|  |  |
| --- | --- |
| *voenmeh* | МИНОБРНАУКИ РОССИИ  федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  высшего образования  **«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»**  **(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»)** |
| БГТУ.СМК-Ф-4.2-К5-02 |

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Факультет |  | Е |  | Оружие и системы вооружения |
|  |  | шифр |  | наименование |
| Кафедра |  | Е7 |  | Механика деформируемого твердого тела |
|  |  | шифр |  | наименование |
| Дисциплина |  | Математические методы в механике-4 | | |

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

на тему

|  |
| --- |
| Решение объёмной задачи на статическую и |
| сейсмическую прочность |
| методом конечных элементов |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Выполнил студент группы: | | | |  | Е7М41 |
| Конотопов О.И. | | | | | |
| Фамилия И.О. | | | | | |
| **РУКОВОДИТЕЛЬ:** | | | | | |
| Павлов А.С. | |  |  | | |
| Фамилия И.О. Подпись | | | | | |
| Оценка |  | | | |  |
| «\_\_\_\_\_» |  | | | | 2018г. |

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2018 г.

РЕФЕРАТ

Рисунков – 14;

Использованных источников – 7;

НАПРЯЖЕНИЯ, АНАЛИЗ, ПЕРЕМЕЩЕНИЯ, МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, РАСЧЁТ, НАГРУЗКА

В данной работе объектом исследования является конструкция: соединение тройника с крышкой под задвижку.

Цель работы – Описание методов сеточного моделирования, описание работы программы ANSYS, проведение прочного расчёта фланцев и болтов, сейсмический анализ прочности.

В работе приведены результаты силовых расчётов в программы Mathcad, анализ прочности конструкции с помощью пакета программ ANSYS, определение собственных частот конструкции и проверка сейсмической прочности с использованием модулей Modal и Static Structural программы ANSYS.

**СОДЕРЖАНИЕ**

[**ВВЕДЕНИЕ** 4](#_Toc532909541)

[**1 Контроль качества сетки МКЭ** 6](#_Toc532909542)

[**2 Виды нагружения конструкции** 8](#_Toc532909543)

[**3 Построение исходной расчётной модели** 15](#_Toc532909544)

[**4 Сейсмическая прочность конструкции** 17](#_Toc532909545)

[**5 Статическая прочность фланцев и болтов** 20](#_Toc532909546)

[**ЗАКЛЮЧЕНИЕ** 25](#_Toc532909547)

[**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ** 27](#_Toc532909548)

# **ВВЕДЕНИЕ**

Метод конечных элементов (МКЭ) - основной метод современной строительной механики, лежащий в основе подавляющего большинства современных программных комплексов, предназначенных для выполнения расчетов строительных конструкций на ЭВМ.

Но диапазон его применения чрезвычайно широк: строительство   и машиностроение, гидро-  и аэродинамика, горное дело и новейшая техника, а также различные задачи математической физики – теплопроводности, фильтрации, распространения волн и т. д.

Метод конечных элементов впервые был применен в инженерной практике в начале 50-х гг. XX в.  Первоначально он развивался по двум независимым один от другого направлениям – инженерному и математическому.  На раннем этапе формулировки МКЭ основывались на принципах строительной механики, что ограничивало сферу его применения.  И только когда были сформулированы основы метода в вариационной форме, стало возможным распространение его на многие другие задачи.  Быстрое развитие МКЭ шло параллельно с прогрессом современной компьютерной техники и ее применением в различных областях науки и инженерной практики.

 Главные достоинства МКЭ:

• исследуемые объекты могут иметь любую форму и различную физическую природу – твёрдые деформируемые тела, жидкости, газы, электромагнитные среды;

• конечные элементы могут иметь различную форму, в частности криволинейную, и различные размеры;

• можно исследовать однородные и неоднородные, изотропные и анизотропные объекты с линейными и нелинейными свойствами;

• можно решать как стационарные, так и нестационарные задачи;

• можно решать контактные задачи;

• можно моделировать любые граничные условия;

• вычислительный алгоритм, представленный в матричной форме, формально единообразен для различных физических задач и для задач различной размерности, что удобно для компьютерного программирования;

• на одной и той же сетке конечных элементов можно решать различные физические задачи, что облегчает анализ связанных задач;

• разрешающая система уравнений имеет экономичную разреженную симметричную ленточную матрицу жёсткости, что ускоряет вычислительный процесс на ЭВМ.

# **1 Контроль качества сетки МКЭ**

Генераторы сеток прошли несколько десятилетий непрерывного развития, чтобы к настоящему моменту минимально подготовленный пользователь мог создавать сетки с качеством, достаточным для получения адекватных результатов. Однако, как действительно понять, хороша ли построенная сетка для данного анализа? Достаточно хорошими сетками можно считать такие сетки, расчеты на которых дают приемлемые по точности результаты. При этом полагается, что для создания расчетной модели использованы адекватные реальности входные данные. Плотность сетки или степень измельчения элементов является одним из важнейших параметров контроля точности решения (выбранные тип и форма элементов, несомненно, тоже важны). При отсутствии сингулярностей в модели (острых углов, нагрузок и закреплений, приложенных в точке) более мелкая сетка даст боле точный результат. Тем не менее, большое количество число элементов в мелкой сетке потребует больших затрат в плане оперативной памяти вычислительной станции и расчетного времени. Особенно это актуально в типах анализов, где для сходимости требуется несколько итераций на шаге, таких как нелинейный анализ или анализ переходных процессов.

Одним из способов оценки качества сетки (и модели в целом) может стать верификация результатов расчета с помощью экспериментальных данных или аналитических решений. К сожалению, они не всегда доступны, если и вообще существуют. Таким образом, в инженерной практике нашли применение другие методы оценки качества. В их числе последовательное измельчение сетки, а также интерполяция скачков в значениях результатов.

Основной и наиболее точный метод оценки качества сетки предлагает нам последовательное уменьшение размера элементов до тех пор, пока какой-нибудь значимый результат, такой как, например, максимальное напряжение в определенной зоне, не сойдется к некоторому значению (то есть с каждой итерацией изменение напряжения будет меньше заданного допуска).

Основным недостатком описанного метода является необходимость несколько раз перестраивать сетку и перерешивать задачу. Для небольших моделей это может быть некритично, но если выполняется анализ большой сборки, то исследование сходимости может занять много времени. В этих случаях может быть реализован другой метод, заключающийся в оценке величины скачка напряжений между соседними элементами в зоне концентрации. В МКЭ напряжения в элементе вычисляются непосредственно в точках интегрирования (точки Гаусса) и экстраполируются в узлы на границах элементов. Обычно в итоге анализируют величины, полученные путем осреднения по узлам. Величина скачка напряжения убывает с улучшением качества сетки. Таким образом этот метод также подходит для контроля за размером элементов.

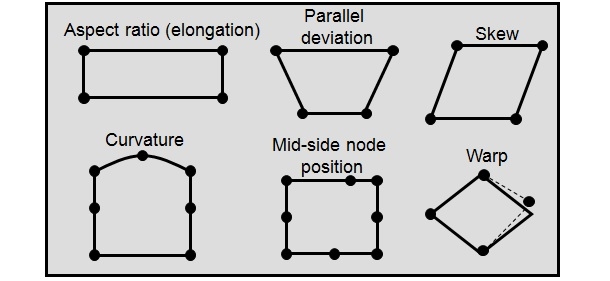


Рисунок 1 – Метрики качества сетки

Для проверки качества элементов в ANSYS есть несколько метрик. Они призваны измерить и охарактеризовать способность элемента переносить данные между пространством элемента (численным пространством) и реальным, физическим пространством. Этот шаг является особенно важным в МКЭ. Некоторые из этих метрик показаны на рисунке 1. Элемент идеальной формы – это элемент с углом 90 градусов для четырехугольников и гекса элементов, и с углом 60 градусов для треугольников и тетраэдров, причем не сильно вытянутый.

# **2 Виды нагружения конструкции**

* Постоянные нагрузки

Нагрузки, действующие на конструкцию в течение всего времени эксплуатации конструкции, будь то одна секунда или одно тысячелетие.

Как правило к постоянным нагрузкам относится только нагрузка от собственного веса конструкции. Например, для ленточного фундамента постоянной нагрузкой будет собственный вес всех элементов здания, а для фермы перекрытия - собственный вес верхнего и нижнего пояса, стоек, раскосов и соединительных элементов. При этом для каменных или железобетонных элементов нагрузка от собственного веса может составлять больше половины от расчетной нагрузки, а при расчете фундамента и все 90%, а для металлических и деревянных конструкций покрытий и перекрытий нагрузка от собственного веса как правило не превышает 3-10%.

* Временные нагрузки

Это все остальные нагрузки, действующие на конструкцию. В свою очередь временные нагрузки принято разделять на длительные и кратковременные:

* Длительные нагрузки

Нагрузки - время действия которых значительно больше времени, в течение которого в конструкции происходят деформации под действием этих нагрузок.

Дело в том, что любое тело, в том числе и человеческое, под действием нагрузок деформируется, т.е. изменяются геометрические параметры тела, такие как длина, ширина, высота, прямолинейность осей и другие, а это может непосредственно влиять на работу рассматриваемого элемента. Например, когда при расчете на прочность мы составляем уравнения равновесия для балки, рассматриваемой, как прямолинейный стержень, то влияние деформаций мы при этом не учитываем. Учет деформаций ведется при расчете по второй группе предельных состояний. Так вот, деформация любого тела - процесс не мгновенный. Проще говоря, на то чтобы материал деформировался - нужно время и чем больше инерционная масса рассматриваемого элемента, тем больше времени на деформацию нужно. Например, для легкого материала, например: корабельного паруса из мешковины, порыв ветра может рассматриваться как длительная нагрузка, а вот для каменной стены толщиной в 1 метр тот же порыв ветра может рассматриваться как кратковременная нагрузка. Поэтому деление на длительные и кратковременные нагрузки является достаточно условным и зависит от инерционной массы рассматриваемого материала. А кроме того при этом следует учитывать и другие факторы, влияющие на время развития деформаций. Например, время деформации проседающих или пучинистых грунтов может измеряться неделями и даже месяцами, потому нагрузка от снега, лежащего несколько дней на кровле здания, при расчете фундамента может рассматриваться как кратковременная. А вот при расчете кровельного покрытия эта же нагрузку следует рассматривать как длительную.

* Кратковременные нагрузки

Это нагрузки, время действия которых сопоставимо со временем, в течение которого конструкция деформируется под действием этих нагрузок.

Но в данном случае для описания кратковременной нагрузки только времени действия недостаточно, потому как, если вы аккуратно поставите на 1 секунду мешок с цементом на пол - это одна нагрузка, а если вы тот же мешок с цементом уроните на пол с высоты 1 метр, при этом время контакта мешка с полом будет составлять все ту же 1 секунду, но это будет уже совсем другая нагрузка.

Для более точного определения нагрузки дополнительно разделяются на статические и динамические.

* Статические нагрузки

Условно говоря, это силы, приложенные с минимальным ускорением или с ускорением, стремящимся к нулю. Таким образом действие инерционной силы при столь малых ускорениях стремится к нулю и расчет ведется только на действие силы от физической массы. В результате этого равновесие между внешними и внутренними силами в любой момент действия статической нагрузки остается неизменным. К статическим относятся постоянные и длительные нагрузки, иногда кратковременные нагрузки.

* Динамические нагрузки

Это нагрузки, изменяющиеся не только во времени, но и в пространстве.

Для динамических нагрузок характерна относительно большая скорость приложения, что требует при расчетах учитывать инерционную массу как объекта, создающего нагрузку, так и элемента, подвергающегося воздействию нагрузки. Другими словами, следует учитывать характер движения объекта, создающего нагрузку, а также то, что инерционные массы элементов конструкции, подвергающиеся воздействию динамической нагрузки, перемещаются с ускорением и влияют на напряженно-деформированное состояние элементов. Чтобы учесть это влияние, в уравнения статического равновесия к внешним и внутренним силам добавляются силы инерции на основании принципа Даламбера. Добавление инерционных сил позволяет рассматривать любую движущуюся систему как находящуюся в состоянии статического равновесия в любой момент времени. Таким образом динамические нагрузки вызывают в материале исследуемого элемента конструкции динамические напряжения и поведение материала при этом оказывается отличным от поведения при статических напряжениях.

В свою очередь динамические нагрузки в зависимости от характера движения бывают также нескольких видов. Для строительных конструкций наиболее важными являются подвижные и ударные нагрузки:

* Подвижные нагрузки

Это нагрузки возникающие в результате перемещения некоего объекта по поверхности исследуемой конструкции (вдоль рассматриваемой оси элемента).

Например, автомобиль, проезжающий по мосту, создает подвижную нагрузку на элементы моста. При этом подвижная нагрузка будет зависеть не только от массы автомобиля, но и от его скорости и траектории движения. Например, при движении по окружности центробежная сила будет тем больше, чем больше скорость движения, потому улететь в кювет на плохой дороге на большой скорости - пара пустяков.

* Ударные нагрузки

Это нагрузки, возникающие в момент соприкосновения перемещающегося объекта с поверхностью исследуемой конструкции (вдоль или поперек рассматриваемой оси элемента).

Однако и это еще не все варианты классификации нагрузок. По площади приложения нагрузки делятся на сосредоточенные и распределенные.

* Сосредоточенные нагрузки

Это силы, площадь приложения которых пренебрежимо мала по сравнению с площадью рассчитываемой конструкции.

Можно сказать, что сосредоточенная нагрузка - это и есть сила, действующая на конструкцию. При этом площадь действия силы не учитывается, а потому измеряется сосредоточенная нагрузка в килограммах или Ньютонах.

* Распределенные нагрузки

Это все остальные нагрузки, т.е. силы, распределяющиеся по длине и ширине элемента.

Разнообразие распределенных нагрузок поистине не поддается описанию. Распределенные нагрузки могут равномерно и неравномерно распределенными, равномерно и неравномерно изменяющимися по длине или ширине, при этом характер изменения нагрузки может описываться уравнением параболы, синусоиды, окружности, овала и любым другим уравнением.

Исходя из этого, выполняется идеализация материалов тел и сред:

1. Свойства материала одинаковы во всех точках, и изменение свойств в любой точке происходят по единому закону. Реальный материал неоднороден в силу его атомного и молекулярного строения и наличия кристаллических зерен, однако уже для малой частицы dV свойства выравниваются и принимаются однородными.

2. Изотропность - одинаковость изменения свойств в каждой точке материала по направлениям. Отдельно взятый кристалл материала анизотропен, но бесконечное количество хаотично расположенных кристаллов в малой частице dV изотропно.

3. Непрерывность (сплошность) свойств – считается, что характеристики материала изменяются как непрерывные функции, без разрывов. Разностью значений на стыке двух кристаллов пренебрегается.

4. Упругость - способность восстановления изменения размеров и формы твердого тела при его нагружении в определенном диапазоне по линейному или нелинейному законам. Материал обладает свойством идеальной упругости, когда тело (конструкция) полностью восстанавливает начальную форму и размеры после устранения причин, вызвавших его деформирование. Это справедливо при нагружениях, не превышающих для материала тела некий параметр, называемый пределом упругости. При нагрузках его превышающих, в материале возникают пластические (остаточные) деформации, не исчезающие после снятия нагрузки, или упругопластические — частично исчезающие. При таком нагружении первоначальная форма и размеры тела нарушаются, тем не менее, при разгрузке и дальнейшей нагрузке тела упругие свойства материала всегда сохраняются, вплоть до разрушения.

5. Идеализация малости деформированных размеров тела. Считается, что величины изменения размеров и формы тела малы по сравнению его размерами. Поэтому уравнения статического равновесия для деформированного (нагруженного) и недеформированного (ненагруженного) тела идентичны. Простейшими элементами конструкций (ограниченными средами) считаются балки, стержни, стойки, стенки, пластины, оболочки, обечайки и другого вида элементы пространства.

6. Идеализация геометрической формы (3 группы): массивные тела – это элементы в которых отношение трёх размеров одного порядка и лежит в пределах 1/3-3/1; пластины, листы, панели, оболочки, стенки, обечайки – элементы в которых два размера больше третьего в 10 раз; брусья (стержни, стойки, балки, колонны) – это элементы с отношением длины к двум размерам поперечного сечения порядка 5-10 раз

7. Идеализация конструкции. Понятие расчетная схема.

Реальные конструкции различного назначения состоят из набора элементов различной конфигурации, различных свойств материалов и т.п. Их взаимодействие между собой основано на каком-либо физическом процессе. Например, обеспечение неподвижности двух элементов – болта, и основания какой-либо детали выполняется затяжкой (вращением болта) в резьбе по поверхности резьбы основания для создания большой силы трения. Наличие этой постоянной силы (в пределах упругости) не позволяет соединению разрушиться, и, в тоже время, при выкручивании болта разъединяет соединение. Поэтому для выполнения расчетов усилий составляют такую расчетную схему, в основе которой лежат основные базовые характеристики и элементов конструкции и физических процессов, на которых она основана.

8. Идеализация кинематических связей и внешних силовых воздействий. Идеализация геометрической формы. На границах контакта элементов конструкции, существуют воздействия разной физической природы. Например, в прочностных задачах - это распределенные силы, в тепловых- это теплопотоки и т.д.

# **3 Построение исходной расчётной модели**

Исследуемый объект представляет собой тройник, соединённый с помощью болтов с крышкой задвижки, выполненной по ГОСТ 9698-86. В ходе решения данной задачи будет учитываться контакт различных тел между собой.

Исходные данные для расчёта:

Материал - сталь марки 08Х18Н10Т;

Давление среды P = 4 МПа;

Исходная модель, которая будет анализироваться представлена рисунке 1.

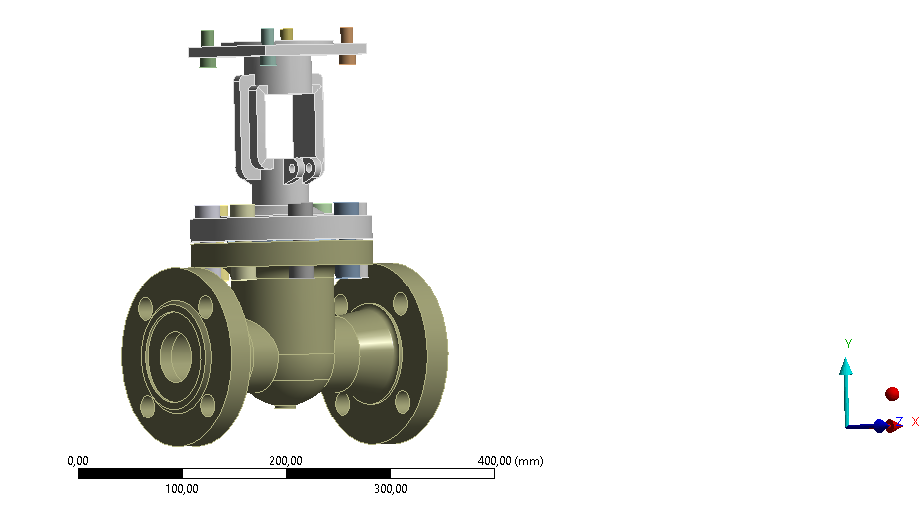


Рисунок 1 – Общий вид модели

Разбиение на сетку будем производить с использованием тетраэдральных и шестигранных элементов. Сетка конечно-элементной модели показана на рисунке 2.

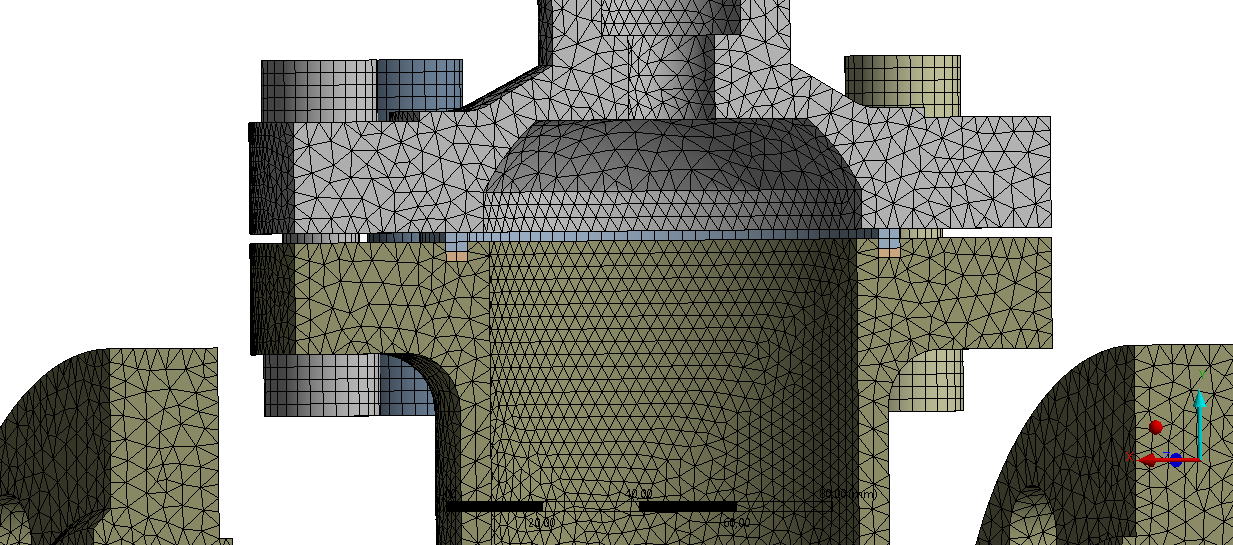


Рисунок 2 - Сетка конечных элементов модели

Количество элементов - 160000, количество узлов – 289000.

В данном расчёте используется несколько деталей: крышка, тройник, прокладка и болты. Между ними нужно задать контактные поверхности, для правильного распределния сил и напряжений по телам. Контакты установлены на поверхностях болтов в местах контактов с деталями, а также на поверхностях соприкосновения прокладки и крышки с тройником. Некоторые контактные поверхности приведены на рисунке 3.

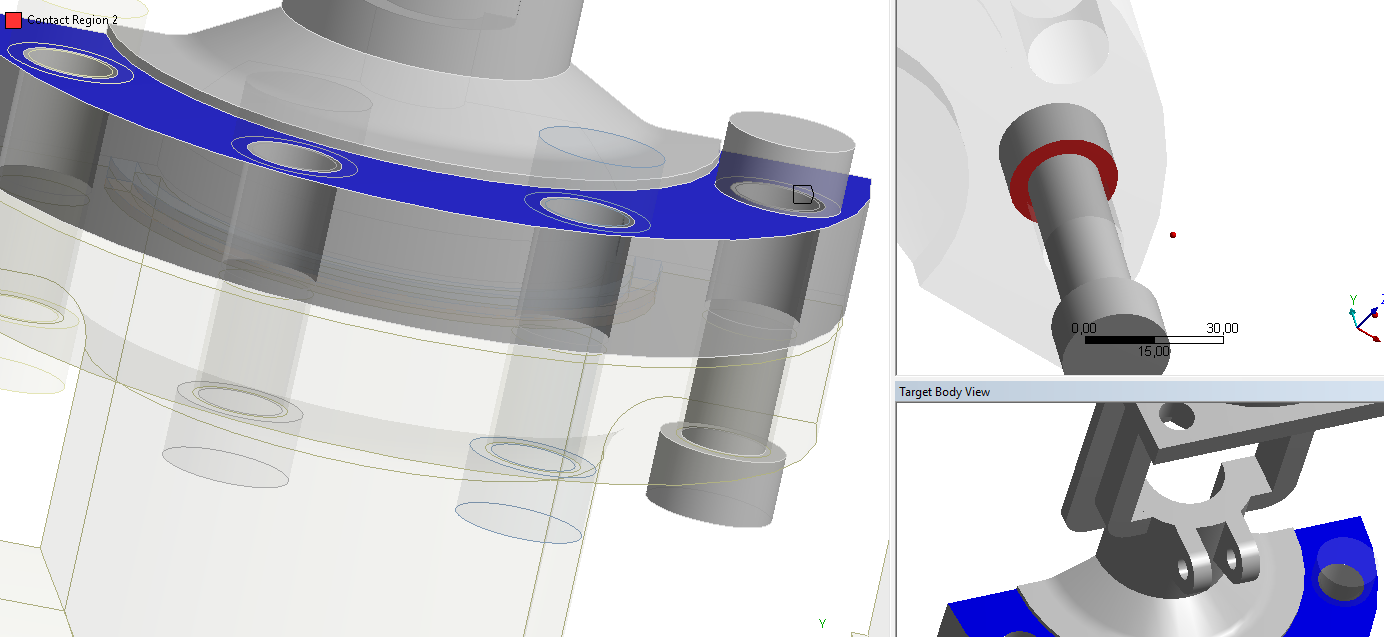


Рисунок 3 – Контактные поверхности болта и крышки

# **4 Сейсмическая прочность конструкции**

Для определение сейсмической прочности в начале нужно определить собственные частоты колебаний. Для этого воспользуемся модулем Modal. Будет достаточно определить первые 2 формы колебаний для дальнейшего расчёта. Для более результативного решения в верхней части крышки распределим массу двигателя – 50 кг, который будет там крепиться. Полученные собственные частоты показаны на рисунке 4.

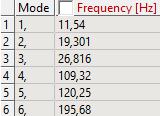


Рисунок 4 – Собственные частосты модели

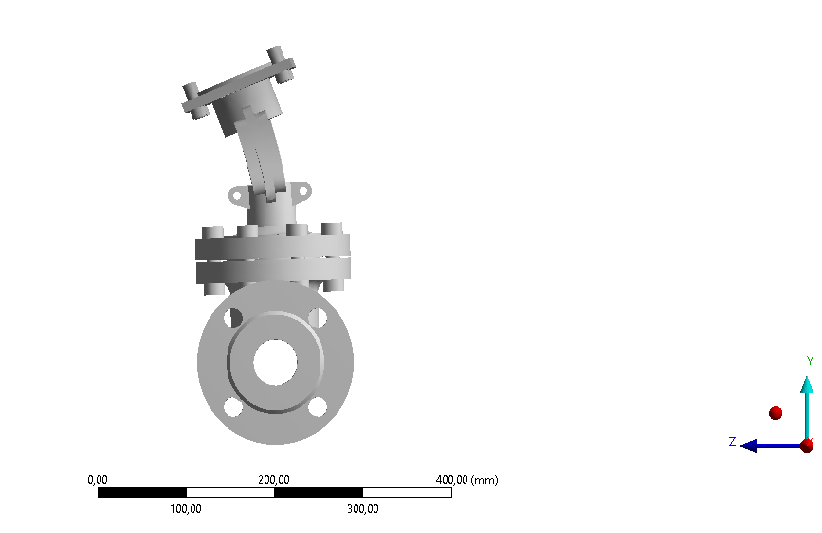


Рисунок 5 – Первая форма колебаний

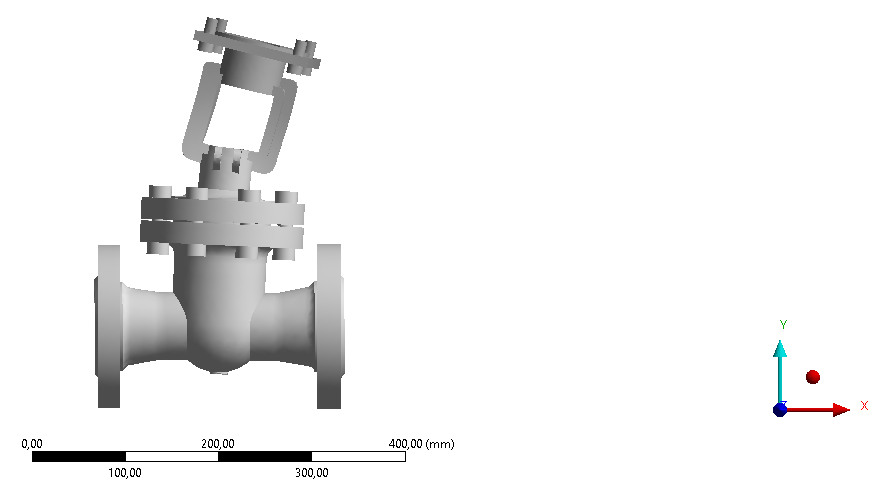


Рисунок 6 – Вторая форма колебаний

Частота собственных колебаний в первой форме равна 10.6 Гц. Обратимся к ГОСТ 30546.1-98, чтобы определить опасные для данной ситуации ускорения и приложить их к исследуемым телам.

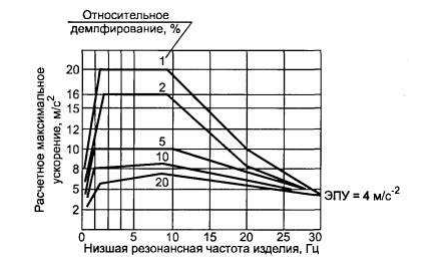


Рисунок 7 – Опасные ускорения для резонансных частот

По рисунку 7 принимаем горизонтальное ускорение aгор=1.6\*g, вертикальное aверт=0.7\*aгориз.

aгор=16м/с^2

aверт=11.2м/с^2

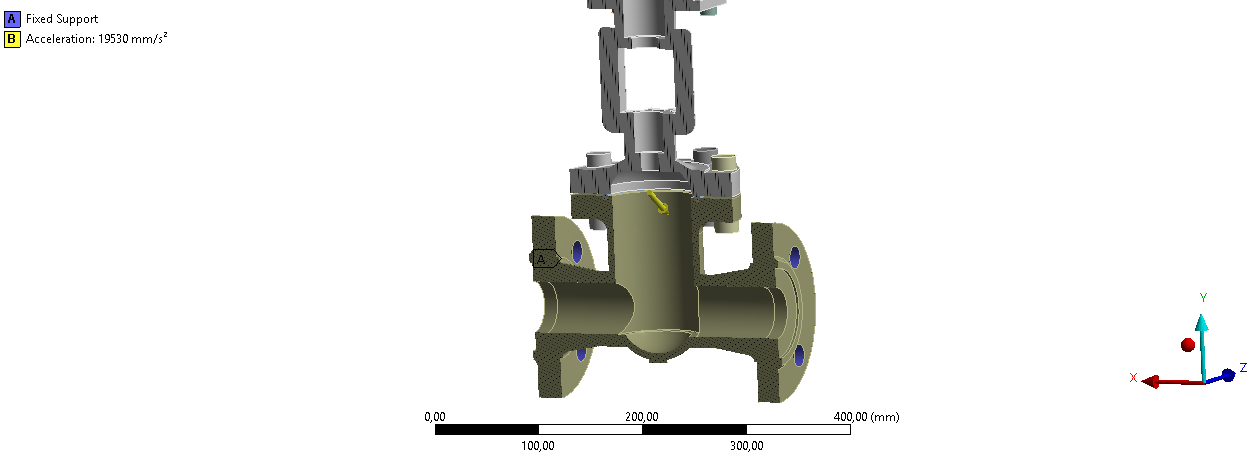


Рисунок 8 – Рассчётная схема сейсмического нагружения

Закрепления (Рисунок 8) произведены в отверстиях фланца тройника, суммарное ускорение приложено, как показано на рисунке.

Результатом нашего расчёта будет распределние эквавалентных напряжений, возникающих от приложенного ускорения (Рисунок 9).

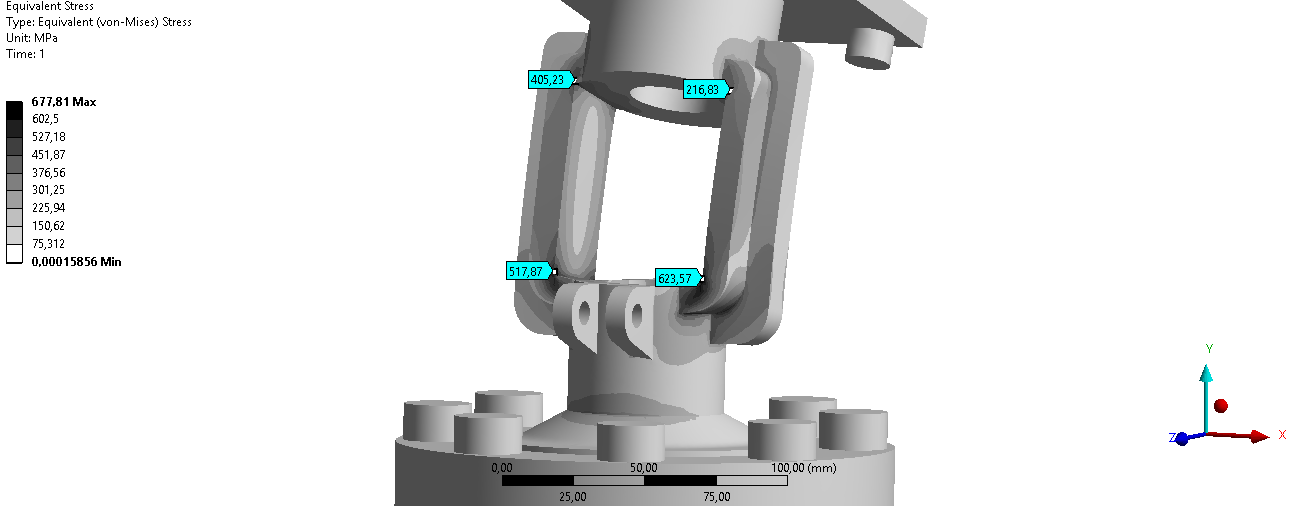


Рисунок 9 – Эквивалентные напряжения в крышке задвижки

Как видно из рисунку при резонансной частоте возникают критические для данной конструкции напряжения, потому нельзя допускать воздействия таких частот на рассматриваимаю конструкцию.

# **5 Статическая прочность фланцев и болтов**

Задача данного расчёта – проверка на прочность болтов и фланца. Этому предшествует силовой расчёт задвижки для определения оптимальных геометрических размеров исследуемых тел, а также расчёт усилия затяга, которое нужно приложить к болтам. Эти расчёты произведены в пакете Mathcad. Расчёты представлены на рисунке 10.

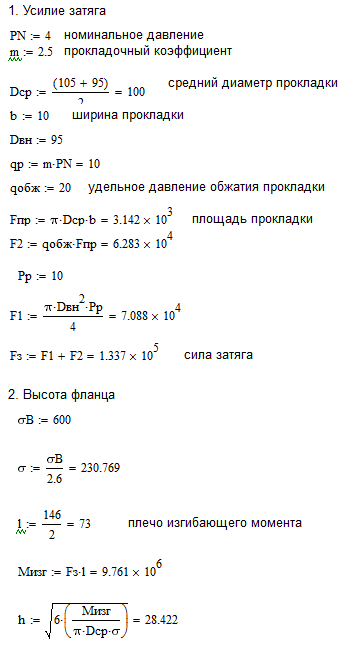


Рисунок 10 – Фрагмент кода программы Mathcad

Для облегчения программных вычислений в ходе расчёта будет рассматриваться половина исходной конструкции, плоскости симметрии указаны на рисунке 11.

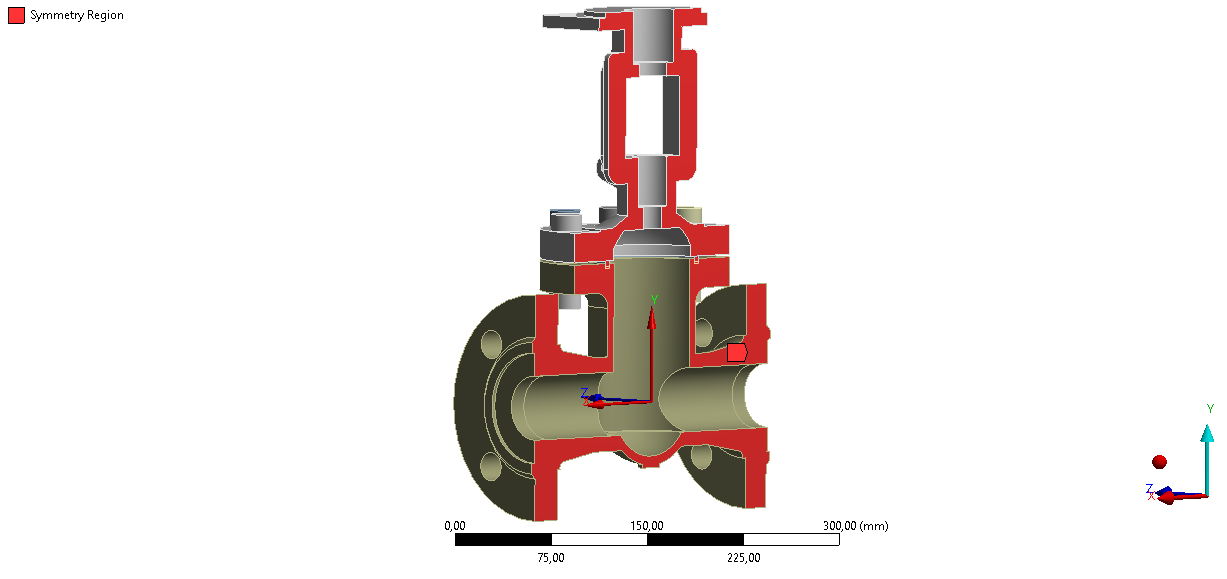


Рисунок 11 – Конструкция с плоскостями симметрии

При анализе на прочность фланца и болтов ход приложения нагрузок был разбит на два шага. На первом прикладывается сила затяжки болтов, что имитирует сборку конструкции. На втором шаге будет приложена нагрузка – внутреннее давление, на предварительно нагруженный фланец в том числе.

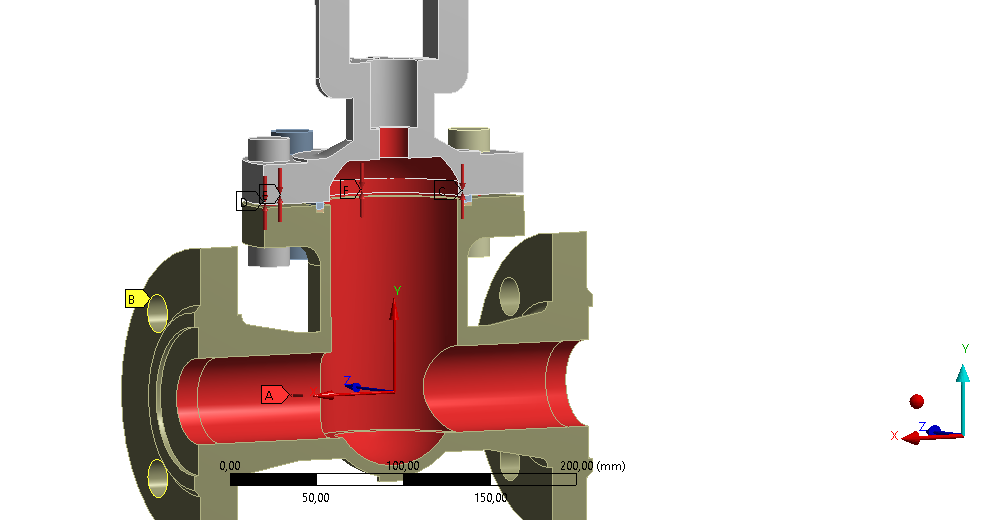


Рисунок 12 – Расчётная схема статического нагружения

На рисунке 12 буквами показаны нагрузки и закрепления:

А – Давление 4 МПа, приложенное на втором шаге;

B – Закрепления в отверстиях тройника;

С – Сила затяга, на каждый болт 8000 Н.

В результате мы получим распределение эквивалентных напряжений по энергетической теории прочности, они показаны на рисунке 13.

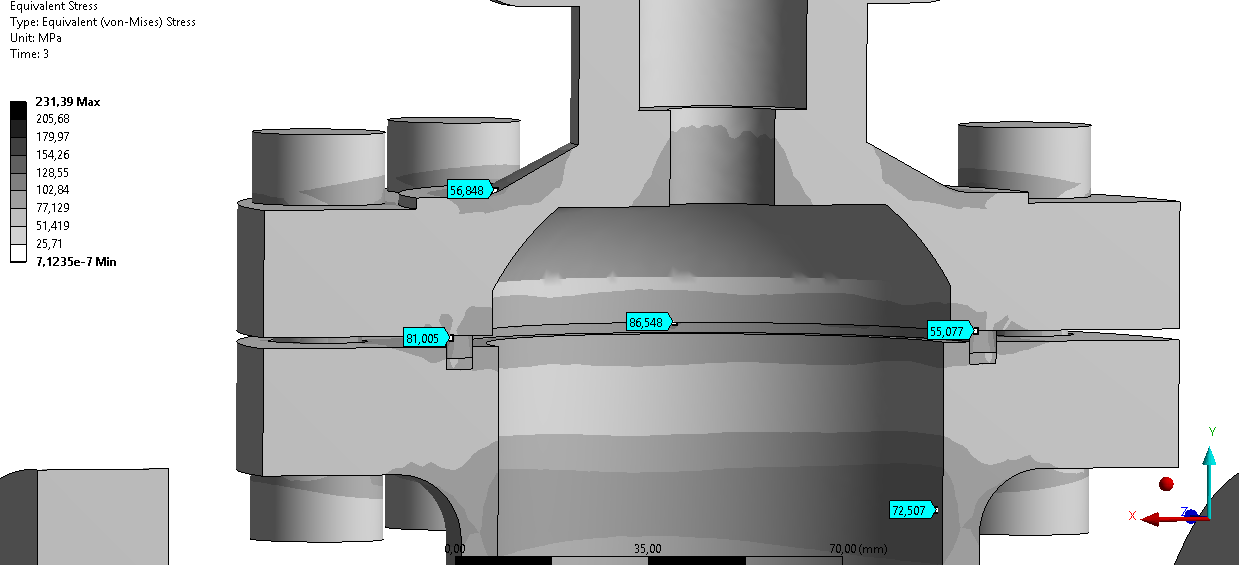


Рисунок 13 – Распределение эквивалентных напряжений

Как можно видеть из рисунка 13, напряжения во фланце не достигают опасных значений для стали. Толщина фланца достаточна и обладает большим запасом для применения такого крепления.

На рисунке 14 показаны суммарные перемещений, которые тоже не вызывают опасения.

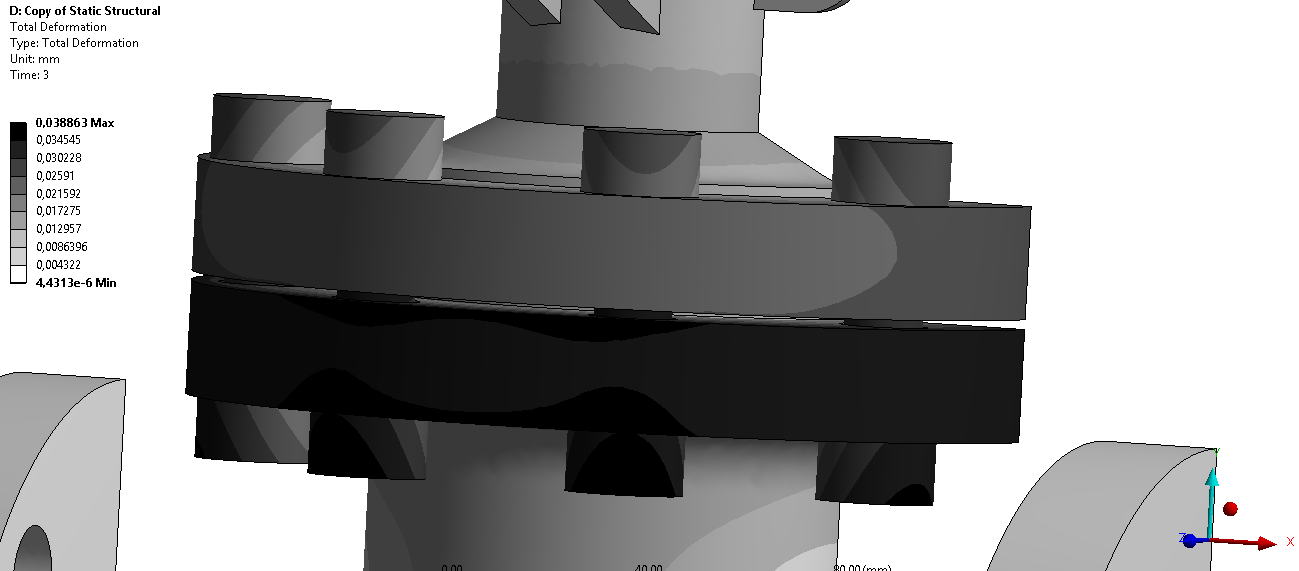


Рисунок 14 – Распределение суммарных перемещений

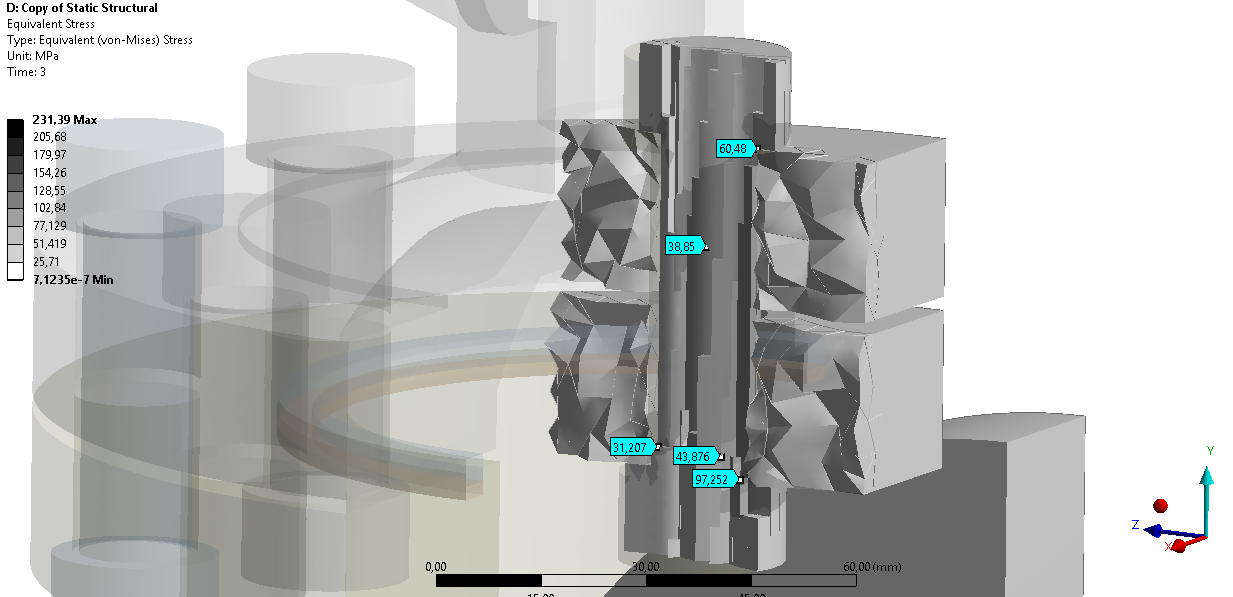


Рисунок 14 – Распределение эквивалентных напряжений в сечении болта

Для оценки прочности крепежного элемента обратимся к ГОСТ Р 52857.4-2007. В данном нормативном документе приведена таблица значений допускаемых напряжений в болтах и шпильках в зависимости от материала и рабочей температуры. Для наших крепежных элементов допускаемое напряжение – 110 МПа.

В таком случае выполняется условие прочности, так как в среднем напряжения в болтах составляют около 35-40 МПа, если не считать точечных концентраторов напряжений на месте резкого изменения формы тела.

# **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Системы автоматизированного проектирования успешно внедрены в самые различные отрасли промышленности и продолжают активно развиваться. Уже ни одно предприятие не обходиться без систем автоматизированного проектирования. Вектор развития программных средств направлен на то, чтобы внедрять такие системы на всех стадиях жизненного цикла изделия, от анализа рынка до утилизации. В связи с тем, что данные программы являются часть информационных технологий, их развитие происходит стремительно. Современному инженеру нужно идти в ногу со временем и уметь использовать текущие программные средства, а также быть готовым к изучению новых, будущих систем.

Программный комплекс ANSYS позволяет решать большой спектр задач методом конечных элементов с применением ЭВМ. Интерфейс программы позволяет наглядно представлять полученный результат, и с опорой на полученные данные принимать решения по дальнейшему проектированию деталей и узлов системы. Возможность быстрого изменения нагрузки или других параметров позволяет посмотреть какое влияние они оказывают на конечный результат, и таким образом найти оптимальный вариант решения поставленной задачи.

Время, потраченное на выполнение произведенных расчётов несравнимо меньше, чем было бы затрачено при аналитическом расчёте. “Выигранное” время в процессе реальных разработок должно быть потрачено на проведение дальнейших экспериментов, построение моделей и изготовления опытных образцов. Это вытекает из того, что любые расчёты можно назвать “предположением” и они безусловно подтверждаться реальными опытами и экспериментами. Это связано с тем, что любой человек может ошибаться и получать результаты, отличные от реальных, даже использую точные вычислительные машины.

В ходе выполненной работы были решены все поставленные задачи. Описаны особенности работы с сеткой в программе ANSYS Workbench. Используя данную CAE систему проведен прочностной анализ статического нагружения и анализ сейсмической прочности конструкции.

# **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Федорова Н.Н., Основы работы в ANSYS 17. / Н.Н. Федорова, С.А. Вальгер, М.Н. Данилов, Ю.В. Захарова. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 210 с.
2. Павлов А.С., Решение задач механики деформируемого твёрдого тела в программе ANSYS: практикум / А.С. Павлов; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2014. – 34с.
3. Басов К.А., ANSYS в примерах и задачах / К.А. Басов под общ. ред. Д.Г. Красковского. – М.: КомпьютерПресс, 2002. – 224 с.
4. Обзор сеточных настроек в ANSYS. [Электронный ресурс] https://cae-club.ru/publications (дата обращения: 15.12.2018)
5. ГОСТ 9698-86. Задвижки. Основные параметры. Сб. стандартов. - М.: Стандартинформ, 2005.
6. ГОСТ 30546.1-98 Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям и методы расчета их сложных конструкций в части сейсмостойкости. М.: ИПК Издательство стандартов, 1999.
7. ГОСТ Р 52857.4-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений. М.: Стандартинформ, 2008