|  |  |
| --- | --- |
| *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 |
|  |  |  | | |

ОТЧЕТ

по научно-исследовательской работе в семестре на тему «Прочностной анализ конструктивных элементов специального назначения»

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Выполнил студент группы: | | | |  | Е7М41 |
| Фалин В.И. | | | | | |
| Фамилия И.О. | | | | | |
| **РУКОВОДИТЕЛЬ:** | | | | | |
| Титух И.Н. | |  |  | | |
| Фамилия И.О. Подпись | | | | | |
| Оценка |  | | | |  |
| «\_\_\_\_\_» |  | | | | 2019г. |

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2019 г.

**СОДЕРЖАНИЕ**

[1. Описание конструкции портальных ворот 2](#_Toc535402531)

[2. Описание конструкторской работы](#_Toc535402532) 3

[3. Метод конечных элементов 7](#_Toc535402533)

[4. Контроль качества сетки МКЭ](#_Toc535402534) 8

5. Виды нагружения конструкции………………………..…….........10

[Список использованных источников](#_Toc535402535) 17

## 1. Описание конструкции и назначения портальных ворот.

В ходе научно-исследовательской работы была изучена конструкция портальных ворот производимых ГОЗ «Обуховский завод».

Ворота представляют из себя комплекс стальных конструкций размещённых на выходах из железнодорожного тоннеля. Цель установки ворот – поддержание постоянной плюсовой температуры внутри тоннеля (рисунок 1).

Данное изделие имеет несколько особенностей:

1. Створки ворот приводятся в движение за счёт работы электромеханических приводов с помощью зубчатой передачи.
2. Прочность конструкции позволяет противостоять ветрам, но в свою очередь, в случае отказа системы открывания (будь то штатная или аварийная), ворота не нанесут существенных повреждений составу, который пройдёт через них.
3. Материалы составных частей подобраны так, чтобы штатно работать в температурном режиме от +40° до -50°.
4. Простота конструкции обеспечивает лёгкий монтаж изделия на объекте, а так же ремонт неисправных узлов.

Изделие разделяется на конструкции:

1. Сборки обслуживающих конструкций (лестницы, кронштейны, закладные и т.д.).
2. Узел мотор-редуктора и зубчатой передачи.
3. Узел размещения аварийных демпферов, теплоизоляции приводов, датчиков движения и проводов.

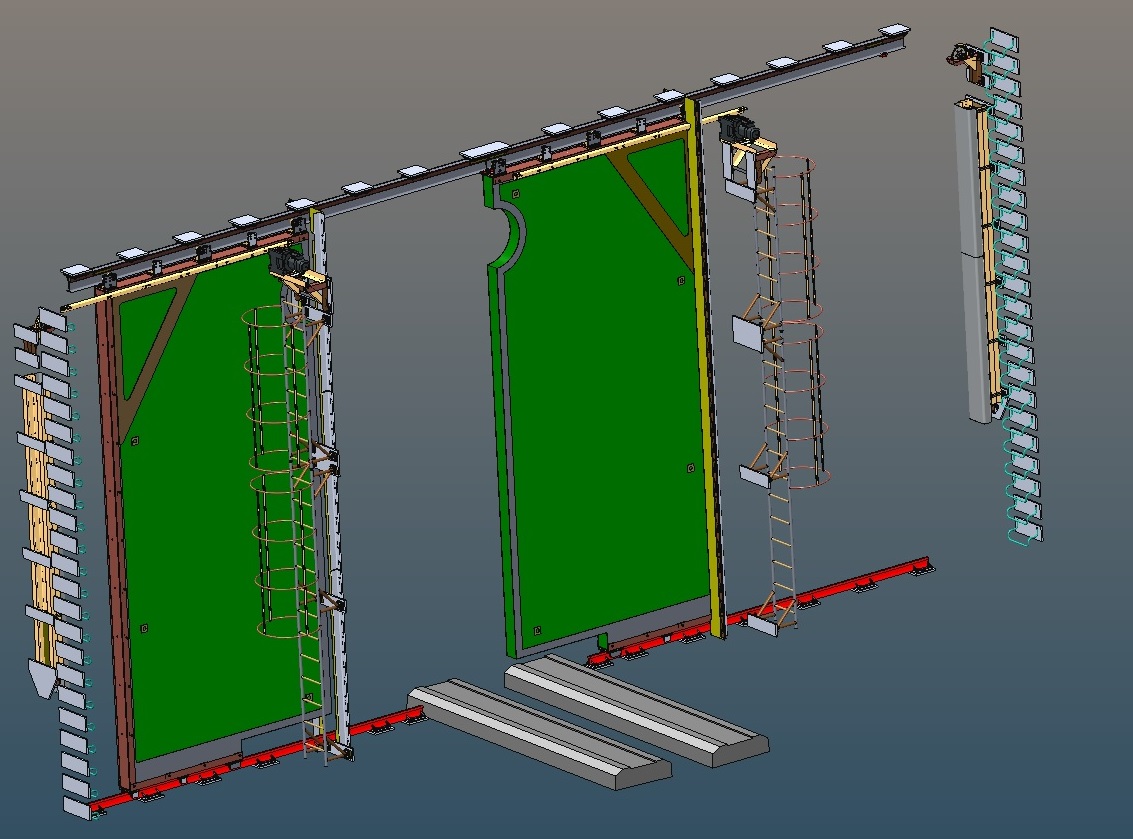
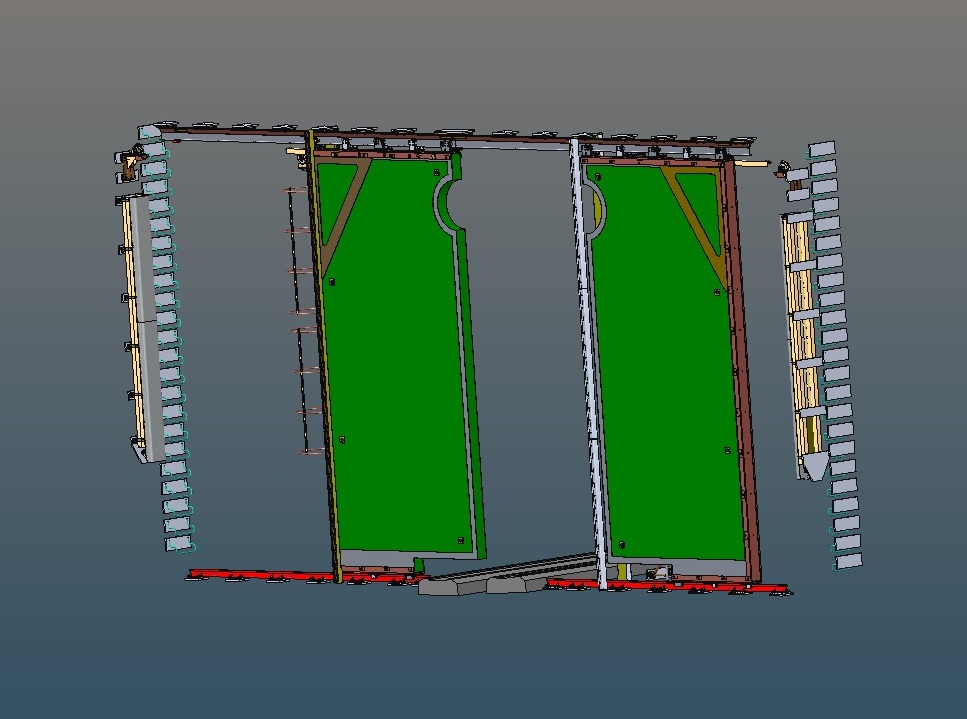


Рисунок 1. Модель портальных ворот.

## 2. Описание конструкторской работы.

Перед студентом была поставлена задача предотвращения разрушения ворот при аварийном открывании, которое представляет из себя следующий процесс:

* В случае отключения электроэнергии тормозные муфты моторов-редукторов отключаются и выходные валы получают возможность свободного вращения;
* Створки ворот приводятся в движения грузами, которые присоединены к ним и находятся в подвешенном состоянии;
* В момент завершения падения грузов, масса которых 250 кг, створки достигают скорости 1,3 м/с;
* Время полного открывания ворот в случае аварии составляет 22 секунды.

Чтобы избежать удара створок об бетонные основания припортального помещения, было принято решение установить на линии движения створок гидравлические буферы. Данные устройства позволят полностью затормозить створки и амортизировать удар.

Перед тем как начать расчёт подбора демпфера, необходимо рассчитать его положение во всей системе. Условия задачи на рисунке 2.

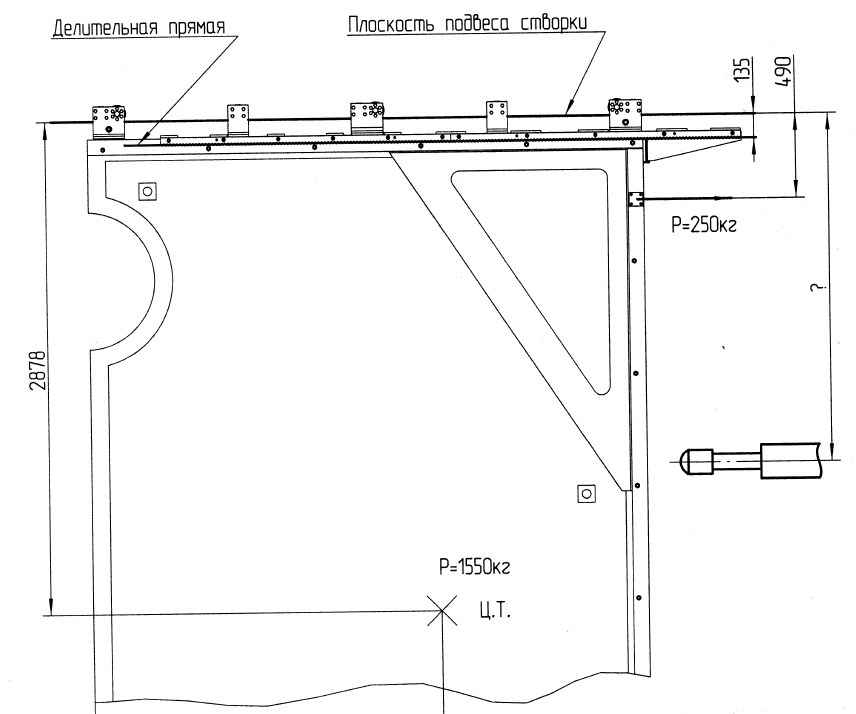


Рисунок 2. Исходные данные для расчета.

Масса груза .

Масса створки .

Расстояние от плоскости подвеса створки до центра масс створки .

Расстояние от плоскости подвеса створки до точки крепления груза .

Принято: для того чтобы скомпенсировать инерционные нагрузки при торможении (т. е. обеспечить минимальный опрокидывающий момент относительно буфера), буфер необходимо расположить на высоте центра масс системы, состоящей из створки и материальной точки, расположенной в месте крепления троса к створке и имеющей массу .

Воспользуемся формулой для нахождения центра масс системы материальных точек:

Таким образом, буфер необходимо расположить на расстоянии   
 от плоскости подвеса створки.

Далее необходимо подобрать подходящий к нагрузкам буфер. Подбор осуществлялся с помощью каталогов производителей данных изделий, а именно KOBA и WeForma.

Условия:

m – масса створки, равная 1550 кг;

u – скорость створки в момент столкновения с буфером, равная 1,3 м/с;

Кинетическая энергия груза Ек = mu2/2 = (1550 \* 1,69)/2 = 1309,75 Дж

Эффективная масса штока демпфера me будет равна массе створки, так как в данном случае столкновения потенциальная энергия будет равна нулю. Исходя из известных и полученных значений, был подобран демпфер КНА64-100LV. Характеристики данного изделия представлены на рисунке 4.

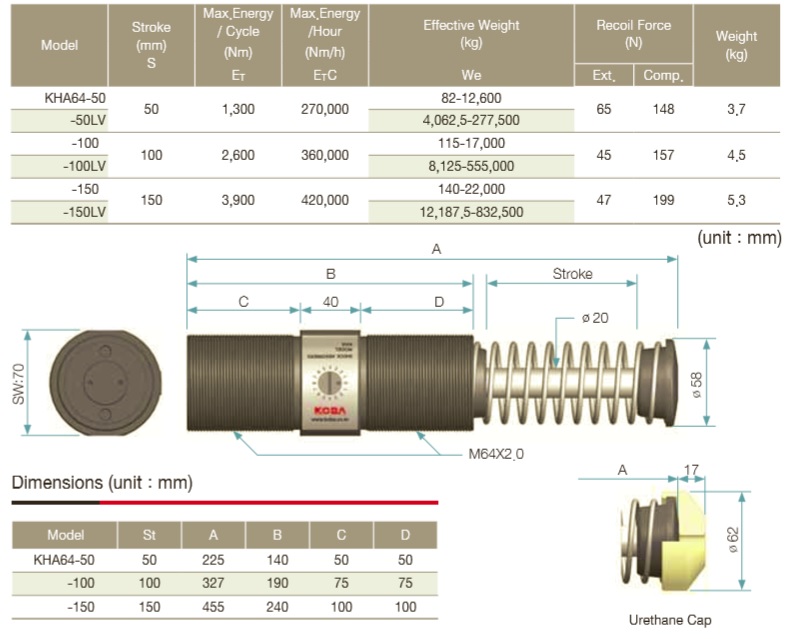


Рисунок 3. Характеристики линейки демферов КНА64.

Все конструкции данных ворот должны отвечать условиям прочности, которые заданы техническим заданием. Наиболее современный на сегодня способ расчета – использование программного пакета Ansys, в котором применяется метод конечных элементов.

# **3. Метод конечных элементов**

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 – твердые 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 жесткости, что ускоряет вычислительный процесс на ЭВМ.

# **4. 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.

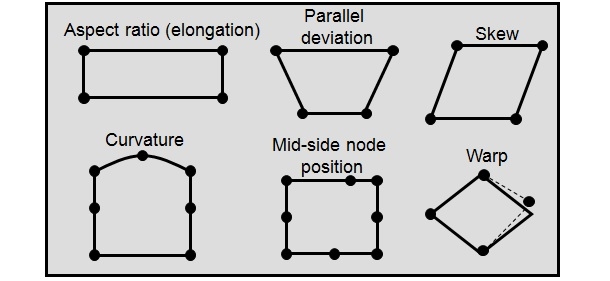


Рисунок 4 – Метрики качества сетки

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 4. 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.

# **5. 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 – 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 – 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 – 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 – 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 – нагрузки, 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 – 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.

## 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>
5. Каталог на промышленные амортизаторы и гидравлические буферы KOBA. [Электронный ресурс] <https://kobapage.com>
6. WeForma Shock Absorbers [Электронный ресурс] <https://weforma.com>