимизации крестовины запас прочности механизма увеличился.

5. Создаем сборку карданной передачи, при построении сборки к расположению валов предъявляют требования, представленные на рисунке 5.12.

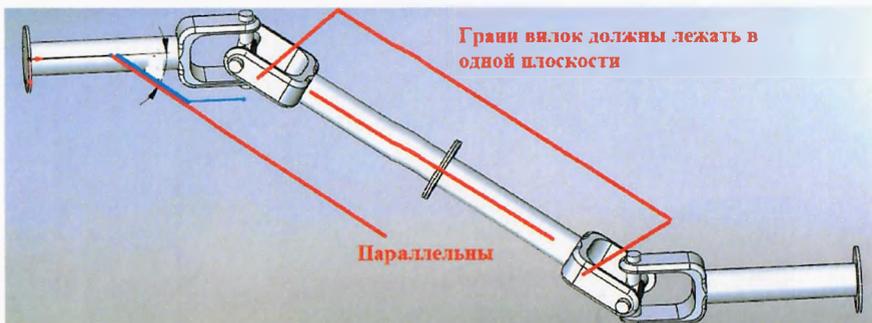


Рисунок 5.12 – Требования к расположению валов

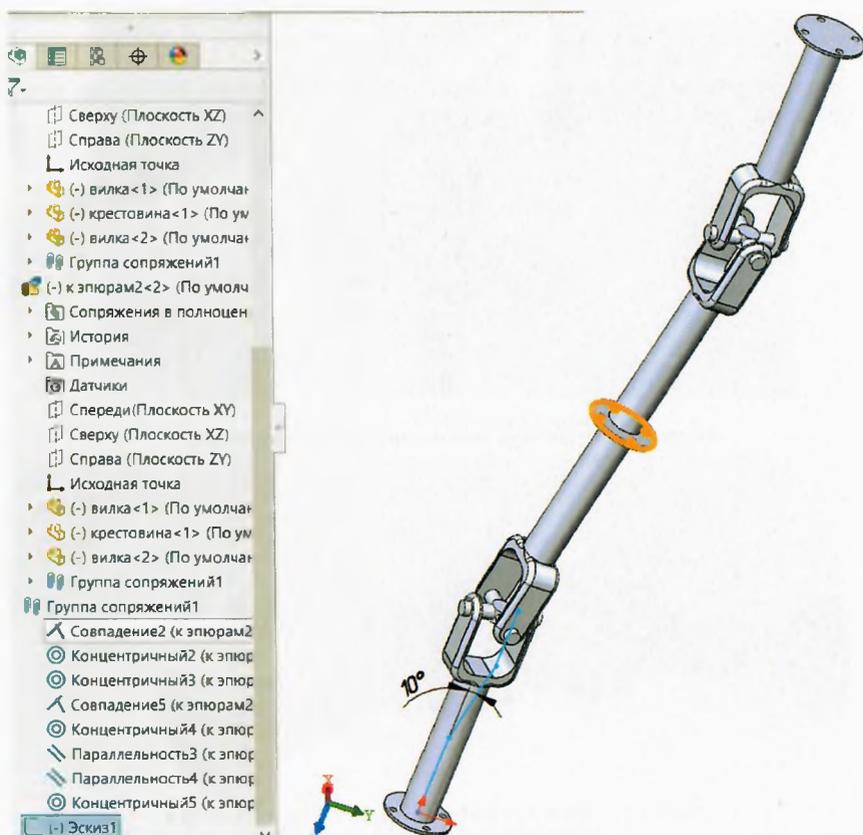


Рисунок 5.13 – Сборка «Карданная передача», условия сопряжения

5.1 Проводим исследование движения механизма, оцениваем его работоспособность. Для этого задаем обороты ведущего вала, используя инструмент «Двигатель», например, 10 об/мин, после чего определяем угловые скорости для валов. Асинхронность, которая присутствовала на среднем валу (рисунок 5.3), на ведомом валу отсутствует, угловая скорость ведомого вала 60 рад/с, как и ведущего – механизм работает правильно.

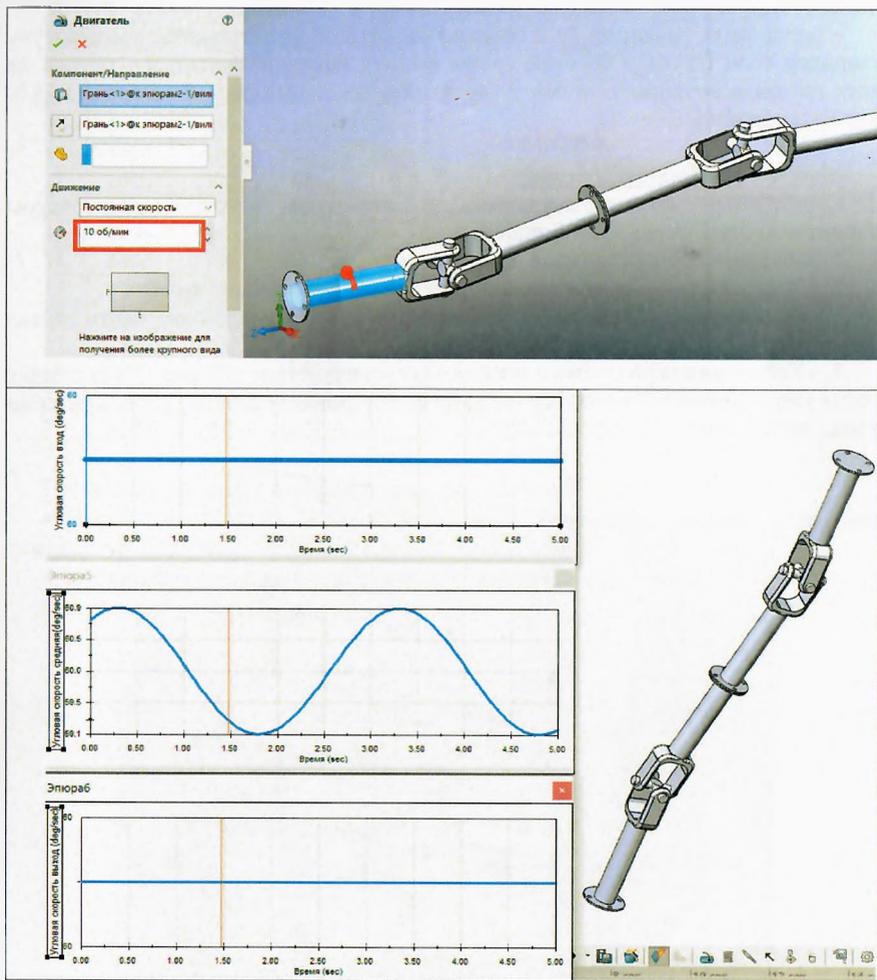


Рисунок 5.14 – Исследование движения «Карданная передача»

5.2 Сохраняем анимацию движения карданной передачи в avi-файл.

6. Выполняем чертежи деталей «Вилка», «Крестовина» и сборочного узла «Карданная передача». Чертежи представлены в Приложении Г.

6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

Проектирование и тепловой расчет полотенцесушителя

Задачи работы:

– построить твердотельную параметрическую модель полотенцесушителя в соответствии с заданием (см. таблицу 6.1), задать граничные условия и выполнить исследование в модуле SolidWorks Flow Simulation;

– определить температуру в сечении расчетного пространства, температуру твердого тела (трубы), текучей среды (воды), значение теплового потока на всех гранях полотенцесушителя и рассчитать денежный расход за месяц в рублях Республики Беларусь.

Порядок выполнения работы:

Конструкцию полотенцесушителя исследуем на действие температуры с помощью SolidWorks Flow Simulation.

1. Запускаем Flow Simulation → Новый проект.
2. «**Материал**» → Задаем сталь 302 для всего полотенцесушителя.
3. «**Граничные условия**» → температура 80 °С на верхнюю часть стояка и давление в 3 атмосферы на нижнюю часть стояка.
4. «**Устанавливаем цели**» и можно «**Запустить исследование**» → В опциях управления расчетом изменяем критерии остановки расчета: «Все критерии удовлетворены».

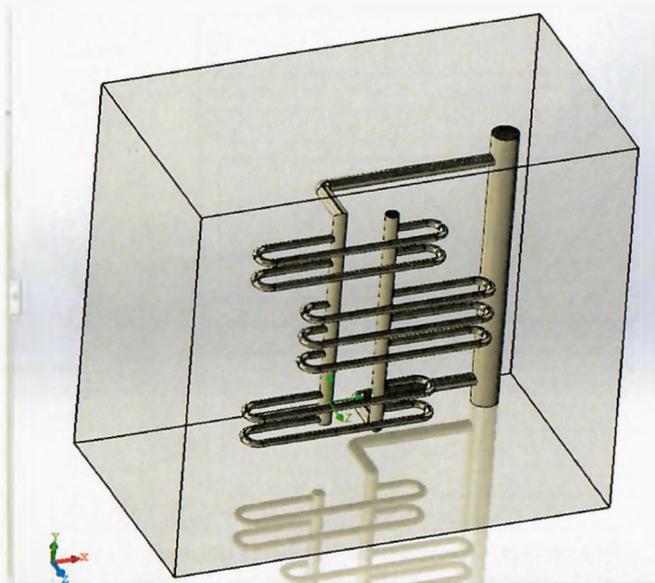
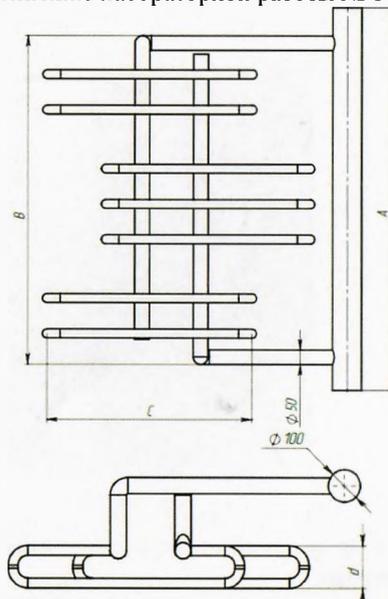


Рисунок 6.1 – Трёхмерная модель полотенцесушителя с расчетной областью

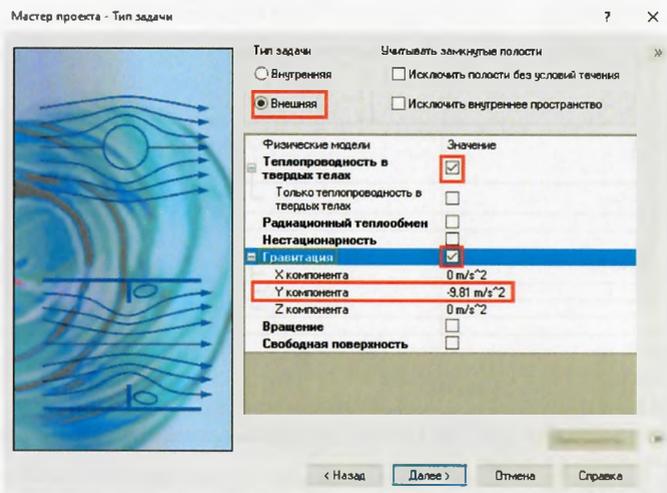
Таблица 6.1 – Числовые данные к выполнению лабораторной работы № 6

	A	B	C	d
1	1500	1200	1000	130
2	1800	1500	1300	160
3	2000	1700	1500	170
4	1200	900	700	100
5	1400	1100	900	120
6	1300	1000	800	120
7	1600	1300	1100	140
8	1900	1600	1400	170
9	2100	1800	1600	180
10	1400	1100	900	120
11	1600	1300	1100	140
12	1600	1300	1100	140
13	1200	900	700	100
14	1400	1100	900	120
15	1300	1000	800	110
16	1600	1300	1100	140
17	1900	1600	1400	170
18	2100	1800	1600	180
19	1900	1600	1400	170
20	1700	1400	1200	150

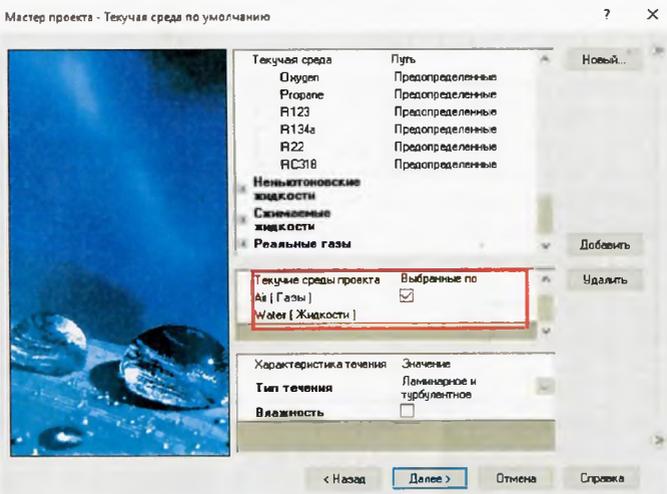


На вкладке создали новый проект в Flow Simulation:

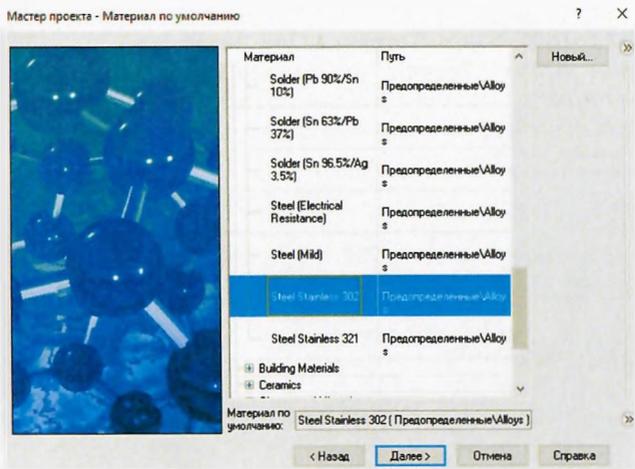
- В разделе «Система единиц измерений» изменяем единицы измерения температуры на градусы Цельсия, а объемный расход на литры в час.
- В разделе «Тип задачи» указываем следующие параметры:



- В разделе «Текущая среда по умолчанию» выбираем воду и воздух:



- В разделе «Материал по умолчанию» во вкладке Alloys выбираем материал:



- Условия на стенках по умолчанию.
 - В разделе «Начальные условия» выставить температуру 20 °С.
- В новом проекте первым делом выбираем проточную область и утанавливаем в ней тип текущей среды. Далее указываем граничные условия:
- Температура на входе стояка: 80 °С.
 - Расход: 50 л/час.
 - Давление на выходе: 3 атмосферы.

Устанавливаем глобальные цели исследования:

- Температура (текущая среда) – «Среднее».
- Тепловой поток – «Средний расход».
- Температура (твёрдое тело): Среднее.

После расчета получим результаты:

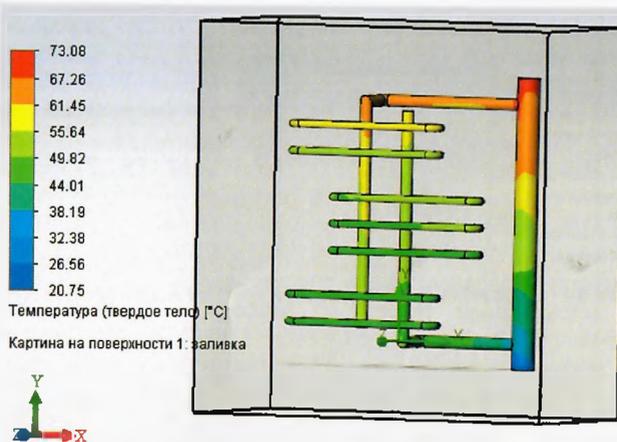


Рисунок 6.2 – Распределение температуры по твердому телу

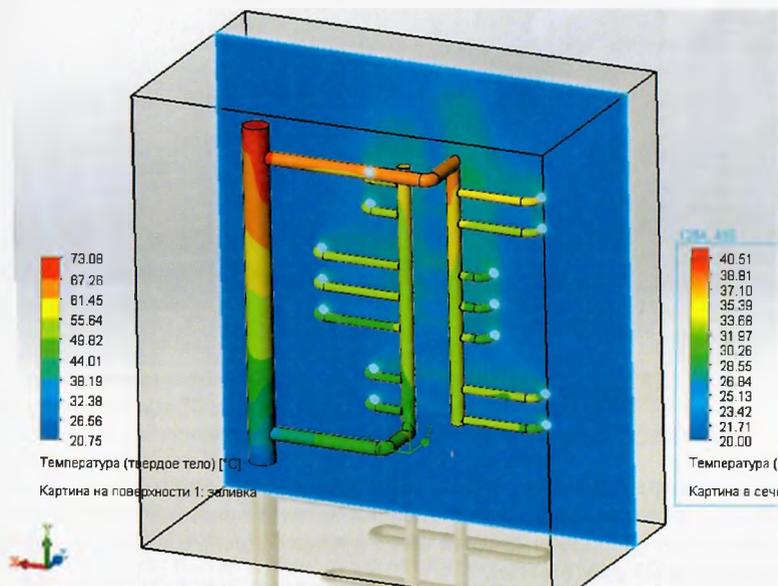


Рисунок 6.3 – Распределение температуры в сечении расчетной области

Расчитываем денежный расход для теплового потока за месяц в рублях Республики Беларусь (рисунок 6.5). Пользовательские единицы измерения устанавливаем на закладке «Система единиц измерения» (рисунок 6.4):

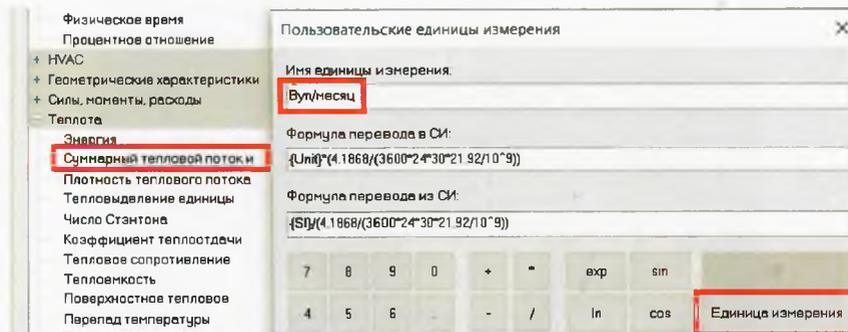


Рисунок 6.4 – Денежный расход в месяц в рублях Республики Беларусь

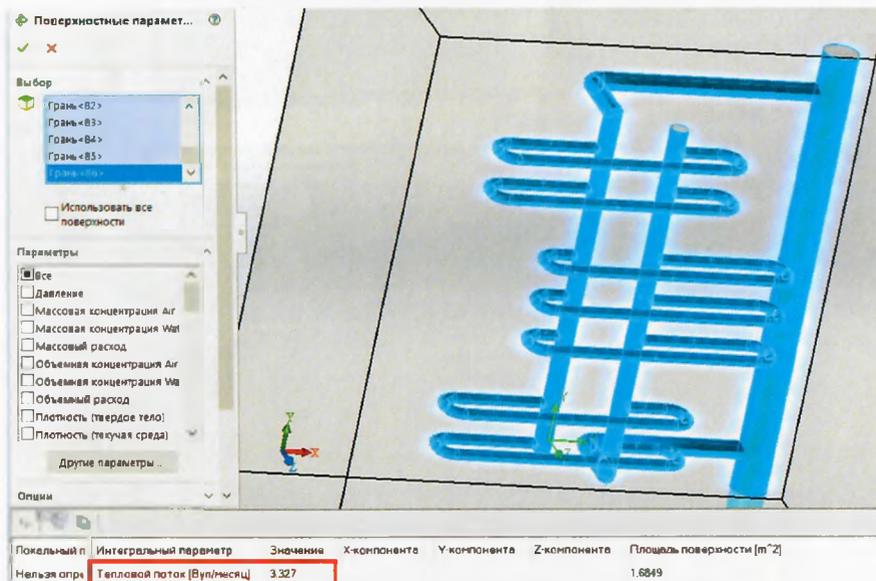


Рисунок 6.5 – Значение теплового потока полотенцесушителя в руб/мес

Анализ распределения теплоты в сечении расчетного пространства и на поверхности полотенцесушителя показывает, что полотенцесушитель эффективно выполняет свою функцию передачи тепла в помещение. Стоимость коммунальной услуги – 3,327 руб. в месяц.

Выполняем чертеж полотенцесушителя (см. Приложение Д).

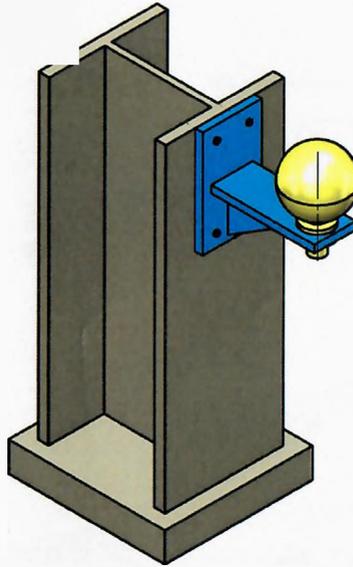
ЛИТЕРАТУРА, рекомендуемая для расширенного изучения материала

1. Алямовский, А. А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации / А. А. Алямовский. – М. : ДМК Пресс, 2015. – 562 с.
2. Алямовский, А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation / А. А. Алямовский. – М. : ДМК Пресс, 2019. – 463 с.
3. Гузенков, В. Н. SolidWorks 2016: Трехмерное моделирование деталей и выполнение электронных чертежей : уч. пос. / В. Н. Гузенков, П. А. Журбенко, Т. В. Бондарева. . – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. – 124 с.
4. Дударева, Н. Ю. SolidWorks 2009 для начинающих / Н. Ю. Дударева, С. А. Загайко. – М. : БХВ-Петербург, 2013. – 448 с.
5. Зиновьев, Д. В. Основы проектирования в SolidWorks 2016 / Д. В. Зиновьев. – Павлоград : Vertex, 2017. – 276 с.
6. Лукинских, С. В. Компьютерное моделирование и инженерный анализ в конструкторско-технологической подготовке производства : уч. пос. / С. В. Лукинских. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2020. – 168 с.
7. Справочник металлопроката ОАО Евраз Металл Инпром [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://aksvil.by/images/spravochnik-metalloprokata/spravochnik-metalloprokata.pdf>. – Дата доступа: 10.12.2022.
8. Плоскогубцы комбинированные. Технические условия : ГОСТ 5547-93. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 2001. – 10 с. – (Межгосударственный стандарт).
9. Пассатижи. Технические условия : ГОСТ 17438-2001. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2001. – 14 с. – (Межгосударственный стандарт).
10. Плоскогубцы комбинированные. Общие технические требования, методы контроля и испытаний : ГОСТ 53925-2010. – М. : Стандартинформ, 2011. – 10 с. – (Национальный стандарт Российской Федерации).

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Автоматизированная система проектирования SolidWorks	4
1.1 Общая характеристика	4
1.2 Общие сведения о проектировании конструкций в SolidWorks	6
2. Лабораторная работа № 1. Расчет, моделирование и исследование статически определимой фермы	11
3. Лабораторная работа № 2. Проектирование опорного узла с болтовыми соединениями	20
4. Лабораторная работа № 3. Проектирование и испытание плоскогубцев либо пассатижей	28
5. Лабораторная работа № 4. Проектирование и испытание гребного винта	37
6. Лабораторная работа № 5. Проектирование и исследование карданной передачи, состоящей из двух асинхронных шарниров	45
7. Лабораторная работа № 6. Проектирование и тепловой расчет полотенцесушителя	54
Литература, рекомендуемая для расширенного изучения материала	59

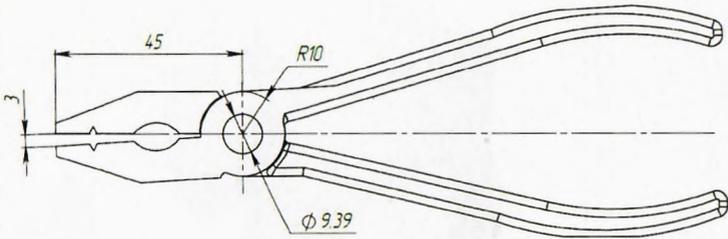
ПРИЛОЖЕНИЕ А



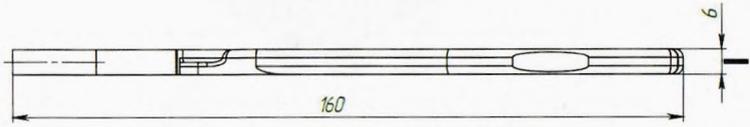
	Обозначение	Наименование	Кол.	Прим.
1	1-36 01 03 ТО ЧММ.01.13.01	Полка	1	
2	1-36 01 03 ТО ЧММ.01.13.02	Стойка	1	
3	1-36 01 03 ТО ЧММ.01.13.03	Шаровый палец	1	
4		Болт М12х90 ISO	4	
5		Шайба М12 ISO	4	
6		Гайка М12 ISO	4	

					1-36 01 03 ТО19.ЧММ.01.13.00			
Изм.	Лист	№ докум.	Лист	Дата	Опорный узел	Лист	Масса	Масштаб
Разработ	Иванов						573.64	1:10
Проб	Бочарова НВ					Лист 1	Листов 1	
И. катип						БрГТУ кафедра ПМ		
Узел								

Справ. №

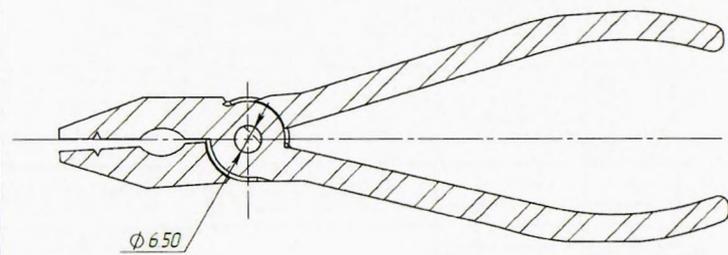


Подп. и дата



A-A (1 : 1)

Изн. № дубл.

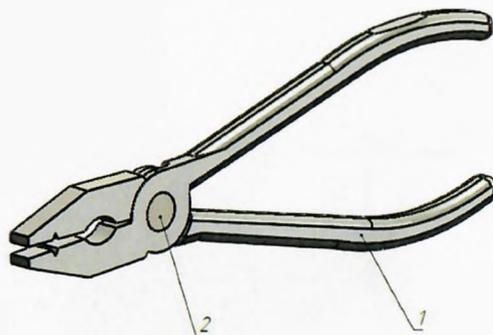
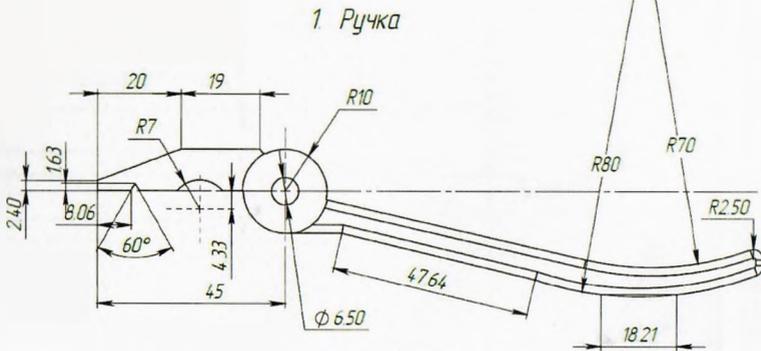


Взам. изв. №

Подп. и дата

Изн. № подл.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б



ПОЗИЦИЯ	ОБОЗНАЧЕНИЕ	ОПИСАНИЕ	К-ВС
1	1-36 01 03.Т019.ЧММ.03.01.01	Ручка	2
2	1-36 01 03.Т019.ЧММ.03.01.02	Заклепка	1

				1-36 01 03.Т019.ЧММ.03.01.00		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист	Масса
Разраб.	Иванов					
Проб.	Бочарова					12
Т. контр.					Лист 1	Листов 1
Н. контр.					БрГТУ кафедра ПМ	
Удп.						

Пассатижи 7814-0160
ГОСТ 17478-72

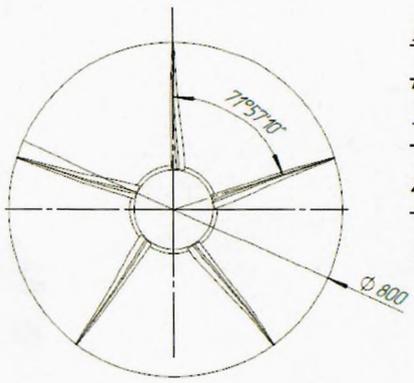
Копировал

Формат А3

1-36 01.03.1019.09.04

Гориз. проекция

Срез №



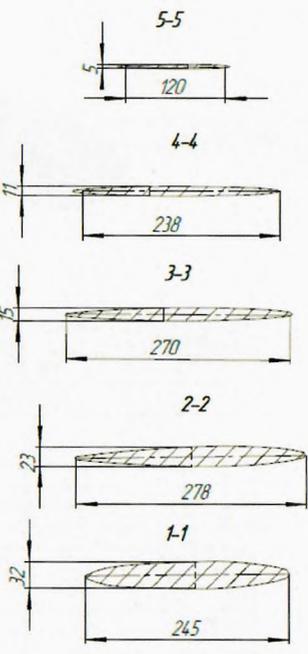
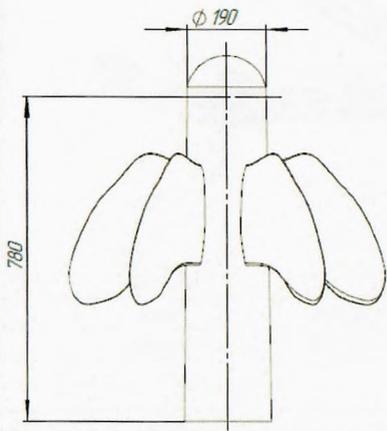
Лист и сема

Лист № дубл.

Взам. арх. №

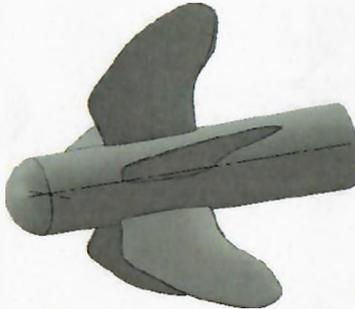
Лист и сема

Лист № подл.



ПРИЛОЖЕНИЕ В

1

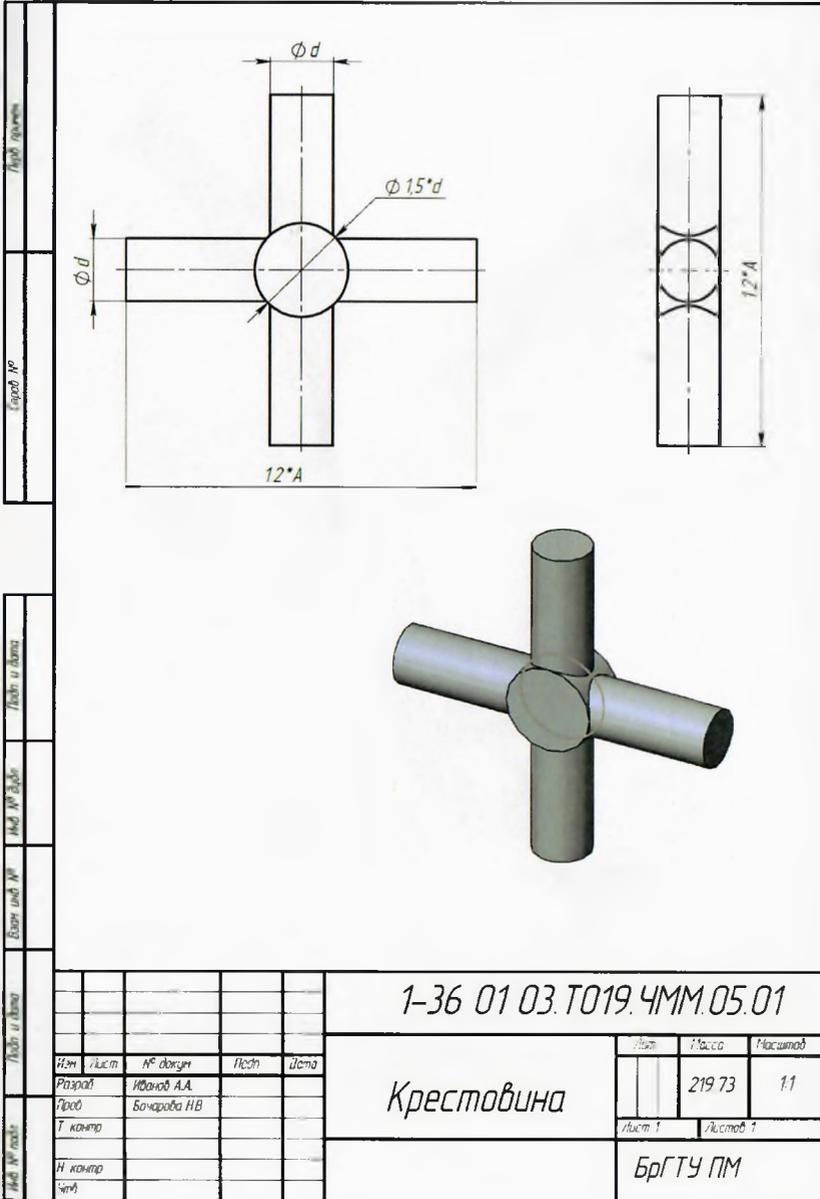


					1-36 01.03.Т019 09.04				
Изм.	Лист	ИР докум	Подп	Дата	Гребной винт		Лист	Масса	Масштаб
Разраб									
Проб					ГОСТ 19281-89		Лист 1	Листов 1	
7 копир							БрГТУ ПМ		
И.контр									
Знаб									

1 Копировал

Формат А3

ПРИЛОЖЕНИЕ Г.2



Копировал

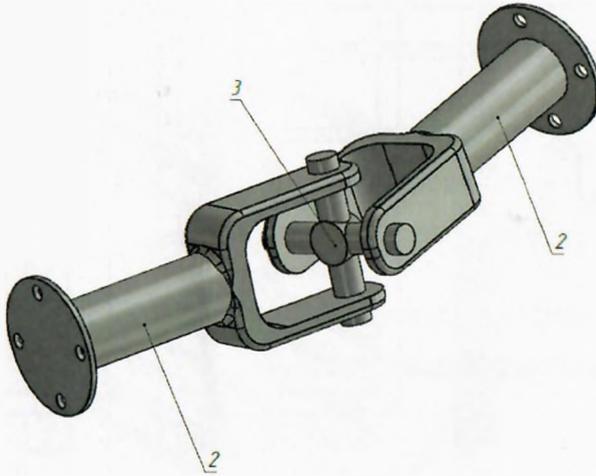
Формат А4

Карданная передача



ПОЗИЦИЯ	ОБОЗНАЧЕНИЕ	ОПИСАНИЕ	К-во
		Карданная передача	
1	1-36 01 03 ТО ЧММ 0105 00	Асинхронный шарнир	2

Асинхронный шарнир

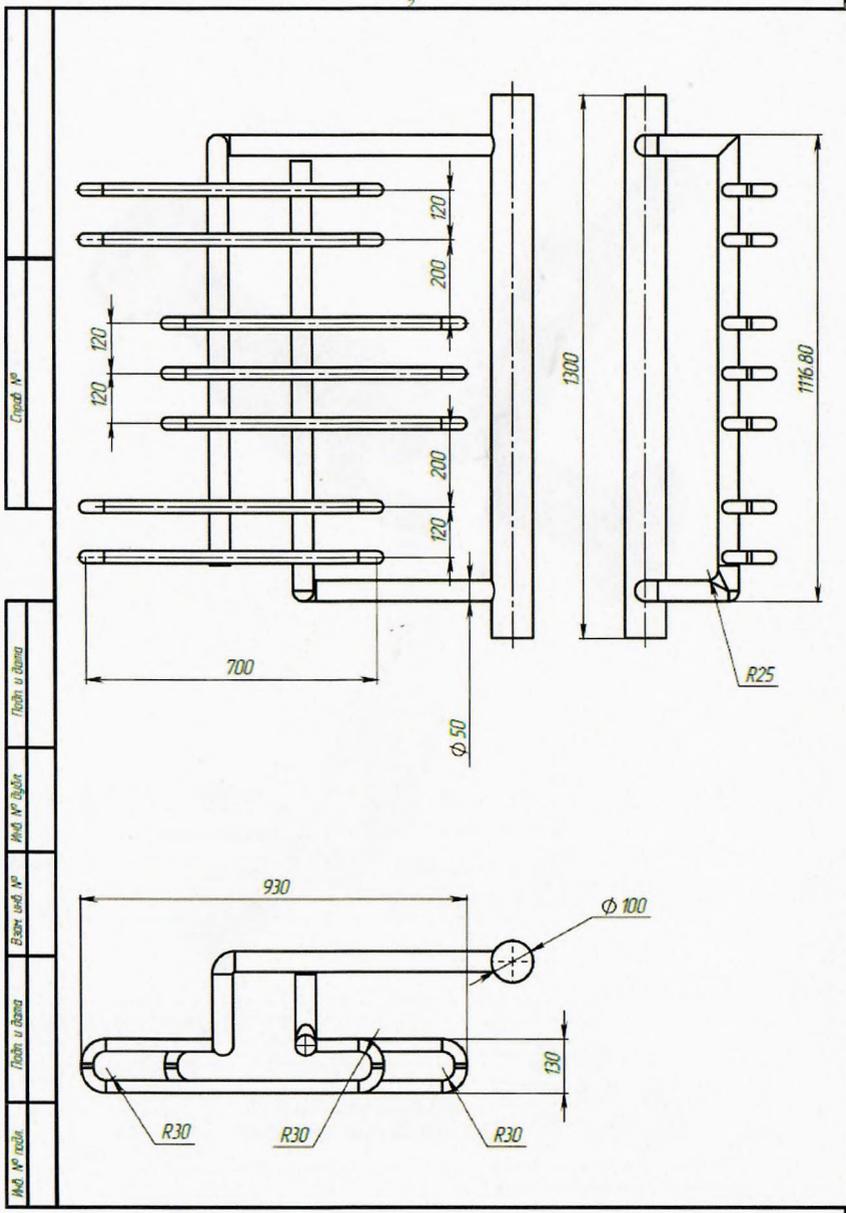


ПОЗИЦИЯ	ОБОЗНАЧЕНИЕ	ОПИСАНИЕ	К-ВО
1	1-36 01 03 ТО ЧММ 0105 00	Асинхронный шарнир	
2	1-36 01 03 ТО ЧММ 0105 01	Вилка	2
3	1-36 01 03 ТО ЧММ 0105 02	Крестовина	1

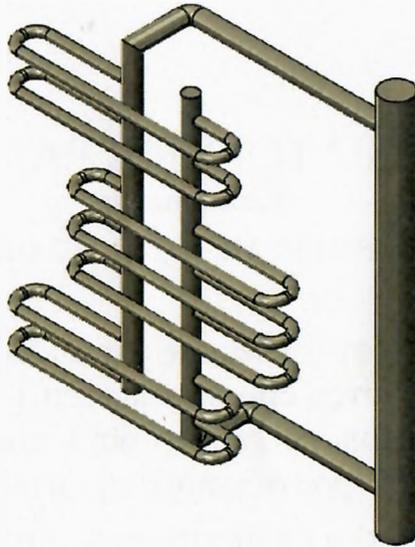
					<i>1-36 01 03 ТО ЧММ 0105 00</i>		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<i>Асинхронный шарнир Карданная передача</i>		
Разраб.	Иванов						
Проб.	Бочарова				Лист	Масса	Масштаб
Т. контр.							1:20
					Лист 1	Листов 1	
И контр.					БрГУ кафедра ПМ		
Удп.							

Копировал

Формат А3



ПРИЛОЖЕНИЕ Д



					1-36 01.03Т019.17.06			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Полотенцесушитель	Лит	Масса	Масштаб
Разраб	Толстий						24.47	1:10
Град	Бачарова				Лист 1 из листов 1			
Г. констр					ГОСТ 5582-75	БРГТУ ПМ		
И. констр								
Узав								

Копировать

Формат А3

Учебное издание

Составители:

Бочарова Наталья Владимировна

Игнатюк Валерий Иванович

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ
по дисциплине
«Численные методы механики»

Методические указания
для студентов специальности 1-36 01 03
«Технологическое оборудование
машиностроительного производства»
дневной формы получения образования

Ответственный за выпуск: Бочарова Н. В.

Редактор: Митлошук М. А.

Компьютерная вёрстка: Соколюк А. П.

Корректор: Дударук С.А.

Подписано в печать 30.12.2022 г. Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага «Performer».
Гарнитура «Times New Roman». Усл. печ. л. 4,19. Уч. изд. л. 4,5. Заказ № 1531. Тираж 19 экз.
Отпечатано на ризографе учреждения образования «Брестский государственный
технический университет». 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/235 от 24.03.2014 г.