

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра Проектирование и эксплуатация автомобилей

(наименование)

23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Автомобили и автомобильный сервис

(направленность (профиль)/специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Оптимизация формы attenuатора спортивного болида Formula Student

Обучающийся

Е.В. Овсянников

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

канд. техн. наук, доцент И.В. Турбин

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Аннотация

В представленной работе бакалавра проведена углубленная проработка и оптимизация формы attenuатора спортивного болида Formula Student. Проведен анализ конструктивных особенностей карта.

Бакалаврская работа состоит из введения, четырех частей, заключения, рисунков, формул, списка литературы, включая зарубежные источники.

Ключевым вопросом бакалаврской работы является оптимизация формы attenuатора спортивного болида Formula Student.

Целью работы является оптимизация формы attenuатора спортивного болида Formula Student.

Бакалаврская работа может быть разделена на следующие логически взаимосвязанные части: теоретический аспект, основные понятия, обзор работ по оптимизации формы attenuатора, разработка attenuатора, сравнительный анализ разных видов attenuатора, оптимизация attenuатора и анализ оптимизированного attenuатора.

В оптимизированный attenuатор позволил улучшить форму энергопоглощающего элемента и пройти дополнительные требования. В изменения конструкции позволили полностью выполнить все требования регламента проекта «Formula Student».

Содержание

Введение	4
1 Теоретический аспект. Основные понятия. Обзор работ по разработке аттенюатора	5
2 Этапы построения конечно-элементного анализа.....	19
2.1 Построение энергопоглощающего элемента	19
2.2 Проект энергопоглощающего элемента	22
3 Сравнение энергопоглощающих элементов гоночных болидов	31
3.1 Энергопоглощающий элемент конусовидной формы.....	31
3.2 Энергопоглощающий элемент шестигранной формы.....	36
4 Анализ аттенюатора улучшенной конфигурации	42
Заключение	48
Список используемой литературы и используемых источников	49

Введение

Гоночные болиды спроектированы для участия в кольцевых гонках. Гонки по кольцевой трассе – один из самых зрелищных видов гонок. Не редко в соревнованиях участвуют студенты ВУЗов и колледжей.

Formula Student – это проект гоночного болида студентов ТГУ. Впервые проект начал реализовываться в 2007 году. За все этапы своего существования автомобиль перетерпел множество изменений.

Гоночный автомобиль помимо своих скоростных характеристик должен отвечать требованиям безопасности. Кольцевые гонки очень динамичные и высокоскоростные, поэтому безопасность пилота – это основной критерий которым должен обладать спортивный болид. Во время гонок автомобили часто сталкиваются с препятствиями или друг с другом. В связи с этим необходимо снабдить болид защищающими от столкновения элементами. Ими могут служить энергопоглощающие элементы, установленные на бампера автомобиля. Они способны забрать на себя основную силу удара и защитить пилота от травм.

Основной целью работы является: оптимизация формы аттенюатора спортивного болида Formula Student.

Задачами работы являются:

- рассмотреть теоретический аспект, основные понятия,
- разработать, конечно-элементную модель,
- рассмотреть разные виды энергопоглощающих элементов и выбрать наиболее подходящий,
- провести анализ разработанного улучшенного энергопоглощающего элемента.

Объектом исследования является Formula Student

Предметом исследования – энергопоглощающий элемент гоночного автомобиля.

1 Теоретический аспект. Основные понятия. Обзор работ по разработке аттенюатора

Энергопоглощающий элемент гоночного болида – это элемент установленный на бампере гоночного автомобиля, защищающий пилота от удара, он должен быть разработан в соответствии с регламентом и быть определенных размеров. Также он должен соответствовать показателям безопасности таким как перегрузка при ударе и величина деформации. По другому энергопоглощающий элемент можно назвать аттенюатором. «Согласно регламенту энергопоглощающий элемент должен отвечать требованиям:

- размер должен быть не меньше 200 мм в высоту вдоль главной оси гоночного болида;
- размер должен быть не меньше 200 мм в ширину и 100 мм в высоту на расстоянии 200 мм от защитной пластины;
- должен быть установлен на передней перегородке, посредством сварки или, по крайней мере, на 4 болта М8, класса 8.8;
- не должен проникать за защитную пластину при ударе;
- должен гарантировать безопасность пилота в ходе внеосевого или смещенного относительно центра болида ударе.» [1].

«Энергопоглощающий элемент может быть установлен на гоночный автомобиль только после проведенных испытаний. При проведении испытания аттенюатор и передняя часть шасси автомобиля должны быть прикреплены к платформе. Вес не должен превышать 300 кг. Скорость удара должна быть 7 м/с. Положительным результатом является перегрузка не должна превышать 20g, а деформация защитной пластины не должны превышать 25 мм.» [5]

Многие работы посвящены разработке и исследованию энергопоглощающих элементов гоночных автомобилей [16].

В одной из работ [5] в качестве энергопоглощающего элемента был выбран attenuator укороченного вида в форме пирамиды. Attenuator такой формы подходит ко всем гоночным прототипам, а «увеличение площади поперечного сечения предотвращает потерю устойчивости по Эйлеру в процессе деформации, то есть появляется возможность для контролируемого поглощения энергии удара». [5]

«Энергопоглощающий элемент сделан из алюминиевых сэндвич-панелей» [15, 16] с гексагональным ядром (рисунок 1).

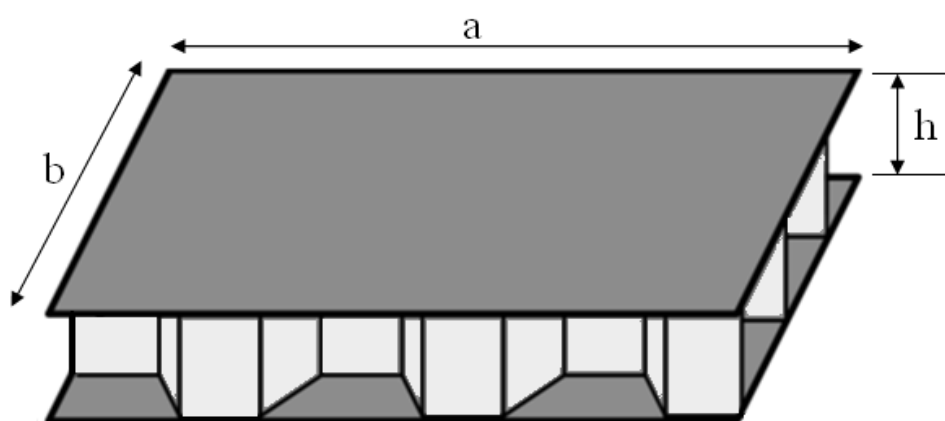


Рисунок 1 – Алюминиевая сэндвич-панель

«Сэндвич-панель перераспределяет энергию на изгибе и сжатии вдоль оси ячеек более эффективно, чем обычные листы.» [5]

«Несколько алюминиевых листов, скрепленных заклёпками между двумя сэндвич-панелями создают структуру, способную эффективно погасить энергию удара. Эти, так называемые, мембраны создают области с более высокой жесткостью, и, следовательно, способствуют появлению неустойчивости и сворачиванию многослойной структуры. Attenuator с использованием сэндвич-панелей представлен на рисунке 2.» [5]

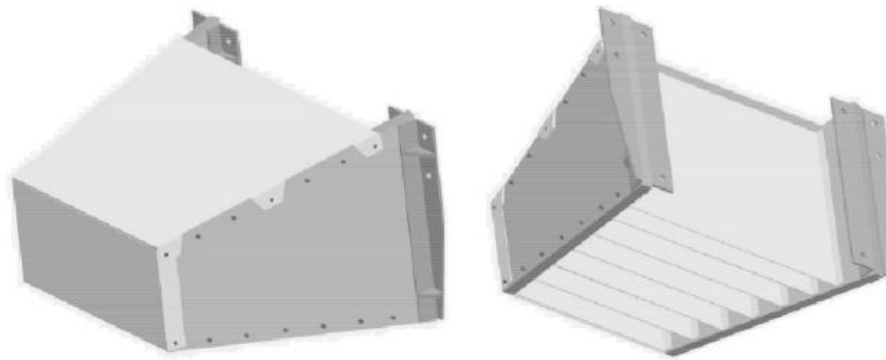


Рисунок 2 – Алюминиевые сэндвич-панели в конструкции аттенюатора

«Сила сжатия алюминиевых сот со скоростью удара линейно возрастает. Это может происходить благодаря трем возможным причинам:

- сжатие и повышение температуры из-за наличия воздуха в клетках;
- появляются эффекты, обусловленные инерцией при сжатии;
- скоростью деформации алюминия.» [5]

При сборке энергопоглощающего элемента с использованием сэндвич-панелей из алюминия особое значение уделяется крепости конструкции. Листы алюминия должны быть закреплены между собой перпендикулярно. Рассмотрим, конечно-элементную модель конструкции.

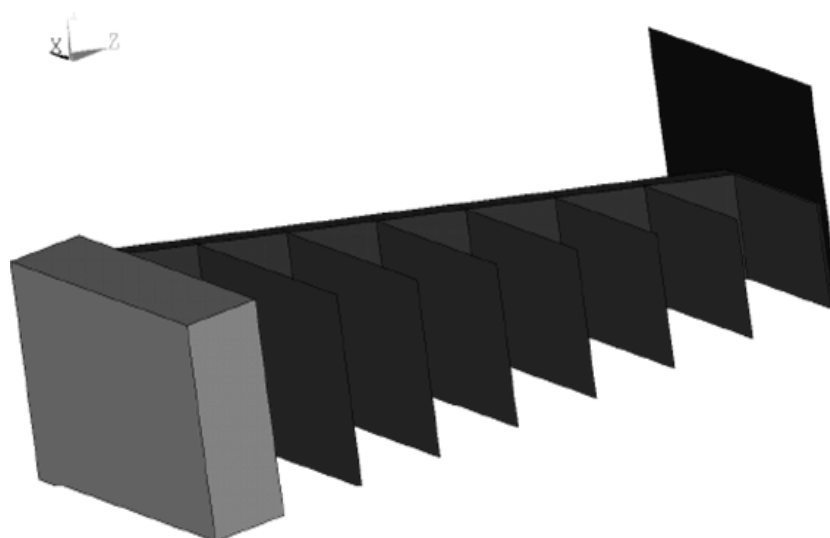


Рисунок 3 – Конечно-элементная модель энергопоглощающего элемента с использованием сэндвич-панелей

В исследовании принимали участие разные энергопоглощающие элементы, число листов составляло от 4 до 7 штук, а длина attenuатора от 300 мм до 400 мм. Выявлено, если attenuатор имеет длину 300 мм, то для хорошего погашения удара необходимо 4-5 листов, если длина 350-400 мм, то достаточно 4 листов. Но наиболее прочной конструкцией выявлен энергопоглощающий элемент с длиной 300 мм и числом листов 6. Вес такого изделия не будет превышать 3 кг (рисунок 4).

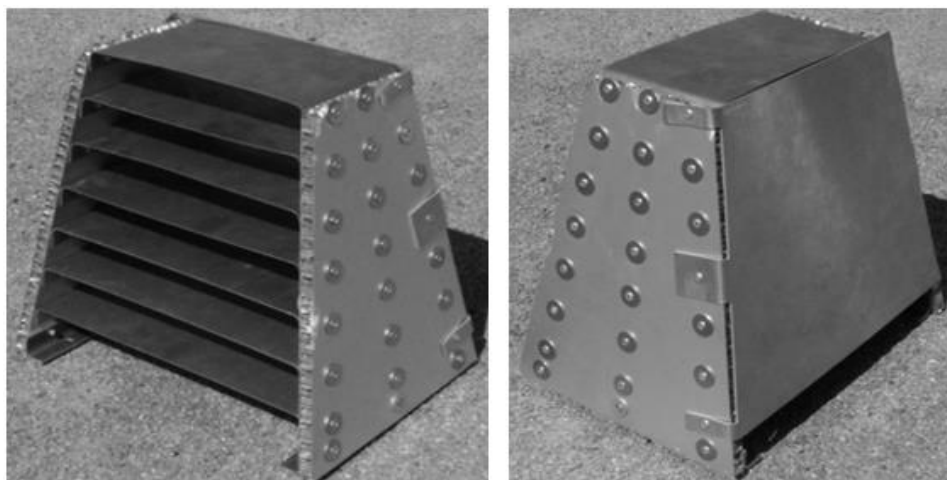


Рисунок 4 – Конструкция attenuатора с 6 промежуточными листами

При ударе энергопоглощающий элемент имеет несколько этапов деформации, представленной на рисунке 5.

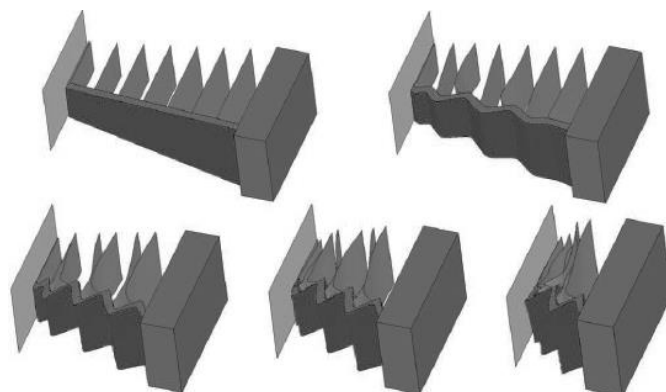


Рисунок 5 – Стадии деформации

На рисунке 6 показан энергопоглощающий элемент после проведенного испытания.



Рисунок 6 – Атенюатор после проведения испытаний

Испытания проводились для части энергопоглощающего элемента, т.е. не учитывалась деформация конструкции со всех сторон. В связи с этим считаем испытания не полными.

В другой работе для изготовления энергопоглощающего элемента выбран сотовый алюминий. Материал был протестирован на испытательном аппарате со скоростью сдвливания 7 м/с (рисунок 7).



Рисунок 7 – Испытания сотового материала

Полученные результаты фиксируются и вычисляются энергопоглощающие свойства на единицу объема сотового алюминия.

На рисунке 8 представлен гоночный автомобиль с установленным энергопоглощающим элементом.

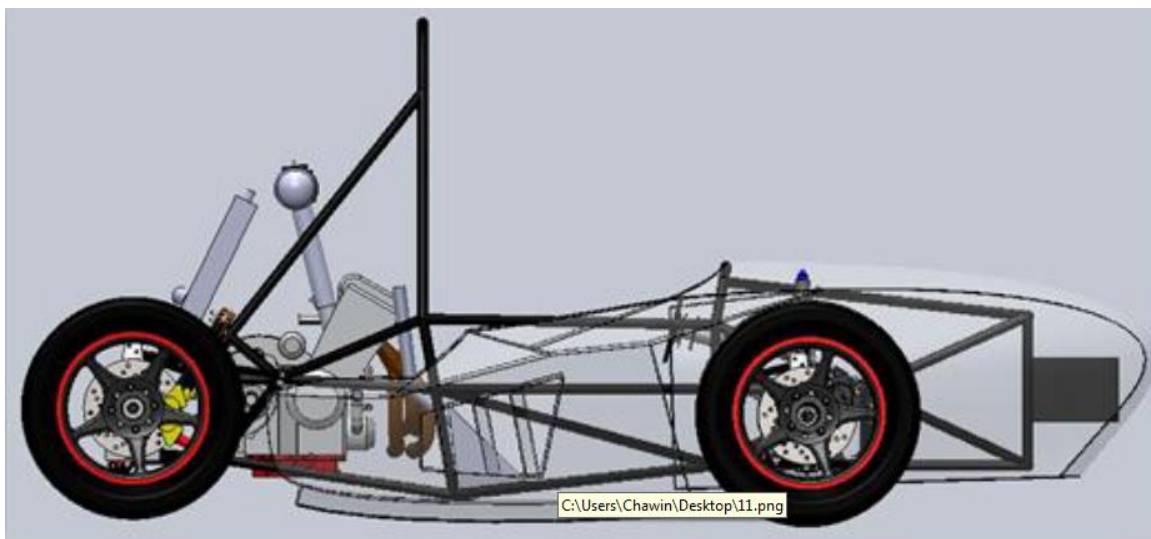


Рисунок 8 – Гоночный болид Formula Student с установленным аттенюатором

Оптимальный энергопоглощающий элемент для гоночного автомобиля – это аттенюатор из сотового алюминия с 7 листами материала толщиной 50 мм и площадью поперечного сечения 335×350 мм. Такой аттенюатор будет отвечать всем требованиям регламента и обеспечит безопасность пилота на скорости 60 км/ч.

Авторы [7] смоделировали различные виды энергопоглощающих элементов с помощью программы LS-DYNA.

Разработана конечно-элементная модель энергопоглощающего элемента (рисунок 9).

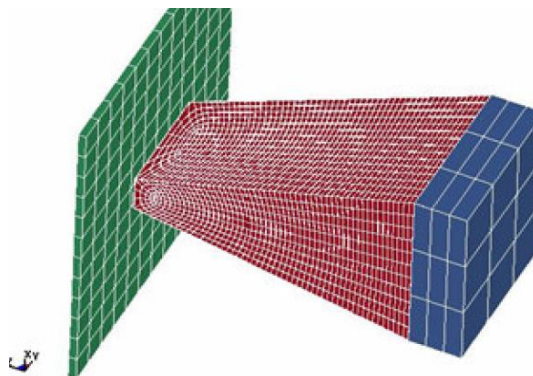


Рисунок 9 – Численная модель аттенюатора

Проектирование в программе LS-DYNA показали аналогичные результаты относительно краш-тестов сделанных во время экспериментов. (рисунок 10).

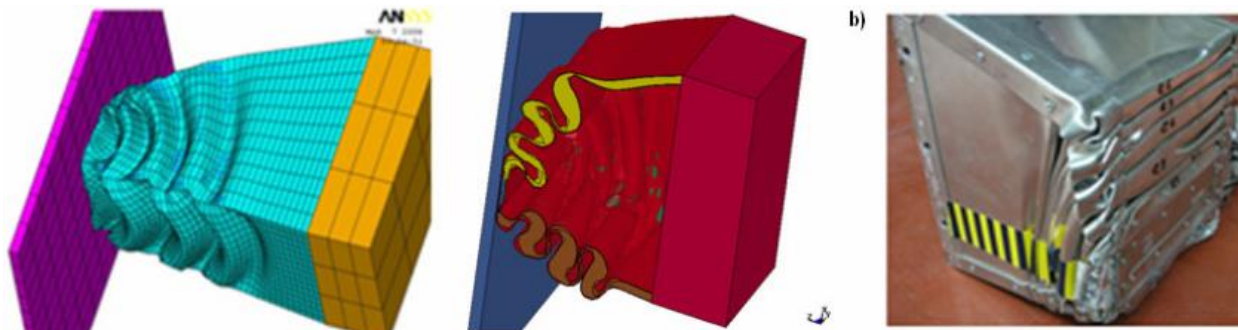


Рисунок 10 – Сравнение данных моделирования с экспериментальными

В другой работе [20] авторы использовали для энергопоглощающего элемента вспененный алюминий, для исследований авторы использовали программу Ansys.

На рисунке 11 представлена геометрическая модель аттенюатора, а на рисунке 12 спроектированная модель, а также защитные элементы и стену для проведения испытаний.

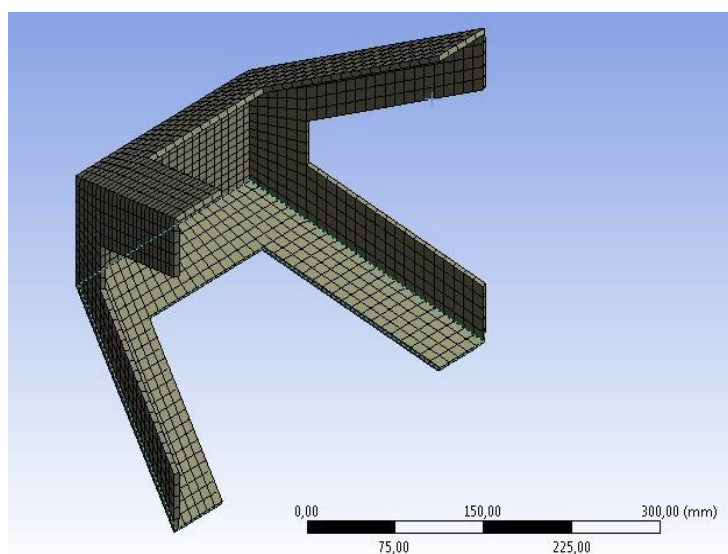


Рисунок 11 – Модель аттенюатора

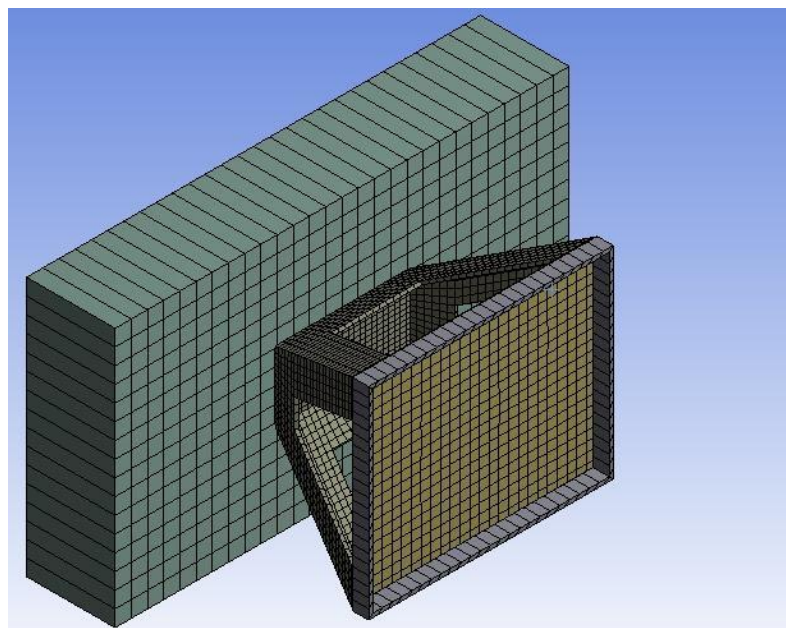


Рисунок 12 – Конечно-элементная модель

Так на рисунках 13-14 представлены этапы деформации аттенюатора в процессе исследований.

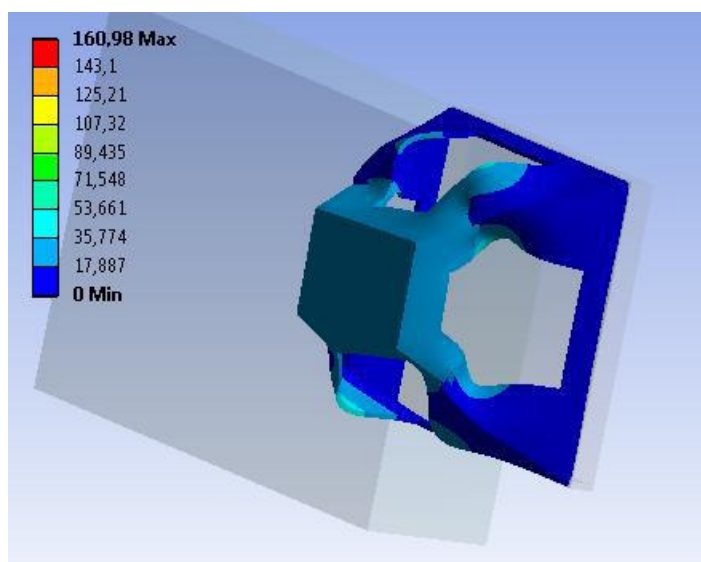


Рисунок 13 – Повреждения аттенюатора в начале испытаний

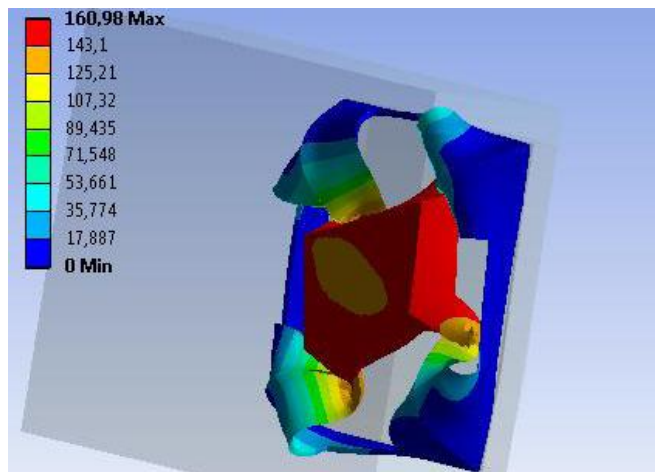


Рисунок 14 – Повреждения аттенюатора в конце испытаний

Конструкция позволяет погасить удар, деформация защитной пластины не превысила 25 мм (рисунок 15).

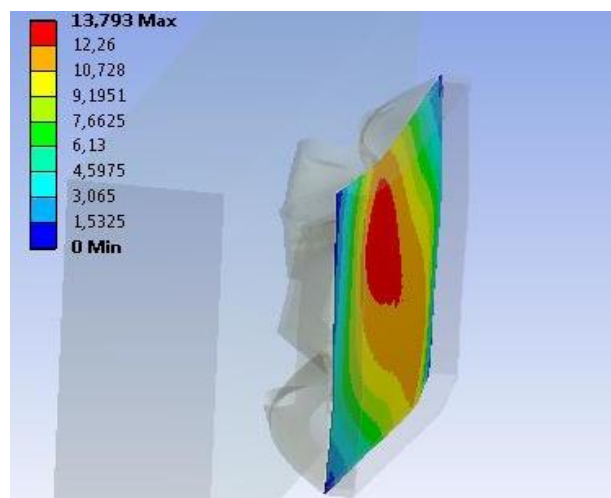


Рисунок 15 – Деформация защитной пластины

Не смотря на хорошие показатели изготовить энергопоглощающий элемент из вспененного алюминия будет проблематично. Даже в эксперименте исследования проводились только электронно.

Автор работы [17] предложил использовать в качестве материала обычные алюминиевые листы, но формой выбрать обратную пирамиду, чтоб снизить перегрузку во время удара (рисунок 16).

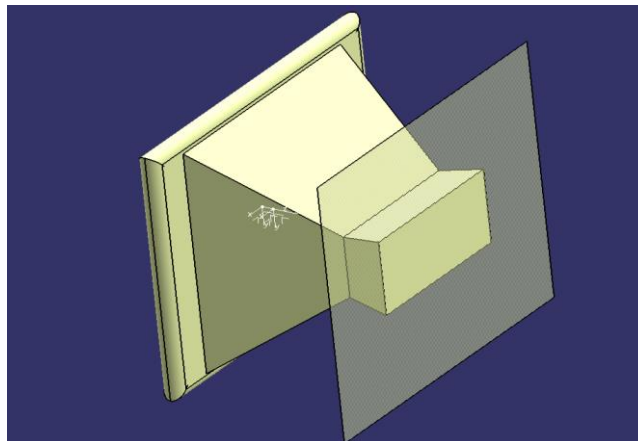


Рисунок 16 – Готовый аттенюатор

На рисунке 16 представлена конечно-элементная модель аттенюатора, а на рисунках 17-19 этапы его деформации.

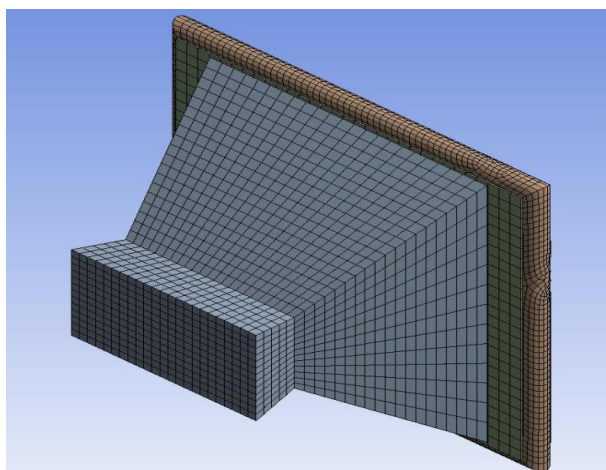


Рисунок 17 – Конечно-элементная модель готового аттенюатора

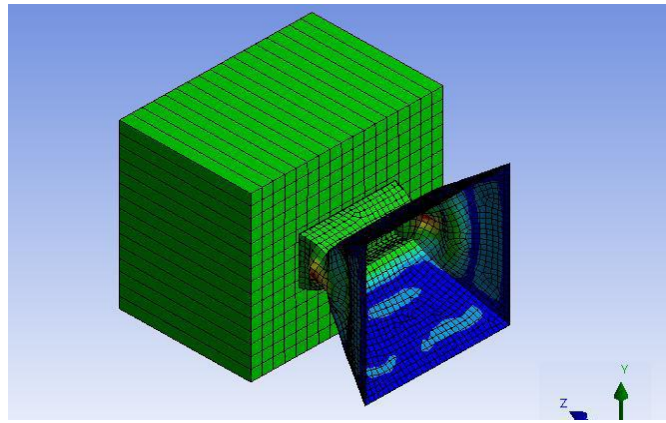


Рисунок 18 – Повреждения в начале испытаний

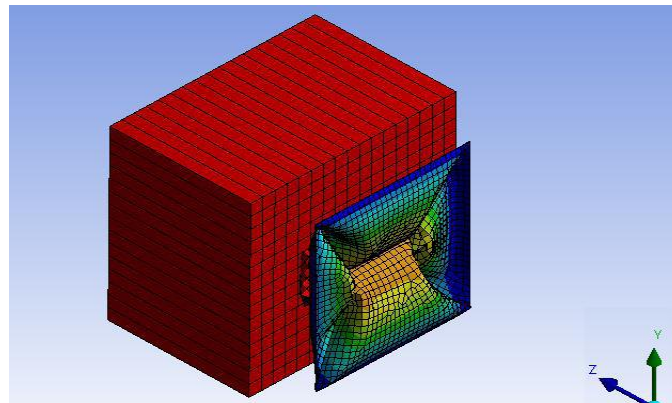


Рисунок 19 – Повреждения в конце испытания

На рисунке 20 представлена картина деформации защитной пластины.

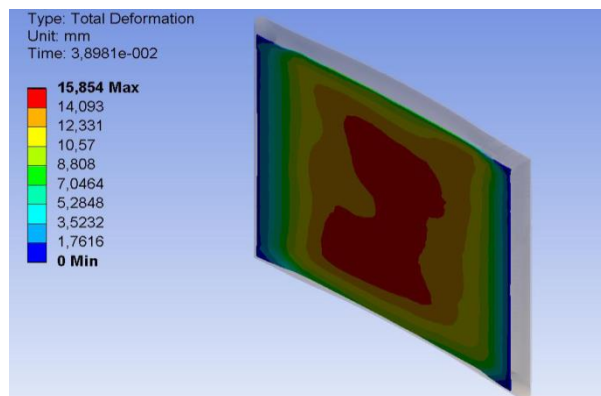


Рисунок 20 – Повреждения защитной пластины аттенюатора

Конструкция энергопоглощающего элемента отвечает всем требованиям, но изготовить в рамках испытания ее будет довольно проблематично.

Стандарт, который определяет специфику и порядок прочностного расчета изделий из термопластов. Учитывает сварку полимерных материалов в отличие, например от расчетов по металлу. Номограммы долговременной прочности термопластов приведены в указанном стандарте.

В основу положены номограммы долговременной прочности термопластов, которые позволяют определить допускаемое напряжение в пластике в зависимости от длительности времени эксплуатации и температуры. Что в значительной степени отличает данный вид расчетов, например от сварных изделий из металлов, где допускаемое напряжение является постоянной (в разумных пределах температур) величиной. Номограммы являются неотъемлемым приложением стандарта. После определения допускаемого напряжения в материале расчет ведется стандартными приемами прочностного расчета.

Что не менее важно, стандарт устанавливает коэффициент запаса прочности по толщине листового полимера в зависимости от вреда, который может быть причинен аварийной ситуацией, а также учитывает фактор сварки, т.е. технологию и метод сварки (экструзионная сварка, сварка горячим воздухом, сварка встык нагретым инструментом), который отображается коэффициентом прочности сварного соединения от прочности исходного листа. Для данного изделия, согласно стандарта с учетом сварки встык нагретым инструментом и экструзионной сварки поправки на коэффициент сварки по швам и коэффициент запаса прочности.

Расчет предполагает расчет напряжений в материале на основании номограммы долговременной прочности термопластов, в котором отражается зависимость допустимого напряжения в материале от температуры и времени эксплуатации. Исходя из данных по номограмме долговременной прочности принимаем допустимое напряжения в полимере и вычисляем расчетную

толщину стенки пластика. Также данный стандарт предусматривает запас прочности с учетом фактора сварки и коэффициента запаса прочности изделия. Стандарт определяет для данного изделия с учетом сварки встык нагретым инструментом и экструзионной сварки поправки на коэффициент сварки по швам и коэффициент запаса прочности.

Таким образом, применение стандарта при расчете данной конструкции гарантирует не только увеличенный запас прочности изделия, но и обосновывает заданный срок эксплуатации.

По верхней части силового каркаса нами предлагается решение, которое снизит вероятность попадания раствора на силовой каркас.

Выводы по разделу: обзор работ различных авторов показал, что энергопоглощающие элементы гоночных болидов могут быть из различных материалов и различных форм. Исследования проводились с помощью различных программных продуктов, таких как Ansys с типом решателя LS-Dyna, а также экспериментальных испытаний. Энергопоглощающие элементы изготавливались из алюминиевых сэндвич-панелей, сотового алюминия, пластика из композиционных материалов, но в подавляющем количестве работ в качестве материала предлагается использовать алюминиевые листы различной толщины.

2 Этапы построения конечно-элементного анализа

2.1 Построение энергопоглощающего элемента

Чтоб провести работы для подготовки к конечно-элементному анализу сначала нужно построить геометрическую модель конструкции аттенюатора и для выявления недостатков конструкции построим расчетную модель. Результаты по исследованию двух моделей сделаем вывод о надежности конструкции. На рисунке 21 изображена методология проектирования.

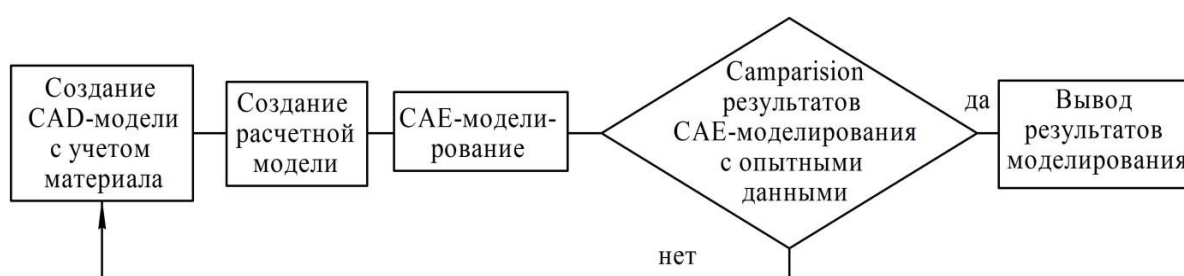


Рисунок 21– Блок-схема метода проектирования

«Геометрическую модель аттенюатора будем строить при помощи программы Компас 3D.» [18]

Для начала построим смешанную модель с круглым и прямоугольным сечением (рисунок 22).

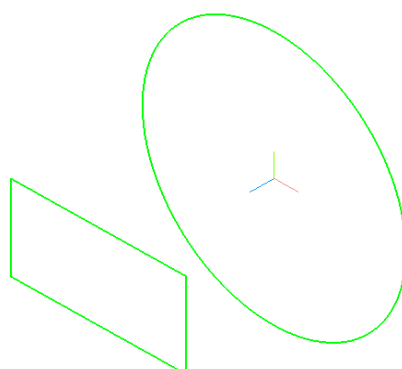


Рисунок 22 – Базовые сечения

Расстояние между сечениями- 200 мм, длина 200 мм, ширина 100 мм.

Диаметр основания был сделан так, чтобы во время удара боковые пластины аттенюатора передавали усилия на переднюю балку, а не только на защитную пластину.

На рисунке 23 представлена конусная модель аттенюатора.

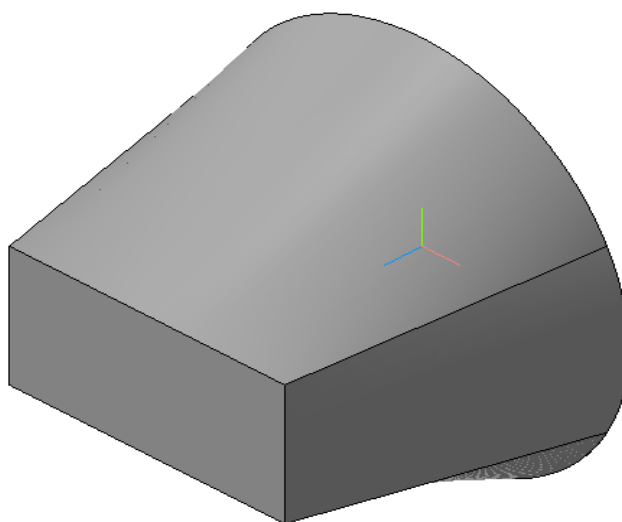


Рисунок 23 – Аттенюатор конусной формы

Создадим защитную пластину аттенюатора (рисунок 24).

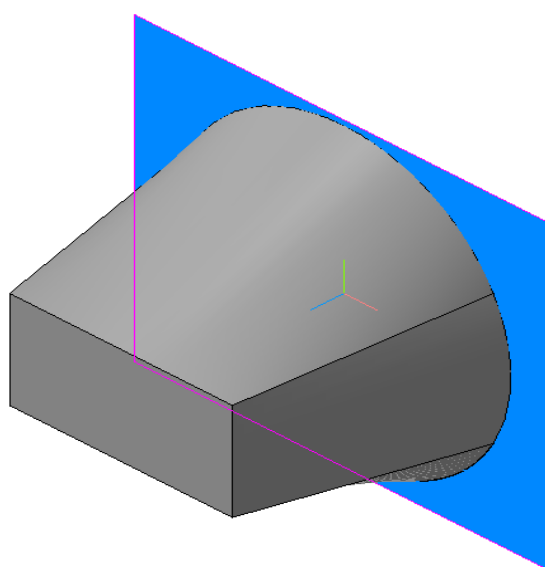


Рисунок 24 – Защитная пластина

Создадим поверхностное тело или препятствие, которое моделирует стену, о которую со скоростью 7 км/ч ударяется гоночный автомобиль (рисунок 25).

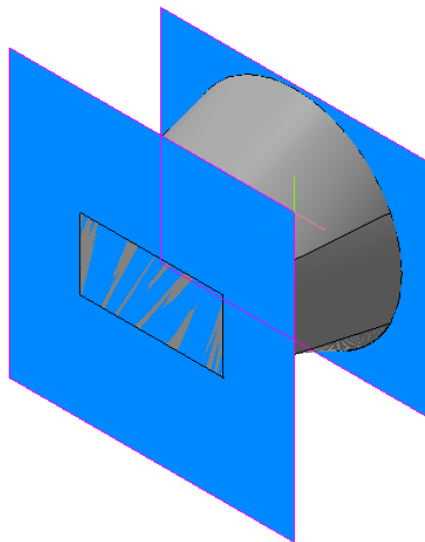


Рисунок 25 – Геометрическая модель для расчета

Построим конструкции аттенюаторов другой формы.

На рисунке 26 представлены аттенюаторы в форме шестигранной пирамиды

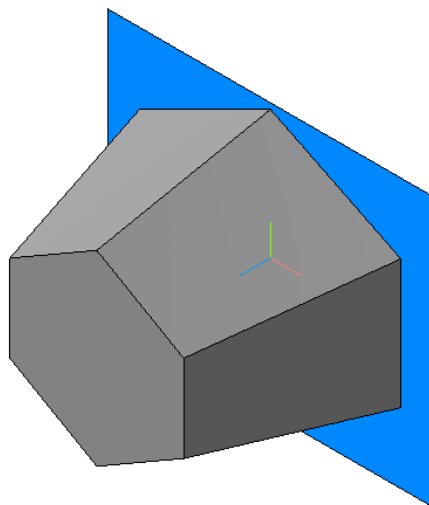


Рисунок 26 – Аттенюатор пирамидальный шестигранный

На всех моделях в сечении 200 мм от защитной пластины можно вписать прямоугольник размером 200 мм на 100 мм.

2.2 Проект энергопоглощающего элемента

«Для построения расчетной модели аттенюатора был выбран пакет конечно-элементного моделирования Ansys, работающий на платформе Workbench. А в качестве непосредственного инструмента – Explicit Dynamics. Расчетная платформа Ansys Workbench позволяет в едином информационном пространстве интегрировать различные модули программного комплекса для проведения связанного междисциплинарного анализа». [2]

Для проведения динамического анализа аттенюатор необходимо экспортировать из пакета Компас 3D в формате Parasolid.

Структурные части модуля Explicit Dynamics указаны на рисунке 27.

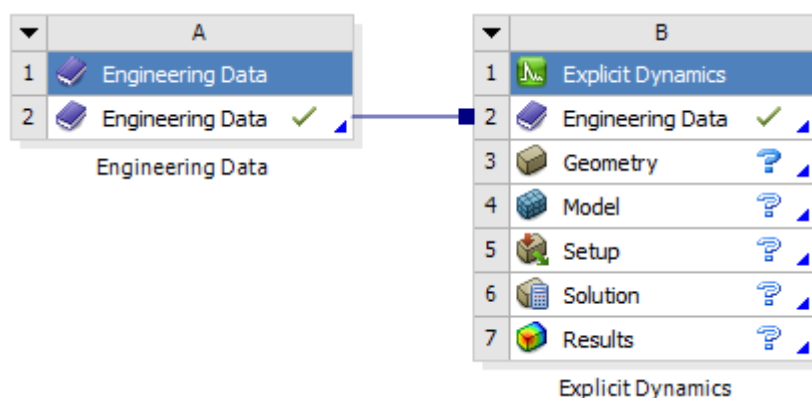


Рисунок 27 – Структурные части модуля «Explicit Dynamics»

«Как видно, блок «Explicit Dynamics» состоит из шести структурных элементов.

Первый элемент полностью дублирует «Engineering Data». Данный элемент позволяет задать свойства материалов геометрической модели проекта.

Для решения поставленной задачи помимо установленного по умолчанию материала «Structural Steel» мы добавили из библиотеки «Engineering Data Sources» материал, из которого будет состоять собственно сам attenuator и защитная пластина – «Aluminum Alloy». Результат представлен на рисунке 28». [17]

1	Contents of Engineering Data		Source	Description
2	Material			
3	Aluminum Alloy		G	General aluminum alloy. Fatigue properties come from MIL-HDBK-5H, page 3-277.
4	Structural Steel		G	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5 -110.1

Properties of Outline Row 3: Aluminum Alloy				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2770	kg m ⁻³	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Modu...		
8	Young's Modulus	7,1E+10	Pa	
9	Poisson's Ratio	0,33		
10	Bulk Modulus	6,9608E+10	Pa	
11	Shear Modulus	2,6692E+10	Pa	
12	S-N Curve	Tabular		
16	Tensile Yield Strength	2,8E+08	Pa	
17	Compressive Yield Strength	2,8E+08	Pa	
18	Tensile Ultimate Strength	3,1E+08	Pa	
19	Compressive Ultimate Strength	0	Pa	

Рисунок 28 – Материал «Engineering Data Sources» и защитная пластина «Aluminum Alloy»

«Далее необходимо создать геометрическую модель либо встроенными средствами моделирования, либо импортировать уже готовую геометрическую модель, созданную в сторонней CAD-системе, как в нашем случае. Импортированную модель можно доработать под дальнейшие действия, либо оставить неизменной. При импорте геометрической модели

важно учитывать свойства структурного элемента «Geometry». Окно данных свойств появляется на месте панели «Properties of Schematic» (рисунок 29).» [11]

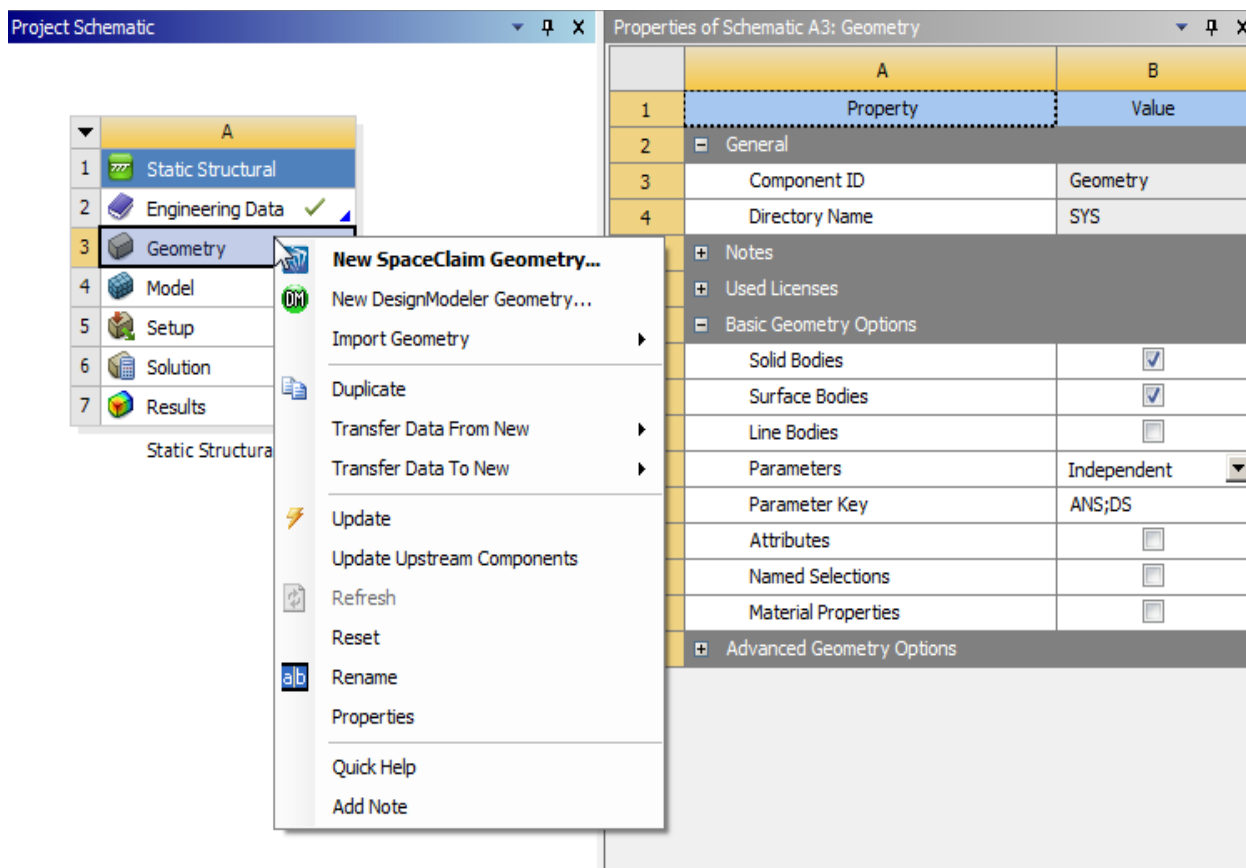


Рисунок 29 – Панель «Properties of Schematic»

«Как видно, в разделе «Basic Geometry Options» можно указать размерность импортируемых объектов – 3D (Solid Bodies), 2D (Surface Bodies) либо 1D (Line Bodies), а также опции импорта параметризованных CAD-моделей.

На рисунке 30 представлена импортированная в модуль «Design Modeler» поверхностная модель аттенюатора, включающая собственно сам аттенюатор; элемент, моделирующий препятствие и защитную пластину.» [15]

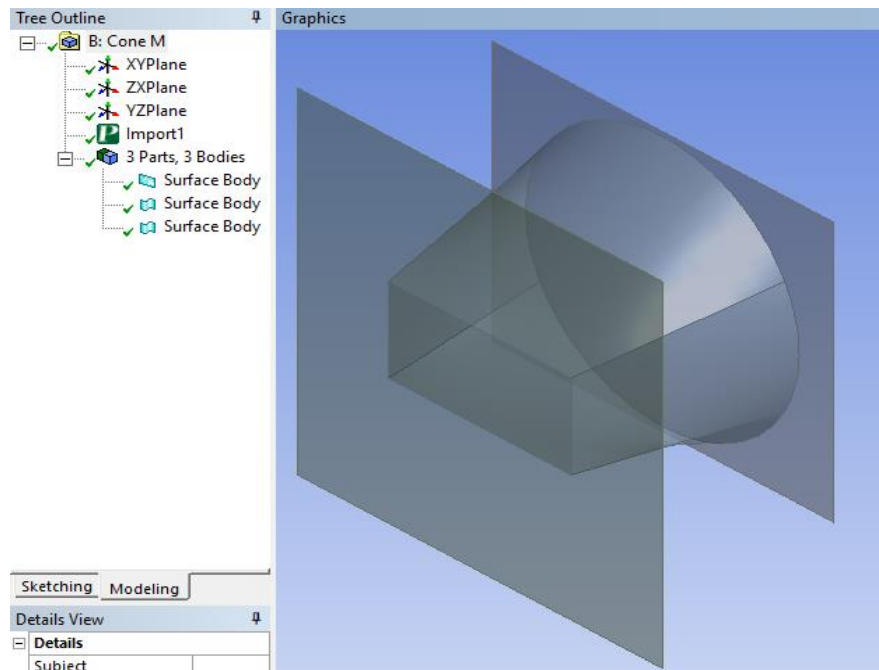


Рисунок 31 – Модель аттенюатора, препятствие и защитная пластина

«В данном модуле можно доработать геометрическую модель – упростить для увеличения скорости расчета или исправить неточности в геометрии.

Далее переходим в следующий структурный элемент блока «Explicit Dynamics» – «Model».

На рисунке 32 представлено дерево проекта, где наглядно видно какие шаги необходимо проделать до завершения моделирования.» [15].

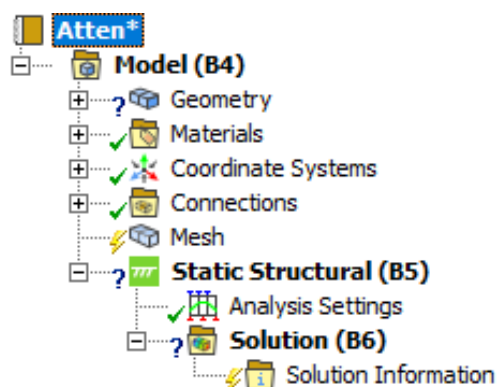


Рисунок 32 – Структура проекта

«Как видно, напротив строки Geometry, стоит знак вопроса – это означает, что внесены не все данные. Здесь нам необходимо для каждого тела проставить толщину, указать в каком направлении эта толщина будет вытягиваться, и выбрать материал элемента. Так на рисунке 33 представлено раскрытое меню для тела аттенюатора.» [16].

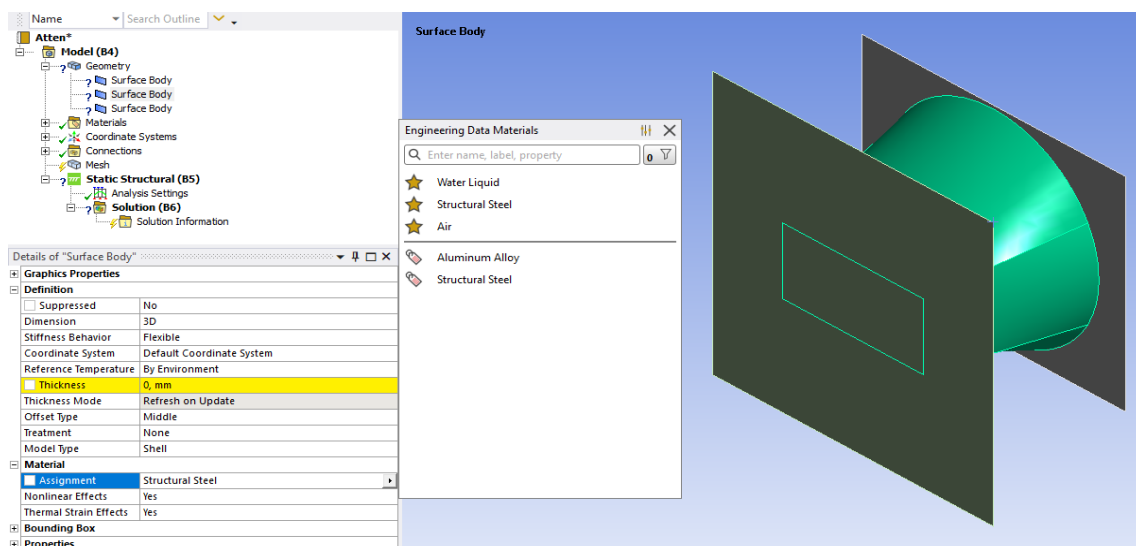


Рисунок 33 – Окно выбора материалов

«Как видно, по умолчанию стоит конструкционная сталь, которую необходимо заменить алюминиевым сплавом, а в строке, подсвеченной желтым цветом нужно указать толщину листов аттенюатора.

Толщину тела, моделирующего препятствие, подбираем таким образом, чтобы масса стала равна 300 кг. И так как для этого тела нам не важны деформации, то для жесткости в строке свойств «Stiffness Behavior» выставляем положение «Rigid», что также даст преимущество скорости расчета.

Далее нужно выставить все необходимые контакты.

В первую очередь, необходимо автоматически образовавшийся контакт между элементом, олицетворяющим стену и аттенюатором изменить с позиции «Bonded» на позицию «Frictionless.»» [16]

А для контакта аттенюатора с защитной пластиной установим контакт «Bonded», так как эти элементы будут скреплены сваркой.

На рисунке 34 представлены элементы контактных тел.

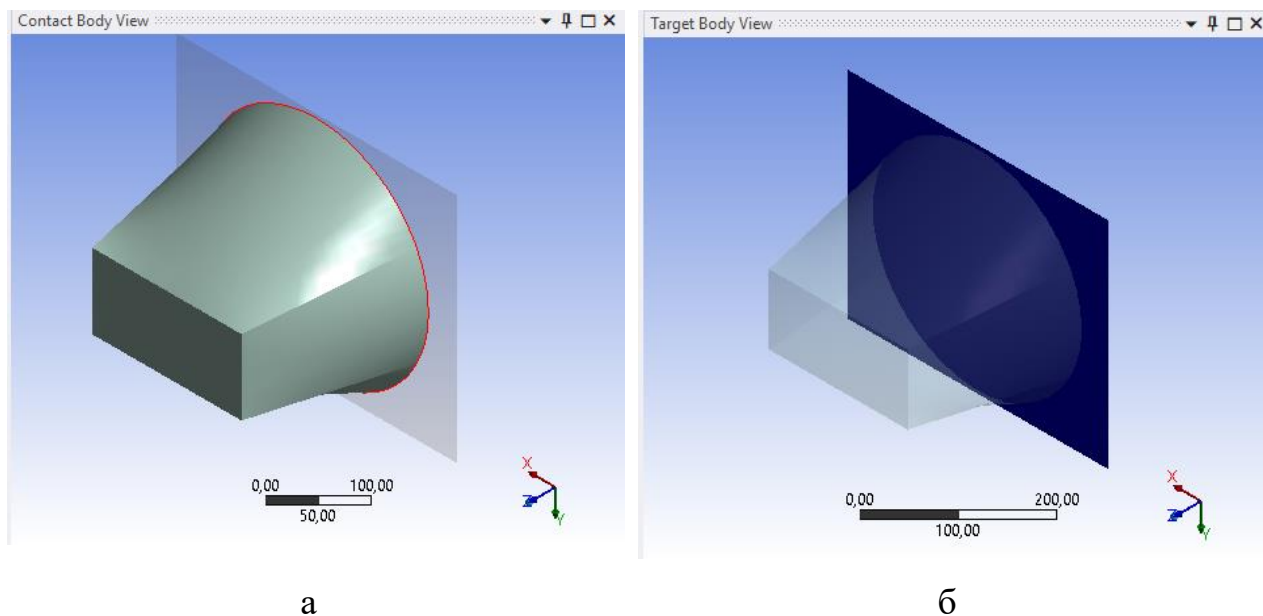


Рисунок 34 – Соприкосновение элементов: а – ребро элемента, б – поверхность элемента

Далее необходимо разбить на конечные элементы.

На рисунке 35 представлена картина, отражающая генерацию сетки конечных элементов по умолчанию.

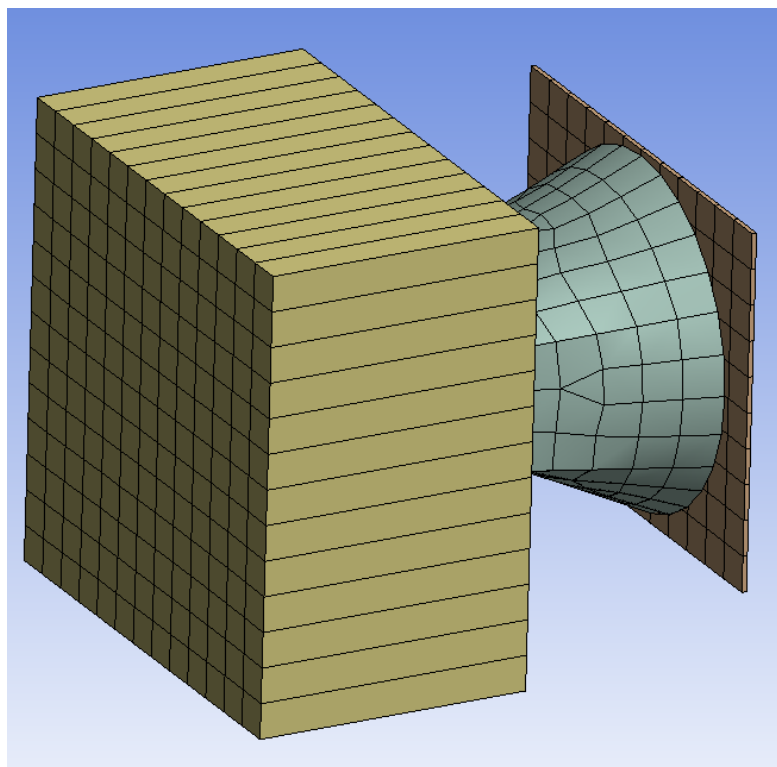


Рисунок 35 – Сетка конечных элементов

«Укажем размер конечных элементов 10 мм для всей системы.

Для тела, имитирующего стену, размер зададим равный 50 мм, так как нас не интересует его деформация.

Для лучшего качества расчета упорядочим сетку на аттенюаторе посредством команды «Face Meshing». Упорядочивание выполним по методу четырехугольников.» [5]

Полученный результат представлен на рисунке 36.

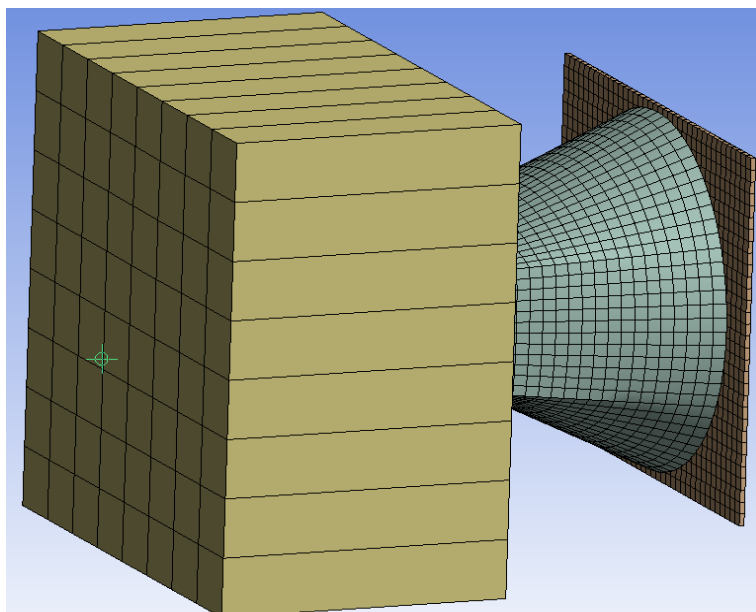


Рисунок 36 – Упорядочивание сетки по методу четырехугольников

Далее необходимо указать граничные условия модели.

«В первую очередь необходимо задать скорость перемещения согласно регламенту 7 м/с телу, имитирующему препятствие, и указать направление на аттенюатор с защитной пластиной (рисунок 37).» [12]

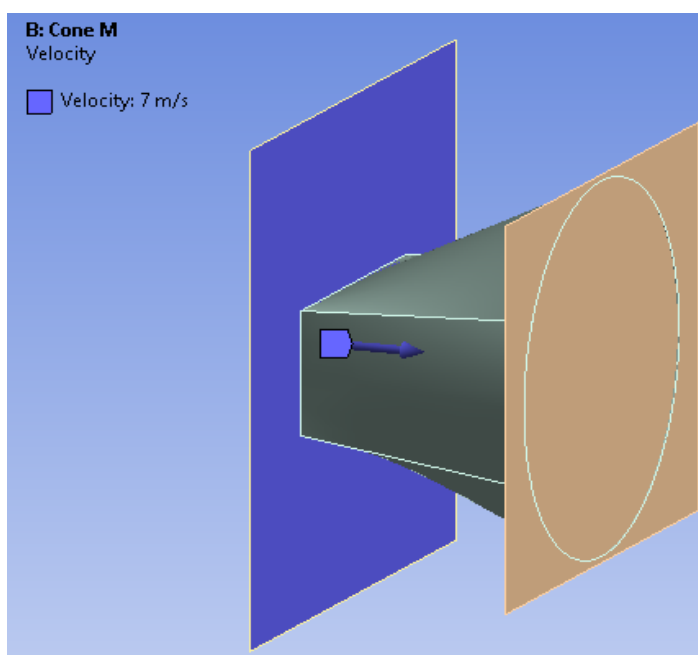


Рисунок 37 – Скорость и направление перемещения

«Во вторую очередь необходимо указать время моделирования. С учетом скорости и габаритов аттенюатора выбираем 0,04 с.

В третью очередь необходимо ограничить перемещение аттенюатора. Мы сделали это посредством команды «Displacement», указав 0 мм по всем осям (рисунок 38).» [12]

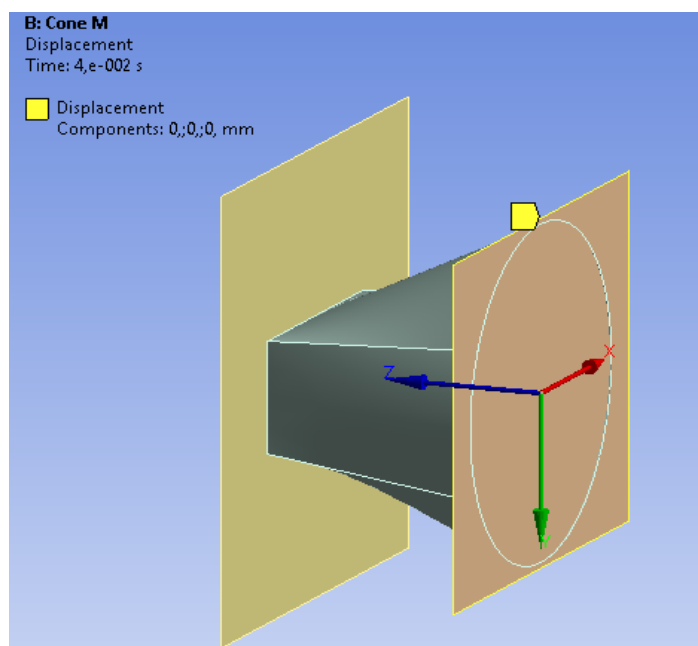


Рисунок 38 – Ограничитель передвижения

Таким образом, построение расчетной модели аттенюатора можно считать завершенным.

Выводы по разделу: разработана схема анализа аттенюаторов, выполнены задачи по разработке поверхностных моделей в программе Компас 3D и рассмотрены готовые расчетные модели в программе Ansys, работающем на платформе Workbench.

3 Сравнение энергопоглощающих элементов гоночных болидов

3.1 Энергопоглощающий элемент конусовидной формы

Основным критерием в разработке аттенюатора является процесс деформации в результате удара. Проанализируем конусную форму энергопоглощающего элемента, выявим слабые места, подлежащие доработке.

Начальная и окончательная фаза деформации аттенюатора конусной формы представлена на рисунках 39-40, на рисунке 41 – график деформации по времени.

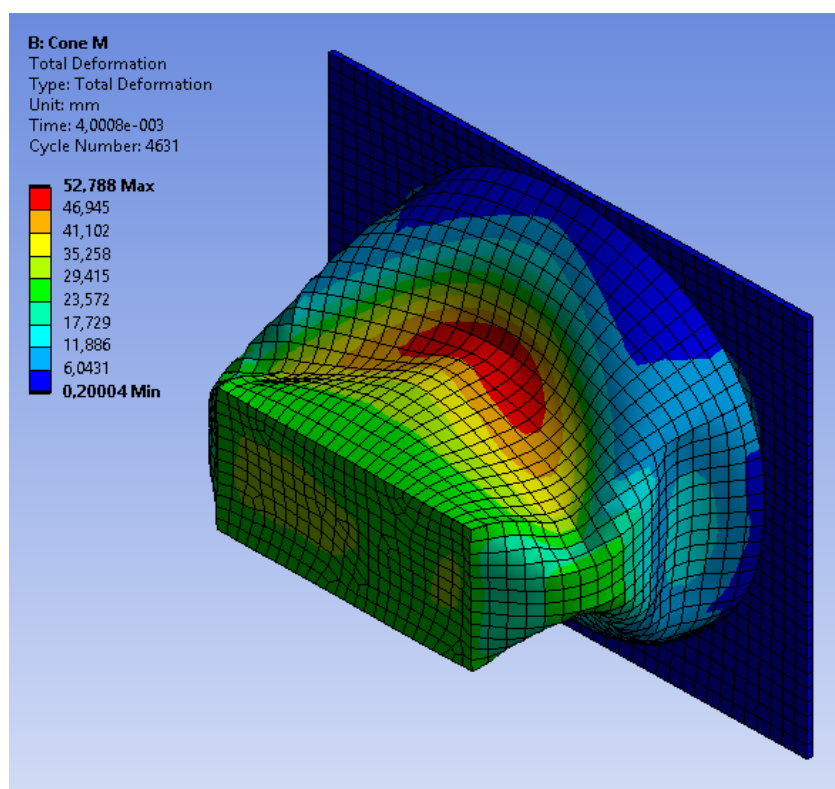


Рисунок 39 – Повреждение конусного аттенюатора в начале исследования

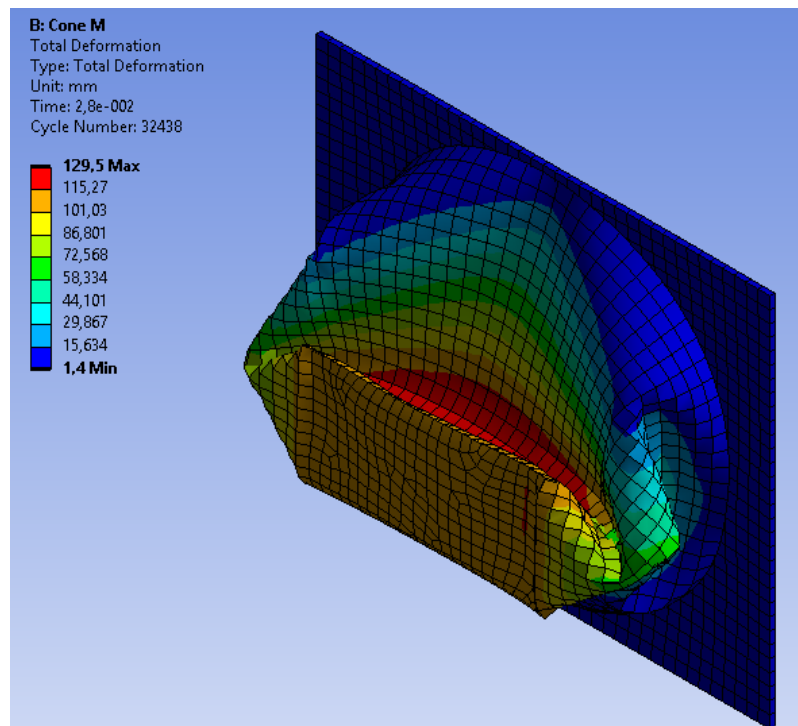


Рисунок 40 – Повреждение конусного аттенюатора в конце исследования

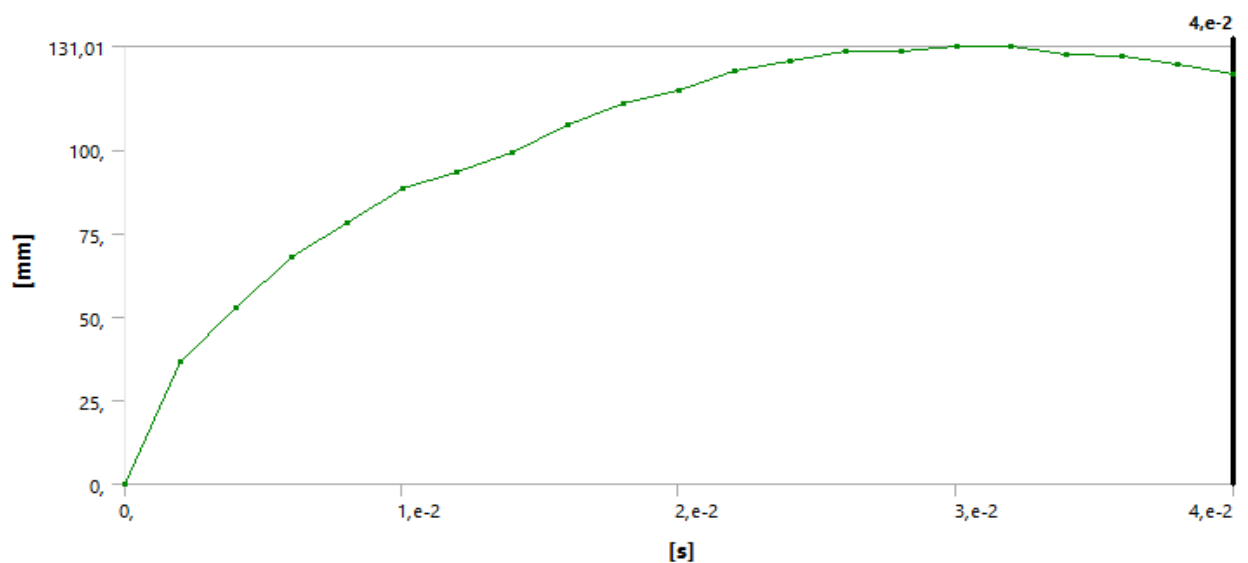


Рисунок 41 – Шкала времени исследования и влияние на процесс.

По рисунку мы видим, что деформация увеличивается постепенно, т.е. форму аттенюатора мы выбрали правильно. Максимальная деформация концентрируется в одном месте.

Деформации защитной пластины рассмотрена на рисунке 42, а на рисунке 43 – график деформации по времени.

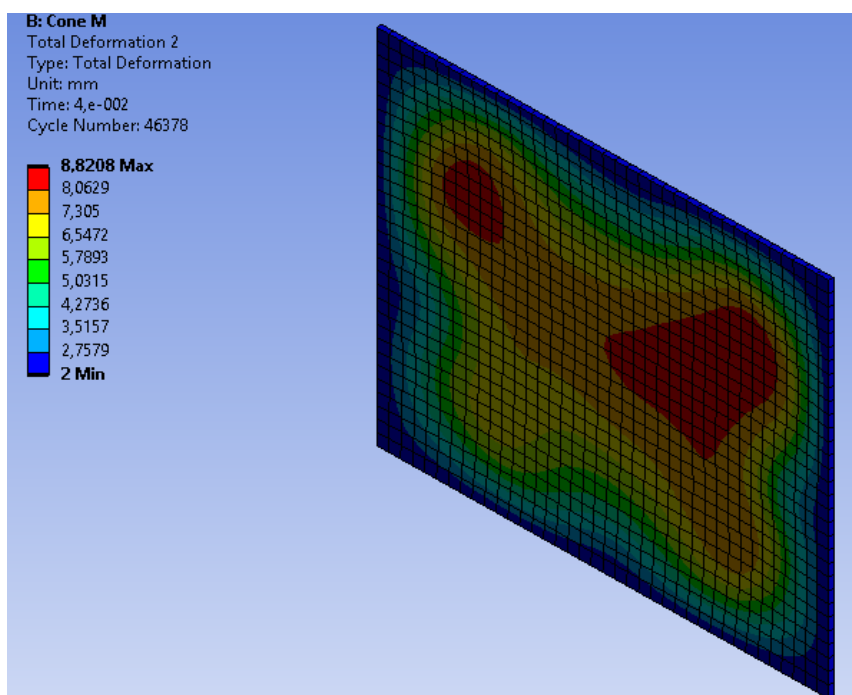


Рисунок 42 – Повреждение защитной пластины

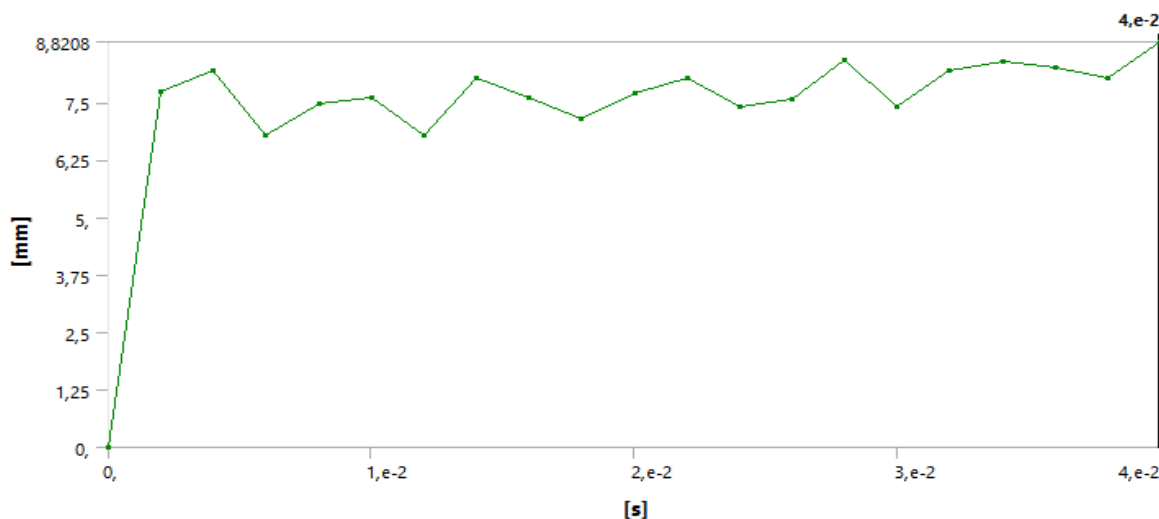


Рисунок 43 – Шкала времени исследования и ее влияние на повреждения защитной пластины.

По рисунку видно, что деформация находится в допустимых пределах, практически с самого начала достигается максимальная величина.

«Рассчитаем среднюю перегрузку.

Для расчета средней перегрузки используем формулу:

$$G_{\text{ср}} = \sqrt{1 + \frac{(a_{\text{ср}})^2}{g^2}}, \quad (1)$$

где $a_{\text{ср}}$ – среднее ускорение, м/с^2 ;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

Среднее ускорение найдем по формуле:

$$a_{\text{ср}} = \frac{V_{\text{уд}} - V_{\text{min}}}{t_{\text{min}}}, \quad (2)$$

где $V_{\text{уд}}$ – скорость при ударе, м/с ;

V_{min} – минимальная скорость, м/с ;

t_{min} – время достижения минимальной скорости, с .

На рисунке 44 представлен график зависимости падения скорости при деформировании аттенюатора от времени.» [18].

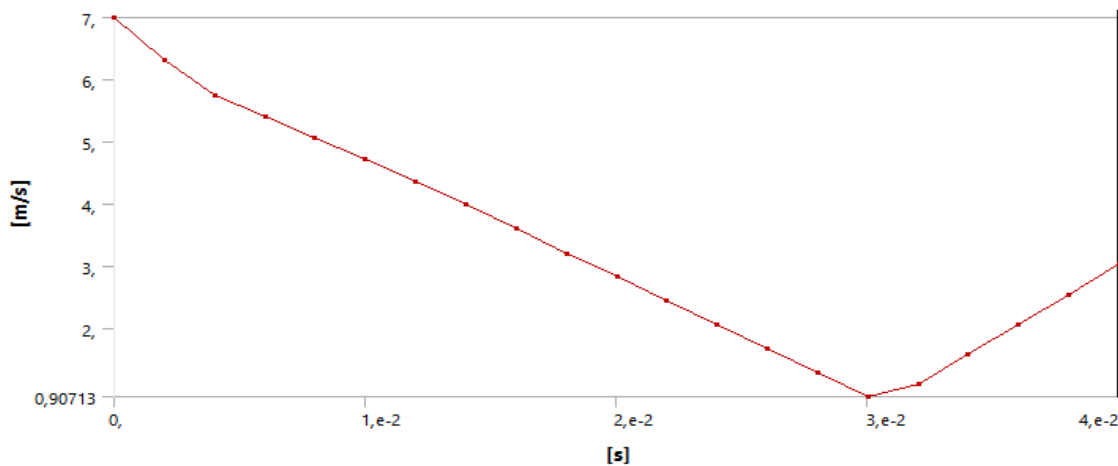


Рисунок 44 – Шкала замедления конусного аттенюатора

Тогда найдем среднюю перегрузку:

$$G_{cp} = \sqrt{1 + \frac{(7 - 0,9/0,03)^2}{9,8^2}} = 20,8.$$

«Как видно, средняя перегрузка превышает необходимую величину в 20g.

И осталось оценить максимальную перегрузку. Расчет максимальной перегрузки произведем по формуле:

$$G_{max} = \sqrt{1 + \frac{(a_{max})^2}{g^2}}, \quad (3)$$

где a_{max} -максимальное ускорение, м/с².

На рисунке 45 представлен график максимального ускорения.» [9]

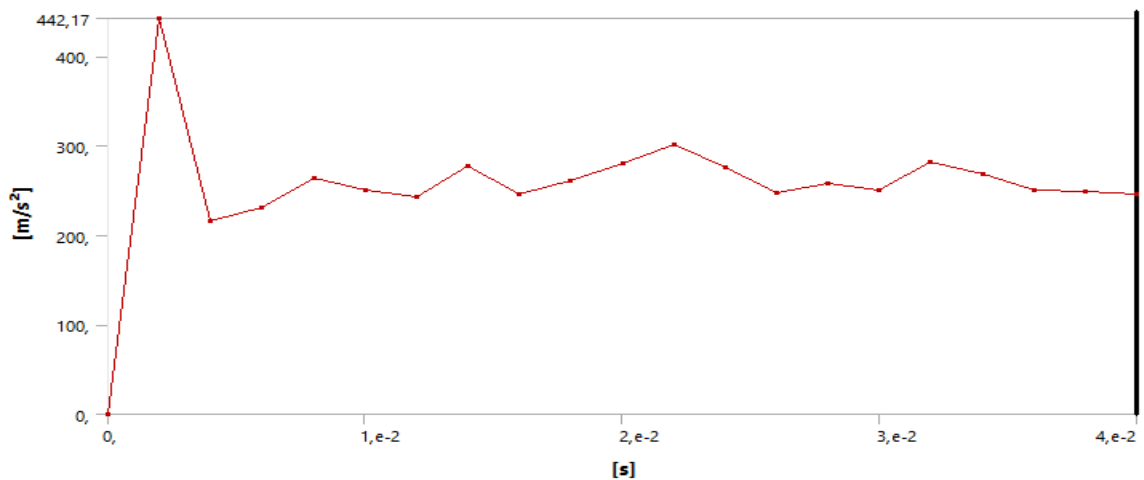


Рисунок 45 – Шкала максимальной скорости

Тогда найдем максимальную перегрузку:

$$G_{max} = \sqrt{1 + \frac{(442,17)^2}{9,8^2}} = 45,1.$$

«Как видно, максимальная перегрузка также превышает необходимую величину в 40g.

Таким образом, данная конструкция аттенюатора не отвечает требованиям регламента Formula Student.» [10]

3.2 Энергопоглощающий элемент шестигранной формы

«Проанализируем аттенюатор в форме шестигранной пирамиды в процессе деформирования.

Так на рисунке 40 представлен график деформации по времени, а на рисунках 46-48 – картина деформации аттенюатора в виде шестигранной пирамиды в начальной фазе и в окончательной.» [9]

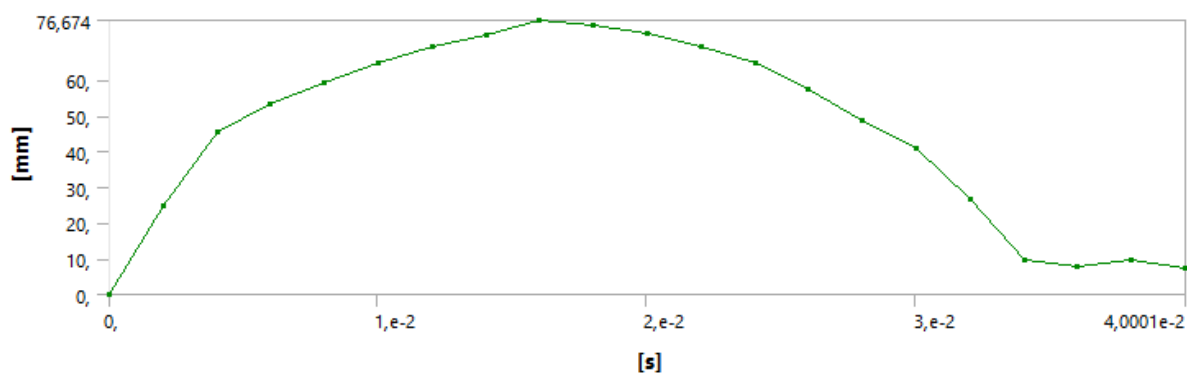


Рисунок 46 – Влияние времени исследования на повреждения аттенюатора

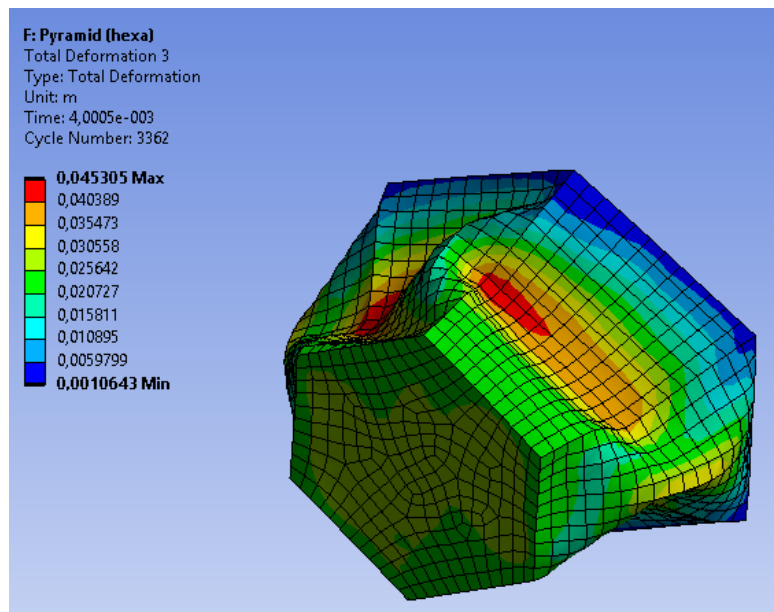


Рисунок 47 – Повреждения пирамидального шестигранного аттенюатора в начале исследования

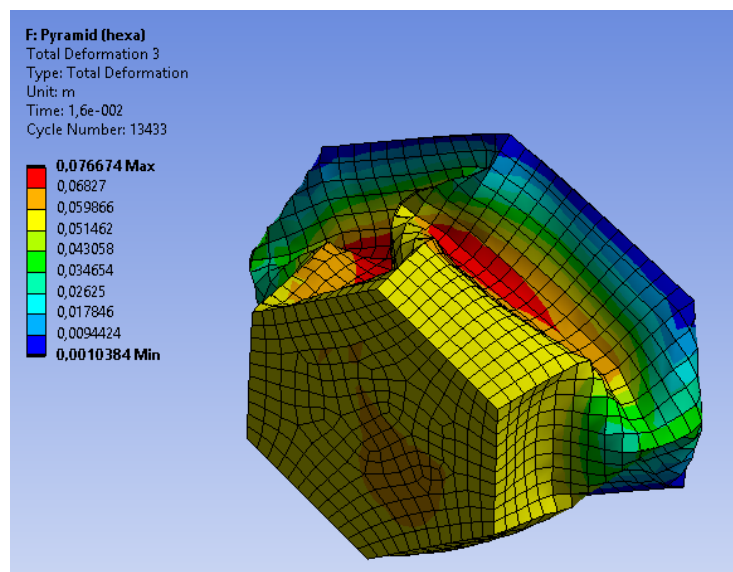


Рисунок 48 – Повреждения пирамидального шестигранного аттенюатора в конце исследования

«Как видно, деформация слишком быстро достигает максимальной величины, что говорит о спорной форме аттенюатора.

На рисунке 49 представлена картина деформации защитной пластины, а на рисунке 50 – график деформации по времени.» [8]

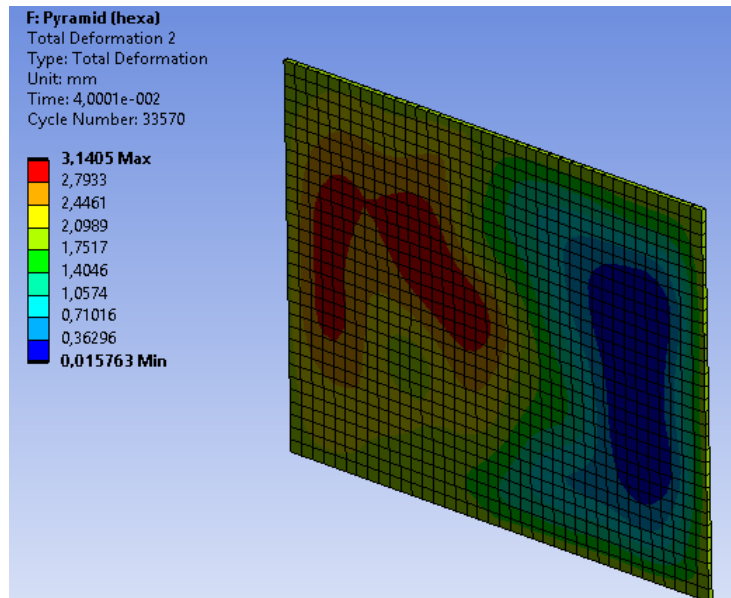


Рисунок 49 – Повреждения защитной пластины

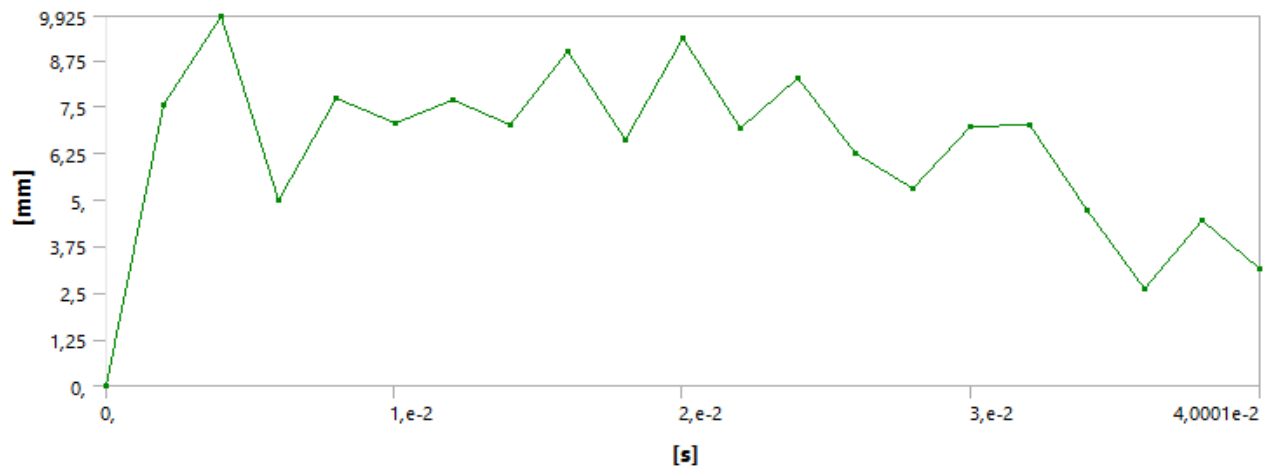


Рисунок 50 – Шкала времени исследования и ее влияние на повреждения защитной пластины

«Видно, что деформация находится в допустимых пределах, но график скачкообразный с максимальной величиной прогиба на ранней стадии.

Следующим шагом оценим величину поглощенной энергии (рисунок 51).» [8]

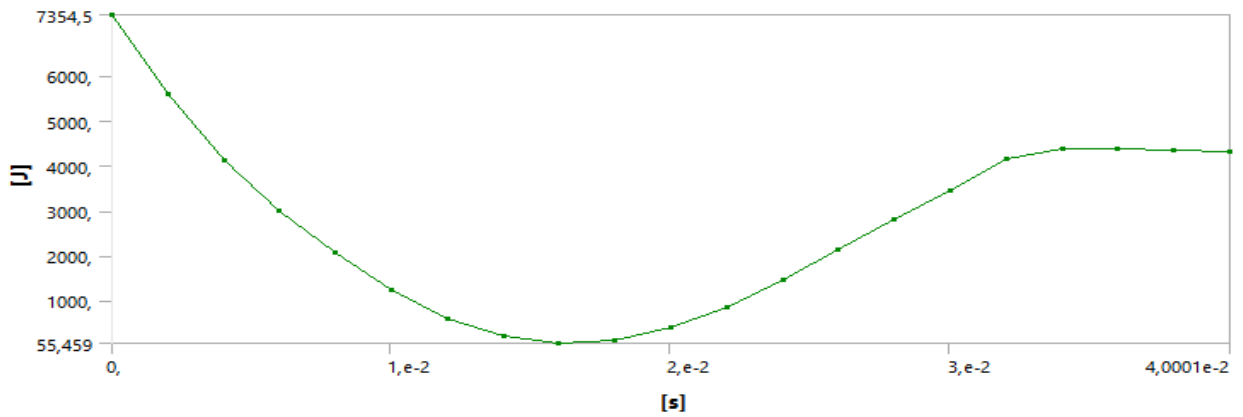


Рисунок 51 – Поглощение кинетической энергии пирамидальным шестигранным attenuатором

«Видно, что поглощение энергии attenuатором меньше на 55,5 Дж, чем необходимо.

На рисунке 52 представлен график зависимости падения скорости при деформировании attenuатора от времени.» [8]

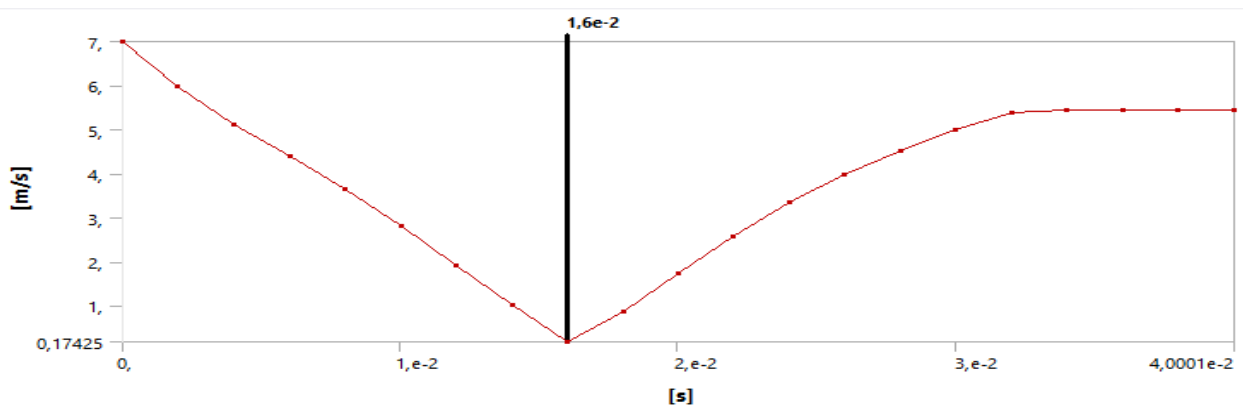


Рисунок 52 – Шкала замедления скорости от пирамидального шестигранного attenuатора

Исходя из графика, найдем среднюю перегрузку по формуле (1):

$$G_{cp} = \sqrt{1 + \frac{(7 - 0,17/0,016)^2}{9,8^2}} = 43,57.$$

«То есть, средняя перегрузка не удовлетворяет требованиям регламента.

Оценим максимальную перегрузку.

На рисунке 53 представлен график максимального ускорения.» [9]

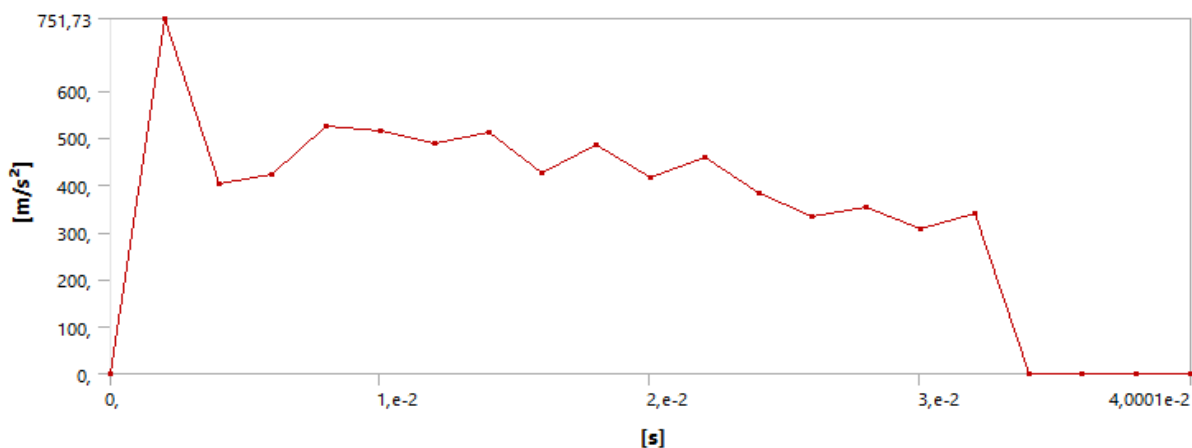


Рисунок 53 – Шкала максимальной скорости

Исходя из графика, найдем максимальную перегрузку по формуле (3):

$$G_{max} = \sqrt{1 + \frac{(751,73)^2}{9,8^2}} = 76,7.$$

«Как видно, максимальная перегрузка опять превышает необходимую величину в 40g. Данная конструкция аттенюатора не отвечает требованиям регламента Formula Student по величине поглощенной энергии.» [8]

На сегодня по аттенюаторам присутствуют разрывы, в основном на углах каркаса, которые появились в результате испытаний. Это следствие нарушений по эксплуатации энергопоглощающих элементов. Конструкция изделия состоит из композитного корпуса и металлокаркаса, обшитого с внешней стороны полимерным материалом. Металлокаркас, обшитый с внешней стороны полимерным материалом является неотъемлемой частью

аттенюатора. У всех материалов есть коэффициент температурного линейного расширения. У полимерного материала он составляет 150-200 единиц, у стали 12-13 единиц, это в 15 раз больше. Все данные справочные в свободном доступе. У всей конструкции при эксплуатации с учетом внутренней длины корпуса аттенюатора происходит уменьшение полимерного материала в размере по длине 10-11 мм, по ширине на 5-6 мм соответственно, а металлокаркас, обшитый пластиком остается в своих размерах на месте, что в свою очередь приводит к разрыву внешней обшивки металлокаркаса от аттенюатора. При уменьшении размеров корпуса аттенюатора нагруженными местами остаются углы конструкции и так размы это видим в местах разрывов полимерного материала на углах металлокаркаса.

Технологические зазоры, изменяясь между пластиком и металлом, создают напряжения в прямом или обратном направлении в зависимости от отклонения от некоторой определенной температуры. Технологический зазор конструктивно имеет две составляющие для компенсации расширения пластика в положительную или отрицательную сторону. Иными словами, с точки зрения появления дополнительных напряжений в реально рассчитанной конструкции разница температур создает некомпенсированный зазор на каждую сторону каркаса, что с учетом увеличенной хрупкости пластика при низких температурах создает аварийную ситуацию.

В энергопоглощающем элементе требуется проверять ультразвуком швы и предоставлением расчетов. Важно грамотно и четко формулировать техническое задание и подкреплять его необходимыми чертежами и эскизами, которые несут всю информацию.

Выводы по разделу: проанализировано 2 формы аттенюаторов; комбинированный конус и шестигранная пирамида, выявлено, что ни одна из форм не отвечает требованиям регламента. Перегрузка составила свыше 20 g, при требовании до 20 g. Принято решение оптимизировать конусную форму аттенюатора.

4 Анализ аттенюатора улучшенной конфигурации

«По результатам анализа различных форм энергопоглощающих элементов основной проблемой является возможность достижения допустимых показателей при максимальной перегрузке. По графикам времени видно, что максимальная перегрузка возникает вначале процесса. Для решения этой проблемы необходимо ослабить конструкцию в местах, которые подвергаются деформации в начальные моменты времени.» [20]

«Для улучшения конструкции был выбран самый удачный вариант – аттенюатор конусной комбинированной формы (рисунок 1).

Ослабить конструкцию возможно просверлив в ней отверстия диаметром 20мм. (рисунок 54)» [9].

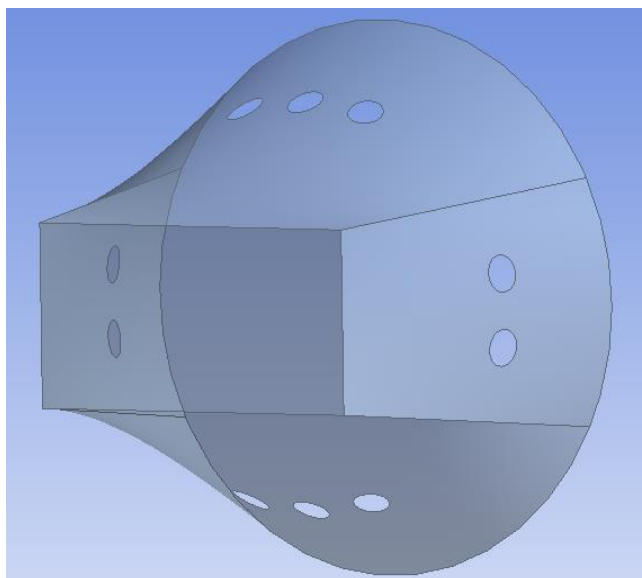


Рисунок 54 – Оптимизированная форма аттенюатора

«Проведем анализ формы аттенюатора в процессе деформации.

Так на рисунках 55-56 представлена картина деформации улучшенной конструкции в начальной фазе и в окончательной.» [14]

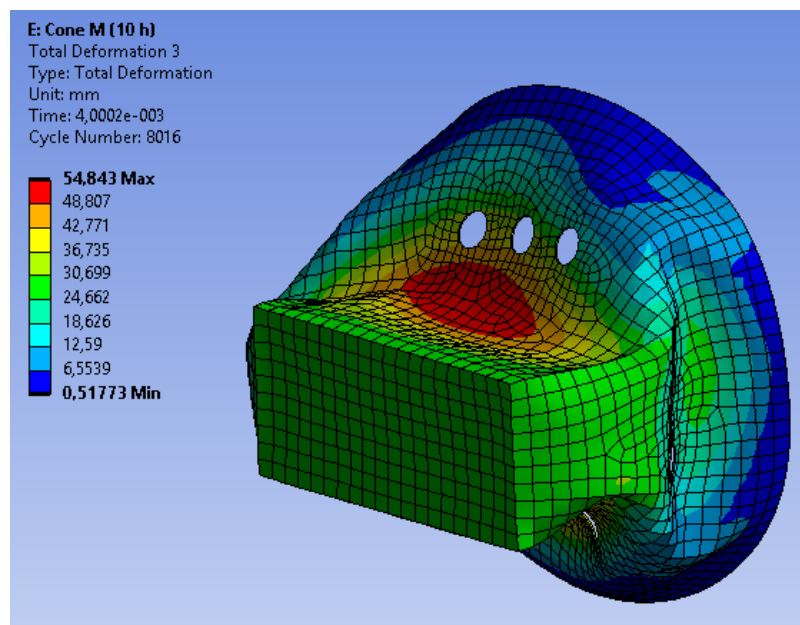


Рисунок 55 – Повреждения оптимизированной формы аттенюатора в начале исследования

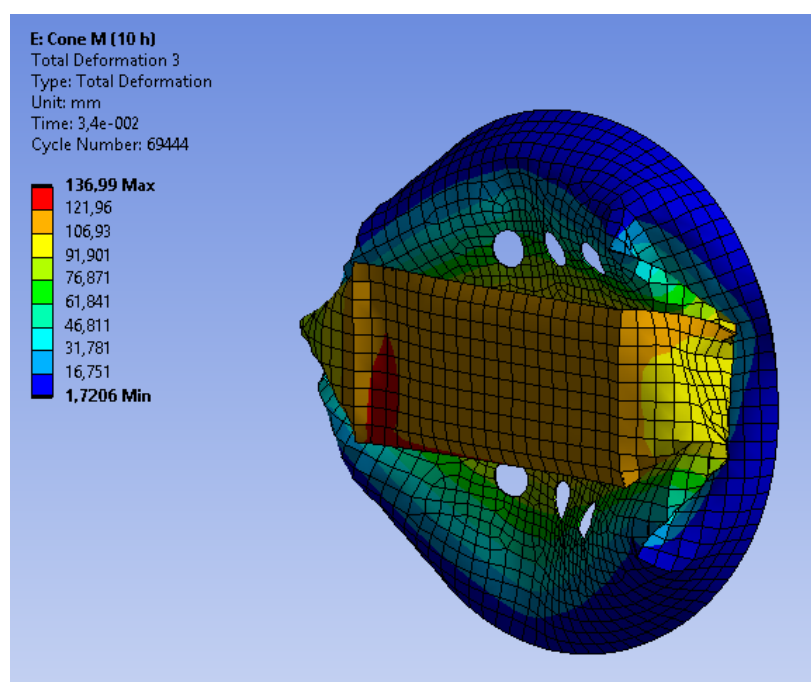


Рисунок 56 – Повреждения оптимизированной формы аттенюатора в конце исследования

На рисунке 57 представлен график деформации по времени.

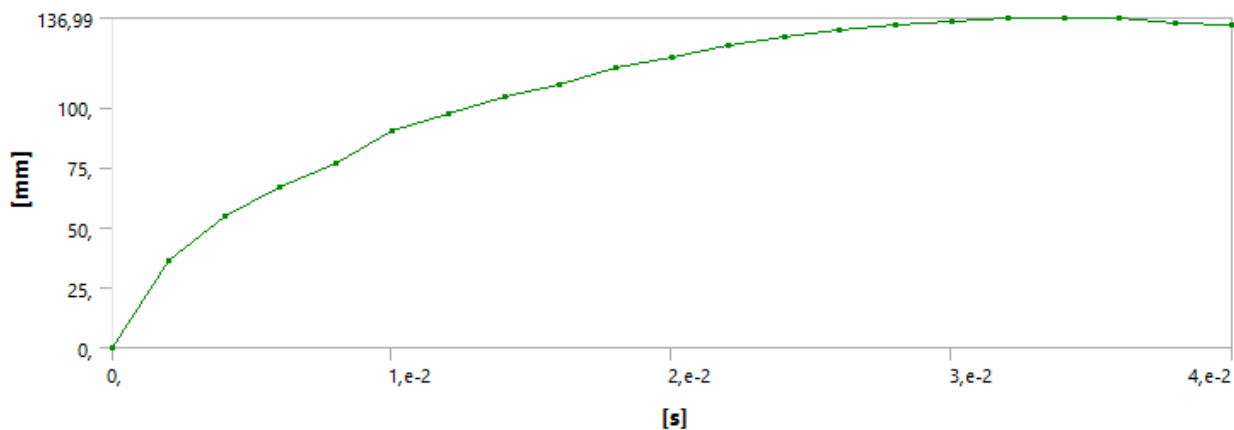


Рисунок 57 – Влияние шкалы времени на повреждения аттенюатора

«Видно, что деформация возрастает плавно на всем протяжении процесса и максимальная деформация составляет почти 140 мм, что говорит о хорошем поглощении энергии через разрушение аттенюатора.

На рисунке 58 представлена картина деформации защитной пластины, а на рисунке 59 – график деформации по времени.» [13].

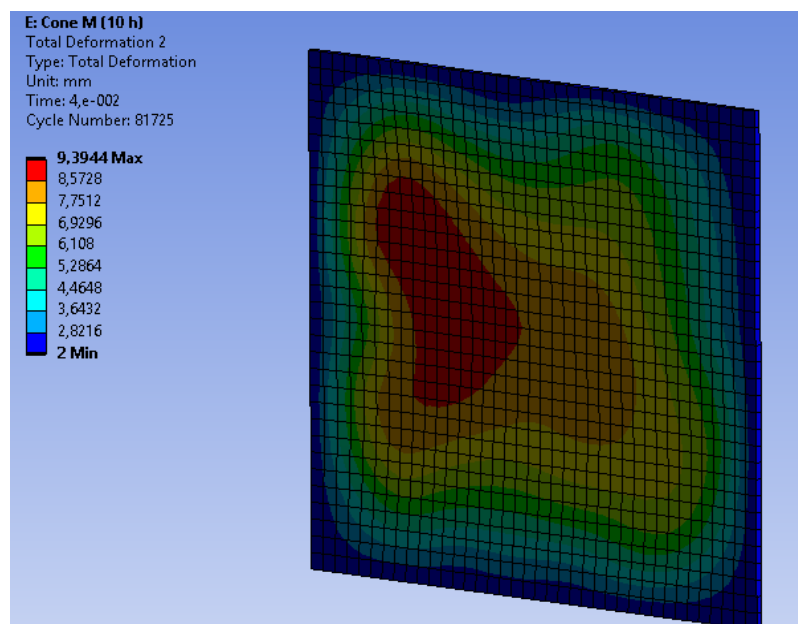


Рисунок 58 – Повреждения защитной пластины

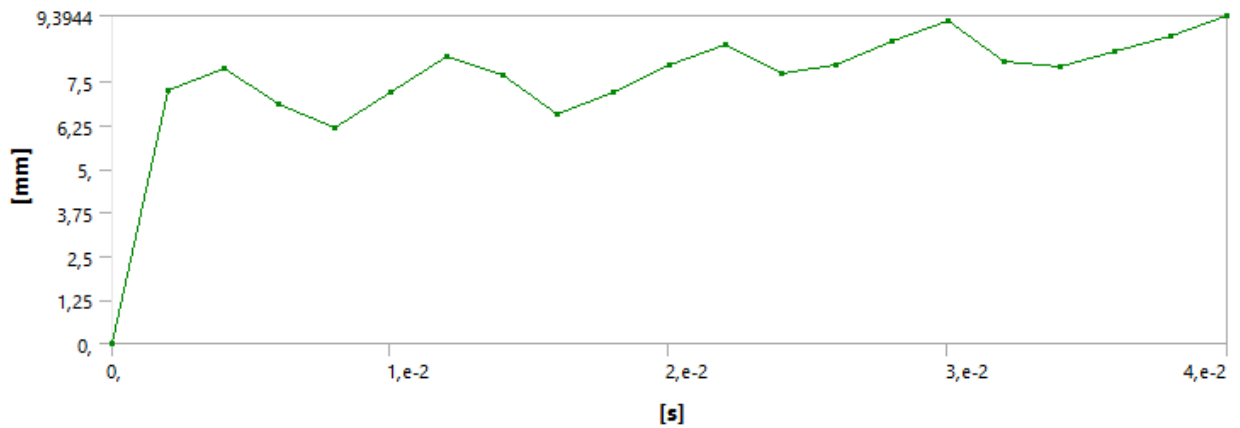


Рисунок 59 – Шкала времени исследования и ее влияние на повреждения защитной пластины

«Видно, что деформация находится в допустимых пределах и имеет тенденцию к возрастанию, что говорит о постепенной передаче усилий на пластину.

Следующим шагом оценим величину поглощенной энергии (рисунок 60).» [13]

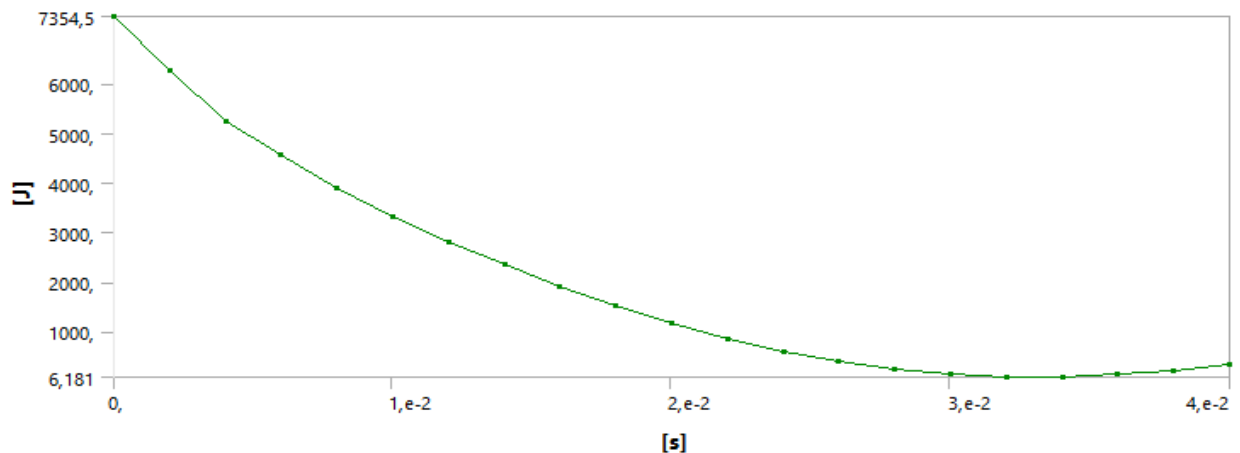


Рисунок 60 – Поглощение кинетической энергии attenuатором оптимизированной формы

«Видно, что произошло практически полное поглощение энергии attenuатором. Количество непоглощенной энергии находится в пределах допустимой погрешности.

Следующим шагом оценим среднюю перегрузку.

На рисунке 61 представлен график зависимости падения скорости при деформировании аттенюатора от времени.» [10].

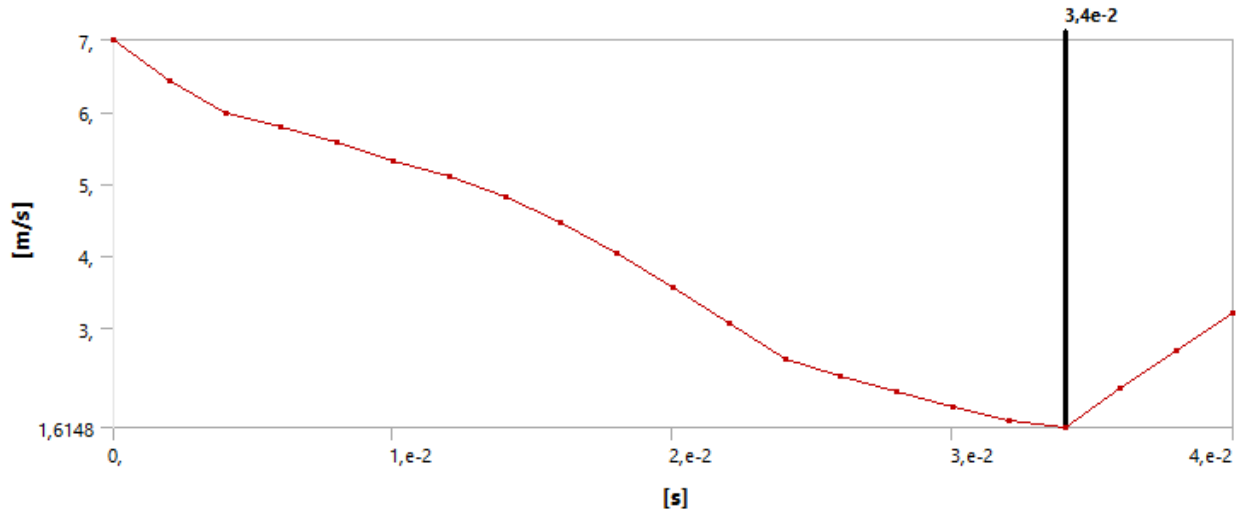


Рисунок 61 – Шкала замедления скорости от аттенюатора оптимизированной формы

Исходя из графика, найдем среднюю перегрузку по формуле (1):

$$G_{cp} = \sqrt{1 + \frac{(7 - 1,6/0,034)^2}{9,8^2}} = 16,2.$$

То есть, средняя перегрузка полностью удовлетворяет требованиям регламента.

И наконец, оценим максимальную перегрузку.

На рисунке 62 представлен график максимального ускорения.

Исходя из графика, найдем максимальную перегрузку по формуле (3):

$$G_{max} = \sqrt{1 + \frac{(327,78)^2}{9,8^2}} = 33,4.$$

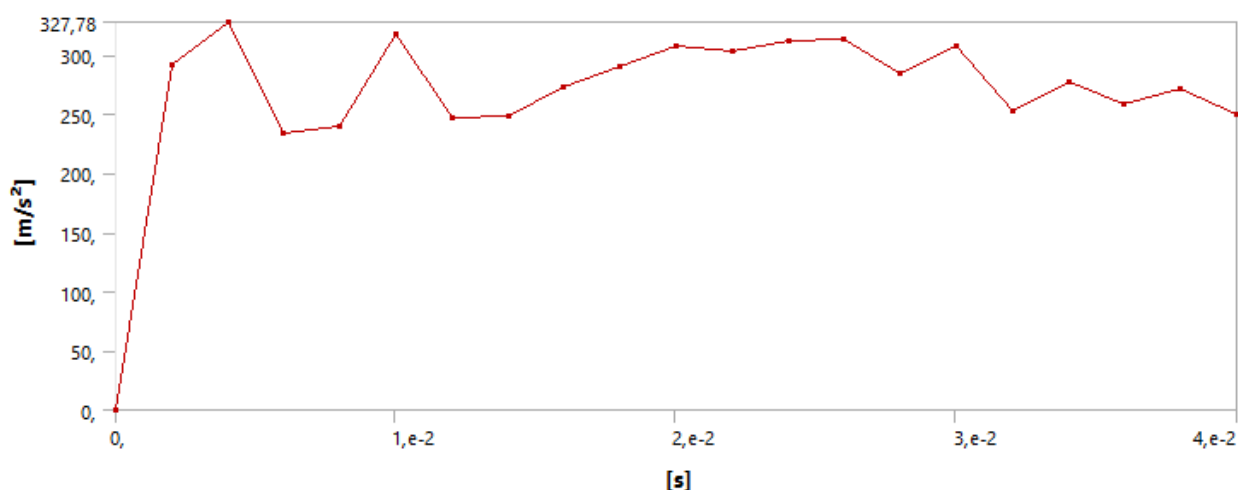


Рисунок 62 – Шкала максимального ускорения

То есть и максимальная перегрузка полностью удовлетворяет требованиям регламента.

Таким образом, данная конструкция аттенюатора полностью отвечает требованиям регламента Formula Student по всем необходимым пунктам.

Выводы по разделу: так как ни одна из анализируемых форм не отвечали требованиям регламента было решено оптимизировать конусную форму. Чтоб решить вопрос по перегрузке, была ослаблена конструкция в местах, которых она подвергалась максимальной деформации с самого начала. Для этого было сделано 10 отверстий диаметром 20 мм. Благодаря этому все показатели по перегрузке были пройдены, аттенюатор стал отвечать требованиям регламента проекта «Formula Student».

Представлены результаты по полному поглощению энергии удара 7350 Дж, деформации защитной пластины 9,39 мм при ограничении в 25 мм, усредненной перегрузке 16,2 g и максимальной перегрузке 33,4g.

Заключение

В данной работе рассмотрели конструирование энергопоглощающего элемента гоночного болида в соответствии с требованиями. Провели анализ различных форм attenuаторов. Провели анализ при столкновении гоночного болида, как меняется форма attenuатора в результате поглощения кинетической энергии. При проектировании важно учитывать также дополнительные требования к attenuаторам, такие как усредненная перегрузка при ударе и величина деформации.

В первом разделе рассмотрели варианты конструкций attenuаторов и их применимости под требования «Formula Student». Расчеты проводили методом конечно-элементного моделирования, а также испытаниями экспериментальным путем. В основном attenuаторы предлагается изготавливать из алюминиевых пластин различной толщины, собранных в сэндвич. Во втором приближении рекомендации из сотовых конструкций и композитных материалов в качестве энергопоглощающего элемента конструкции спортивного болида.

Во втором разделе предложили укрупненную блок-схему методов проектирования, выполненных в виде поверхностных тел в различных программах. Подготовили расчетную модель attenuатора.

В третьем разделе провели анализ конструкций по дополнительным требованиям удовлетворения перегрузке.

В четвертом разделе выбрали модель attenuатора для улучшений. Провели анализ, который позволил улучшить форму энергопоглощающего элемента и пройти дополнительные требования. В изменения конструкции позволили полностью выполнить все требования регламента проекта «Formula Student».

Список используемой литературы и используемых источников

1. Алюминий и его сплавы: характеристика, свойства, применение
URL: <https://ferrolabs.ru/blog/alyuminiy-i-ego-splavy/> (дата обращения 12.03.2021). – Загл. с экрана.
2. Басов К. А. Графический интерфейс комплекса ANSYS: учебное пособие. Саратов: Профобразование, 2019. 239 с.
3. Божко А. Н., Волосатова Т. М., Грошев С. В., Жук Д. М. Основы автоматизированного проектирования: учебник. Москва: ИНФРА-М, 2019. 329 с.
4. Глазев Д. А. Разработка конструкции аттенюатора гоночного болида класса «Формула Студент»: магистерская диссертация: 15.04.01. Тольятти, 2019. 71 с.
5. Глазев Д. А., Щукина В. М. Анализ конструкции аттенюатора // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2019. № 2. С. 29-31.
6. Горохова Д. А. Бобровский А. В. Разработка аттенюатора гоночного болида серии Formula SAE на основе энергопоглощающей пены в системе CAD/CAM/CAE // Компьютерное моделирование – 2016 (КОМОД-2016): труды национальной научно-технической конференции. – 2016. – С. 288 – 294.
7. Горохова Д. А. Разработка и моделирование системы безопасности гоночного болида класса Formula Student на основе пеноалюминия в системах CAD/CAE: магистерская диссертация: 15.04.01. Тольятти, 2017. 91 с.
8. Компас 3D. URL: <https://kompas.ru/> (дата обращения 19.05.2021). – Загл. с экрана.
9. Копылов Ю. Р. Основы компьютерных цифровых технологий машиностроения: учебник. Санкт-Петербург: Лань, 2019. 495 с.

10. Косенко И. И., Кузнецова Л. В., Николаев А. В. Проектирование и 3D-моделирование в средах CATIA V5, ANSYS и Dymola 7.3: учеб. пособие. Москва : ИНФРА-М, 2020. 183 с. (Высшее образование. Магистратура). URL: <https://new.znaniium.com/catalog/product/1062026> (дата обращения: 11.05.2021).
11. Луц А. Р., Суслина А. А. Алюминий и его сплавы: учебное пособие. Самара: СГТУ, 2013. 81 с.
12. Основы автоматизированного проектирования: учебник / под ред. А. П. Карпенко. Москва : ИНФРА-М, 2015. 329 с.
13. Рубцов А. В. Разработка и моделирование аттенюатора для гоночного болида Formula SAE из алюминиевого профиля в системе CAD/CAE: магистерская диссертация: 15.04.01. Тольятти, 2017. 90 с.
14. Шакалов И. П. Анализ и проектирование гасителя фронтального удара // Студенческие инженерные проекты: сборник трудов 4-го Всероссийского форума. 2016. С. 39-42.
15. Abrahamson C., Bruns B., Hammond J., Lutter J. Formula SAE Impact Attenuator Testing // Mechanical Engineering . 2013. № 7. P 35-46.
16. ANSYS Explicit Dynamics. URL: <https://cae-expert.ru/product/ansys-explicit-dynamics> (дата обращения 19.05.2021). – Загл. с экрана.
17. Boria S. Behaviour of an Impact Attenuator for Formula SAE Car under Dynamic Loading // Int. J. Vehicle Structures & Systems. 2010. № 2. P. 45-53.
18. Munusamy R., Barton D. Lightweight Impact Crash Attenuators for a Small Formula SAE Car // International Journal on Crashworthiness. 2010 № 15, P 223-234.
19. Obradovic J. Experimental and numerical investigations of the impact behavior of composite frontal crash structures // Composites Part B: Engineering. 2015. № 79. PP. 20-27.
20. Zenkert D. The Handbook of Sandwich Construction. EMAS Publishing, 1997. 186