

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Физико-механический институт  
Высшая школа теоретической механики и математической физики

Работа допущена к защите  
Директор ВШТМиМФ, д.  
ф.-м. н., чл.-корр. РАН  
А.М. Кривцов  
«\_\_\_\_\_»\_2023 г.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ  
АНАЛИЗ ЭНЕРГОПОГЛОЩАЮЩИХ СВОЙСТВ  
КРАШ-БОКСА АВТОМОБИЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

По направлению 01.04.03 «Механика и математическое моделирование»  
Направленность 01.04.03\_03 «Механика и цифровое производство»

Выполнила  
студентка гр.5040103/10301

И.А. Байбородова

Руководитель  
доцент ВШТМиМФ, к.ф.-м.н

О.С. Лобода

Консультант  
ведущий инженер  
ООО «Центр технологического консалтинга»

А.В. Смирнов

Консультант  
по нормоконтролю

Е.А. Хайбулова

Санкт-Петербург 2023



## **РЕФЕРАТ**

На 36 с., 30 рисунков

**РАЗРАБОТКА АВТОМОБИЛЯ, БЕЗОПАСНОСТЬ ВОДИТЕЛЯ, КРАШ-БОКС, ИНИЦИАТОРЫ, ЭНЕРГИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ**

В данной работе было проведено исследование энергопоглощающих свойств краш-боксов. После обзора литературы, на основе результатов анализа базовой модели краш-бокса были построены дополнительные модели с различными типами инициаторов. При этом также были рассмотрены различные модели материала. После проведения расчетов для оценки влияния типа инициатора на свойства модели были проанализированы результаты и сделаны выводы о том, какой материал, а также какие типы инициаторов показали себя лучше для рассмотренной задачи.

## **THE ABSTRACT**

36 pages, 30 pictures

**VEHICLE DEVELOPMENT, DRIVER SAFETY, CRASH BOX, INITIATORS, ENERGY ABSORPTION**

In this paper, considered the energy-absorbing properties of crash boxes. After reviewing the literature, based on the results of the analysis of the basic crash box model, additional models were built with different types of initiators. Various material models were also considered. After carrying out calculations to assess the influence of the type of initiator on the properties of the model, the results were analyzed and conclusions were made about which material, as well as which types of initiators, lead to the better behavior for the considered problem.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ВВЕДЕНИЕ В ТЕМУ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕЛЕЙ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	8
1.1. Метод конечных элементов.....	8
1.2. Аналитическое решение задачи о краш-боксе.....	8
1.3. Цель и задачи исследования.....	9
ГЛАВА 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И РАСЧЕТ МОДЕЛИ БАЗОВОГО КРАШ-БОКСА.....	11
2.1. Модель базового краш-бокса.....	11
2.2. Выбор материалов.....	12
2.3. Граничные условия.....	15
2.4. Расчет модели базового краш-бокса и анализ результатов.....	16
ГЛАВА 3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И РАСЧЕТ МОДЕЛЕЙ КРАШ-БОКСОВ С ИНИЦИАТОРАМИ.....	23
3.1. Виды инициаторов.....	23
3.2. Построение моделей краш-боксов с инициаторами.....	24
3.3. Граничные условия и выбор материалов.....	25
3.4. DOE моделирование.....	25
3.5. Расчет моделей краш-боксов с инициаторами и анализ результатов....	26
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	33
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	35

## ВВЕДЕНИЕ

Краш-бокс автомобиля – это элемент системы безопасности транспортного средства, который помогает поглотить энергию от столкновения автомобиля с другим объектом [8, 9]. Чаще всего краш-бокс выглядит как коробчатый элемент, который устанавливается в переднюю часть продольных профилей, расположенных спереди и сзади кузова автомобиля, являющихся главными силовыми элементами всей конструкции и называемых лонжеронами. На Рисунке 1 представлен пример расположения и крепления краш-боксов к лонжеронам автомобиля. Обычно энергопоглощающие элементы изготавливают таким образом, чтобы их можно было без труда снять и поставить новые в случае аварии и повреждения [4].



Рисунок 1. Расположение краш-боксов в автомобиле.

При разработке автомобиля важным вопросом является проектирование силовых путей и определение оптимальной конфигурации краш-боксов, то есть выбор материала, геометрии, количества и формы инициаторов и так далее, при заданных ограничениях, таких как цена, масса, максимальные и минимальные размеры, толщина, результаты статических прочностных расчетов. Для лучшего поглощения энергии от удара при аварии и уменьшения инерционных нагру-

зок, действующих на организм водителя и пассажиров транспортного средства, форму краш-боксов усложняют, добавляя концентраторы напряжений, так называемые инициаторы. На Рисунке 2 приведены примеры того, как выглядят краш-боксы некоторых автомобилей известных марок.

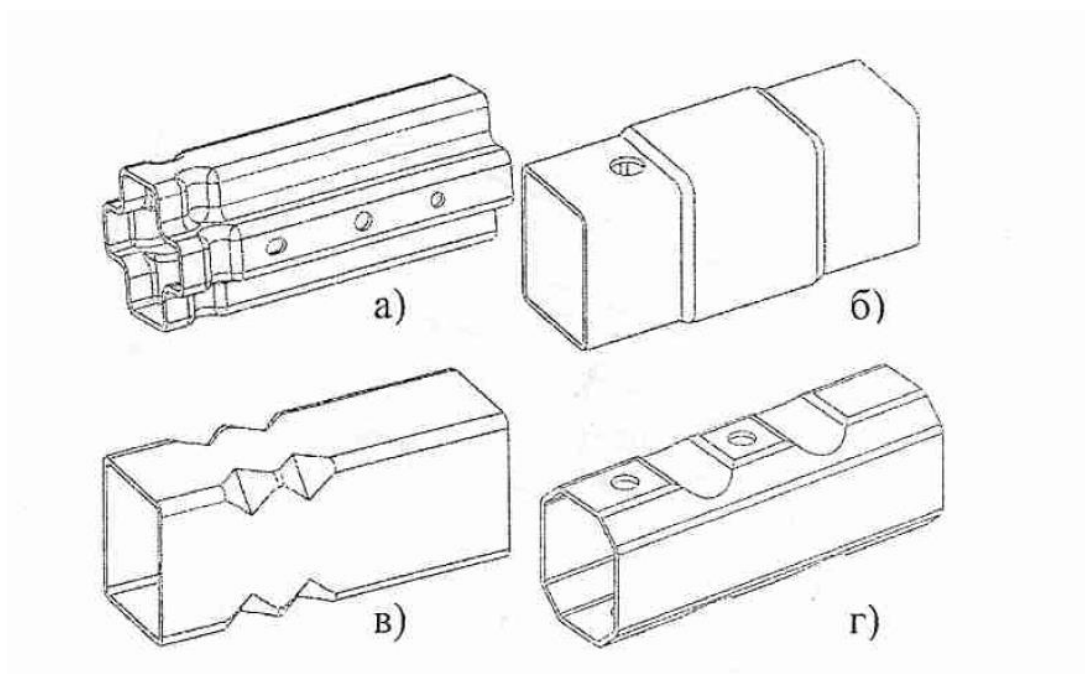


Рисунок 2. Краш-боксы некоторых автомобилей: а) Mazda CX5, б) Volkswagen Golf VI, в) Audi R8, г) Mazda RX8.

Чтобы оценить, насколько безопасен автомобиль для пассажиров и пешеходов, и обнаружить дефекты в системе, необходимо проведение краш-тестов. Так как проведение реальных испытаний автомобилей в условиях аварий очень дорогостоящая процедура, которая требует много специальной подготовки, то при разработке автомобилей инженеры-расчетчики проводят те же испытания, но на математических моделях [1]. В процессе разработки и дальнейшей оптимизации конструкции автомобиля инженерам приходится проверять большое количество вариантов, поэтому необходимо каким-то образом ускорить и упростить этот процесс.

В данной работе будет проведено исследование энергопоглощающих свойств модели простого краш-бокса, сделаны некоторые выводы о материалах,

из которых их обычно изготавливают. Также будут рассмотрены еще несколько более сложных моделей краш-боксов, сделаны заключения о том, какие концентраторы напряжений как влияют на поглощение энергии при столкновении. В будущем все полученные результаты можно будет собрать вместе и сделать некий инструмент, который позволит подобрать наиболее подходящие варианты краш-боксов и проверять уже их в полноценных расчетах без проверки заранее проигранных случаев, что позволит ускорить и упростить процесс разработки автомобиля.

# ГЛАВА 1. ВВЕДЕНИЕ В ТЕМУ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕЛЕЙ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

## 1.1. Метод конечных элементов

Метод конечных элементов (МКЭ) является одним из самых эффективных численных методов решения различных математических задач, которые описывают состояние физических систем, имеющих сложную геометрическую структуру.

В основе этого метода лежат два важнейших принципа, таких как дискретизация рассматриваемого объекта на конечное множество элементов и кусочно-элементная аппроксимация исследуемых функций [5, 7].

Метод конечных элементов имеет ряд преимуществ перед другими численными методами. В МКЭ можно исследовать объекты, имеющие различную форму и физическую природу. С его помощью можно решать и стационарные, и нестационарные задачи. МКЭ также позволяет решать контактные задачи.

В наше время метод конечных элементов является важным и мощным инструментом инженерного анализа и физических исследований. Были созданы пакеты компьютерных программ, такие как ANSYS, NASTRAN, ABAQUS и другие, которые не только реализуют вычислительный процесс, но также имеют удобный интерфейс для ввода исходных данных, контроля процесса вычислений и обработки результатов расчёта.

## 1.2. Аналитическое решение задачи о краш-боксе

Первые современные исследования динамического неупругого поведения труб с прямоугольным сечением начались около пятидесяти лет назад. В. Абрамович и Н. Джонс провели ряд экспериментов и сумели вывести универсальную формулу, которая позволяет оценить, какую энергию может поглотить такая конструкция [10, 11, 14, 15].



Выражение для средней динамической силы для негофрированного коробчатого элемента из идеально пластичного материала, полученного Абрамовичем и Джонсом, представлено ниже.

$$F_{\text{ср}} = 13.05\sigma_0 H^{\frac{5}{3}} C^{\frac{1}{3}} \quad (1.1)$$

В формуле (1.1)  $H$  – это толщина стенок трубы,  $C$  – полусумма длины и ширины сечения трубы.

$\sigma_0$  вычисляется по формуле:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_y + \sigma_u}{2}, \quad (1.2)$$

где  $\sigma_y$  и  $\sigma_u$  - предел текучести и предел прочности материала, из которого изготовлена труба, соответственно [12, 13].

Для упрощения анализа результатов энергию поглощения будем рассматривать как:

$$E = F_{\text{ср}} \cdot L, \quad (1.3)$$

где  $L$  – величина сминания трубы.

### 1.3. Цель и задачи исследования

Целью исследования является изучение поведения модели базового краш-бокса, представляющего собой коробчатый элемент с ровной поверхностью с заданными размерами и материалами, на который действует движущаяся стена с заданной массой и скоростью, сравнение с аналитическим решением, а также сравнение с усложненными моделями краш-боксов с дополнительными инициаторами.

Задачи:

1. Исследование литературы по теме;
2. Построение модели базового краш-бокса;
3. Постановка граничных условий;

4. Выбор материалов для модели;
5. Расчет модели базового краш-бокса;
6. Анализ результатов расчета базового краш-бокса;
7. Построение моделей других краш-боксов с инициаторами;
8. Расчет моделей краш-боксов с инициаторами;
9. Анализ результатов расчета краш-боксов с инициаторами.

## ГЛАВА 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И РАСЧЕТ МОДЕЛИ БАЗОВОГО КРАШ-БОКСА

### 2.1. Модель базового краш-бокса

Для построения модели базового краш-бокса будем использовать программу ANSA. ANSA — это продвинутый препроцессор, который выполняет все необходимые задачи для подготовки конечно-элементной модели к решению: от построения и редактирования геометрии до настройки файлов решателя.

Модель базового краш-бокса представляет собой коробчатый элемент размером 250\*80\*120 мм [12, 16]. Толщина стенок коробчатого элемента составляет 1,5 мм. На Рисунке 3 представлена полученная модель. Размер элементов сетки модели составляет 5 мм. О сеточной сходимости в данной задаче говорить трудно, поскольку при изменении размера элементов сетки краш-бокс будет складываться по-разному при столкновении со стеной.

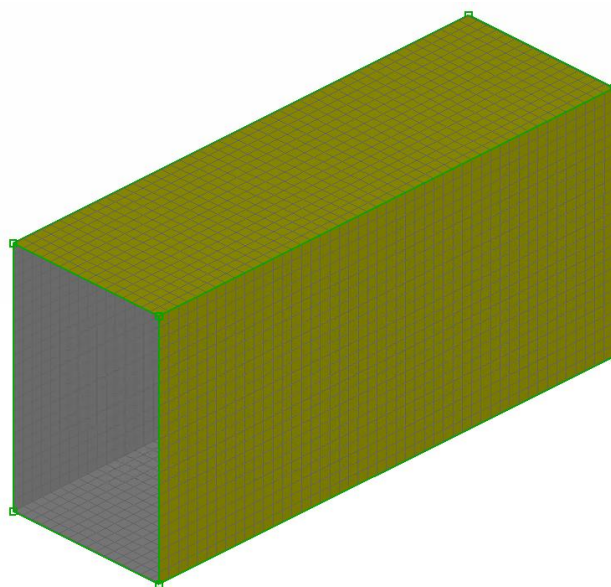


Рисунок 3. Модель базового краш-бокса.

## 2.2. Выбор материалов

Краш-боксы для современных автомобилей обычно изготавливают из высокопрочных сталей, а также из алюминиевых сплавов. При разработке спортивных автомобилей иногда применяют углепластиковое волокно [9].

Механизмы энергопоглощения композитных и металлических изделий достаточно сильно отличаются друг от друга. В стальных и алюминиевых конструкциях поглощение энергии преимущественно происходит за счет пластической деформации материала, то есть образования складок. В конструкциях, выполненных из композитных материалов, основными механизмами поглощения энергии являются разрушение волокон и деламинация слоев [21].

В данной работе будут рассмотрены 4 варианта краш-боксов, изготовленных из материалов с различными свойствами. В Таблице 1 представлены основные механические свойства стали и алюминия.

	$\sigma_y$ , Мпа	$\sigma_u$ , Мпа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
Сталь	280	430	34	67
Алюминий	75	140	20	-

Таблица 1. Основные механические свойства стали и алюминия/

Сначала рассмотрим сталь и алюминий, которые зададим как материалы с идеальной пластичностью и для которых будет выполняться критерий Мизеса, который представлен ниже [2, 3].

$$\sigma_i = \sigma_y. \quad (2.1)$$

$\sigma_i$  вычисляется по формуле:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)}, \quad (2.2)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения.

Это значит, что энергия упругого формоизменения достигает некоторого критического значения и наступает состояние текучести, напряжения уже не

меняются. График зависимости напряжений от деформаций для такого материала представлен на Рисунке 4.

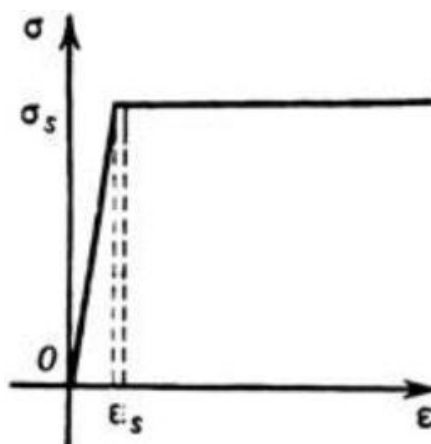


Рисунок 4. График зависимости напряжений от деформаций для материала с идеальной пластичностью.

Далее зададим в качестве материала также сталь и алюминий, но уже с помощью кривой пластичности Рамберга-Осгуда. Данная модель в большинстве случаев с достаточной степенью точности позволяет описать диаграмму деформирования упруго-пластических материалов в терминах истинных напряжений и истинных деформаций [6, 19].

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_y}\right)^{1/n}, \quad (2.3)$$

где  $\sigma_y$  — это предел текучести материала.

Чтобы рассмотреть идеальную пластичность, зададим материал в виде MAT3 MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC. На Рисунке 5 показано, как данная модель материала задается в LS-DYNA.

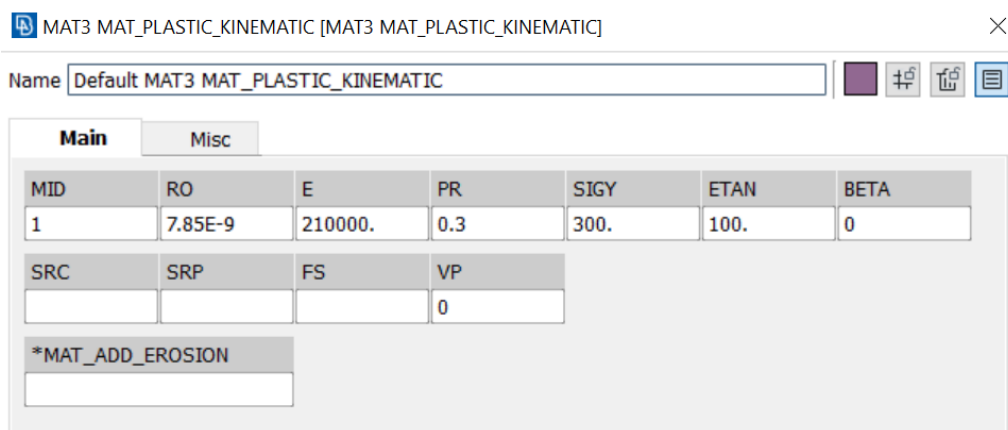


Рисунок 5. Задание материала с идеальной пластичностью.

Построим кривые пластичности Рамберга-Осгуда для стали и алюминия. Далее зададим материал через MAT24 MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY, то есть как модель с изотропным упрочнением. На Рисунках 6 - 7 представлены полученные кривые пластичности Рамберга-Осгуда для стали и алюминия.

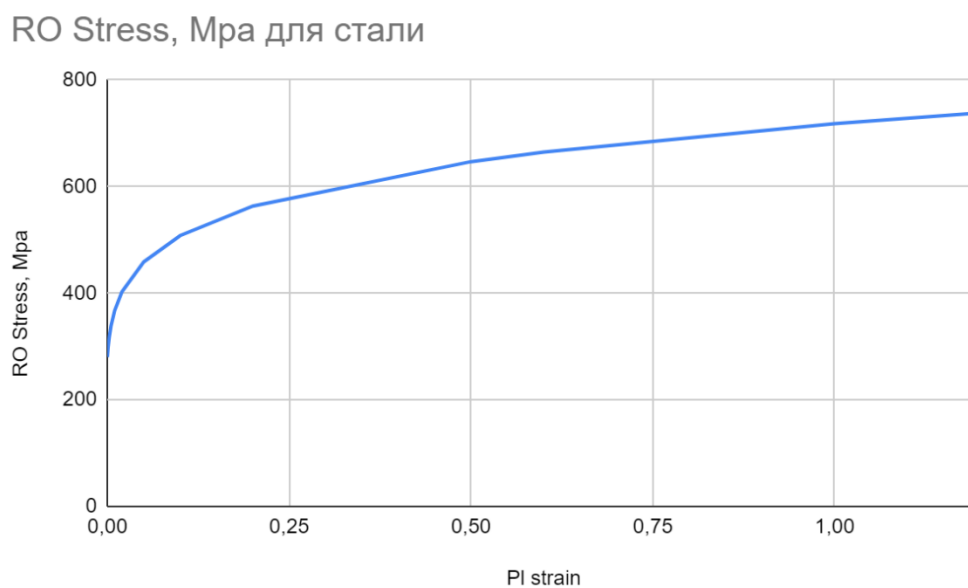


Рисунок 6. Кривая пластичности Рамберга-Осгуда для стали.

RO Stress, Мра для алюминия

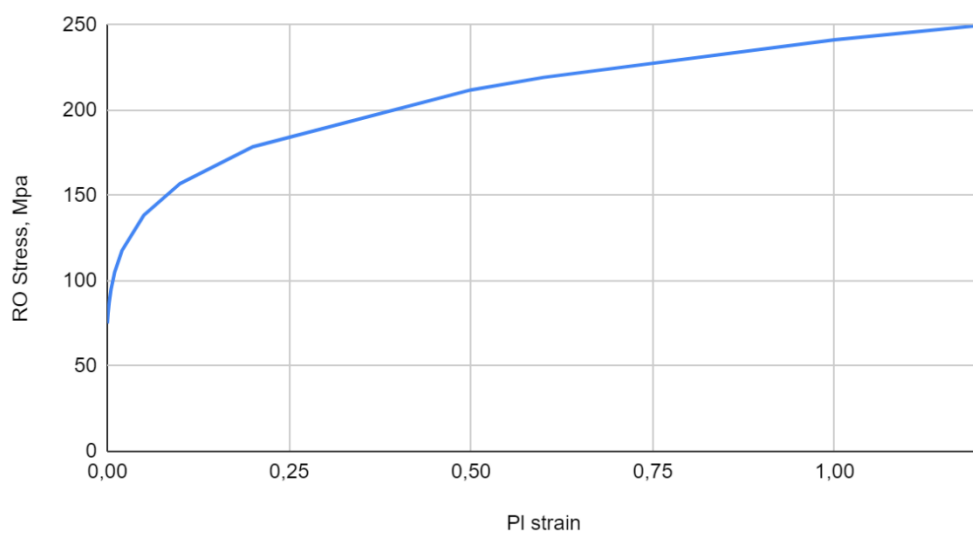


Рисунок 7. Кривая пластичности Рамберга-Осгуда для алюминия.

### 2.3. Граничные условия

На краш-бокс движется «стена» массой 15 тонн со скоростью 8000 мм/с. Другой конец краш-бокса закреплен. На Рисунке 8 представлены модели краш-бокса и движущейся на него стены.

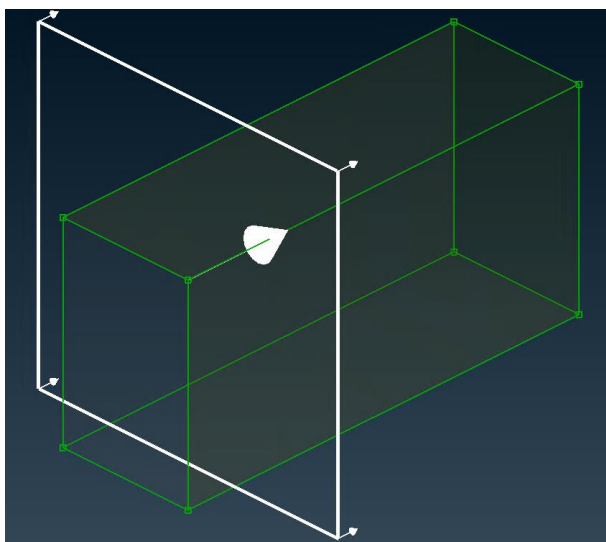


Рисунок 8. «Движущаяся стена».

## 2.4. Расчет модели базового краш-бокса и анализ результатов

В качестве решателя для наших моделей была использована программа LS-DYNA. LS-DYNA – программный комплекс, применяемый для расчетов явной динамики, способный моделировать такие испытания как удары, падения, столкновения объектов, в том числе для симуляции краш-тестов и проверок на безопасность пассажира. Данная программа нашла широкое применение в автомобильной, аэрокосмической, строительной и других сферах.

Для анализа результатов была использована программа BETA CAE META. META является мощным, удобным и интуитивно понятным инструментом для постобработки CAE-расчетов. На Рисунках 9 - 12 показан процесс сми- нания базового краш-бокс движущейся стеной для четырех временных значе- ниях, выведем распределение напряжений в краш-боксе.

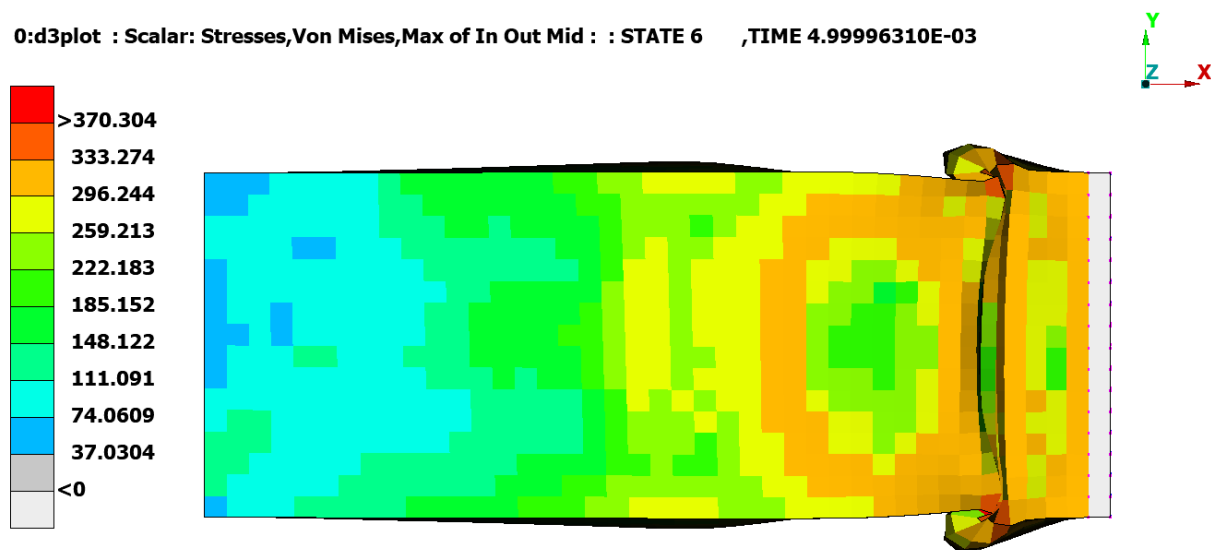


Рисунок 9. Распределение напряжений в базовом краш-боксе через 0,005 секунды.



0:d3plot : Scalar: Stresses,Von Mises,Max of In Out Mid : : STATE 11 ,TIME 9.99964308E-03

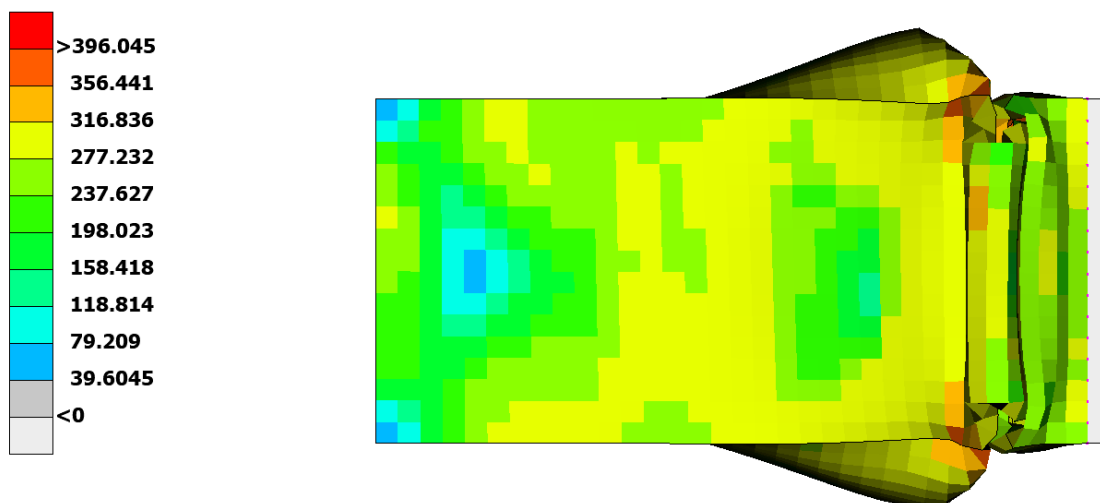


Рисунок 10. Распределение напряжений в базовом краш-боксе через 0,01 секунды.

0:d3plot : Scalar: Stresses,Von Mises,Max of In Out Mid : : STATE 16 ,TIME 1.49999531E-02

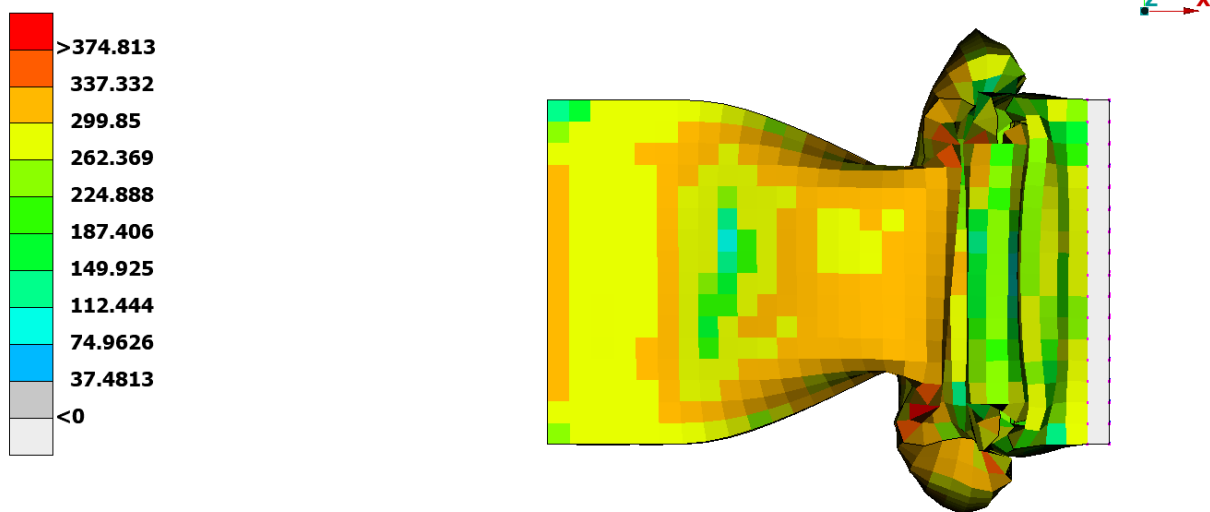


Рисунок 11. Распределение напряжений в базовом краш-боксе через 0,015 секунды.

0:d3plot : Scalar: Stresses,Von Mises,Max of In Out Mid : : STATE 22 ,TIME 2.00002622E-02

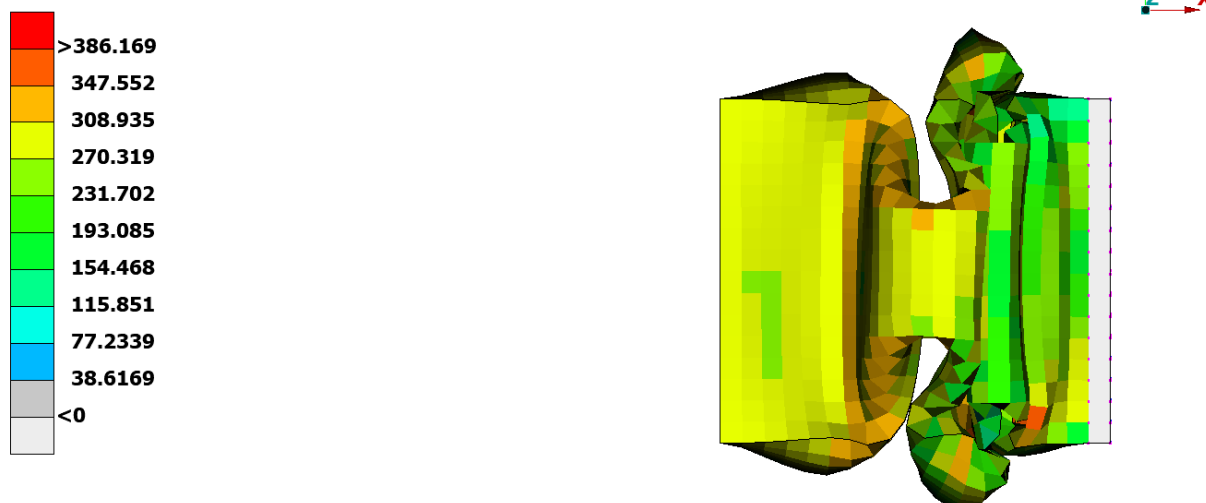


Рисунок 12. Распределение напряжений в базовом краш-боксе через 0,02 секунды.

С помощью внутренних функций МЕТА данные с графиков зависимости контактной силы от времени были перенесены в Excel и перестроены для перемещения. С помощью функции СРЗНАЧ была вычислена средняя сила для каждого случая и построены графики зависимости контактной силы от перемещения. Полученные графики представлены на Рисунках 13 - 16.

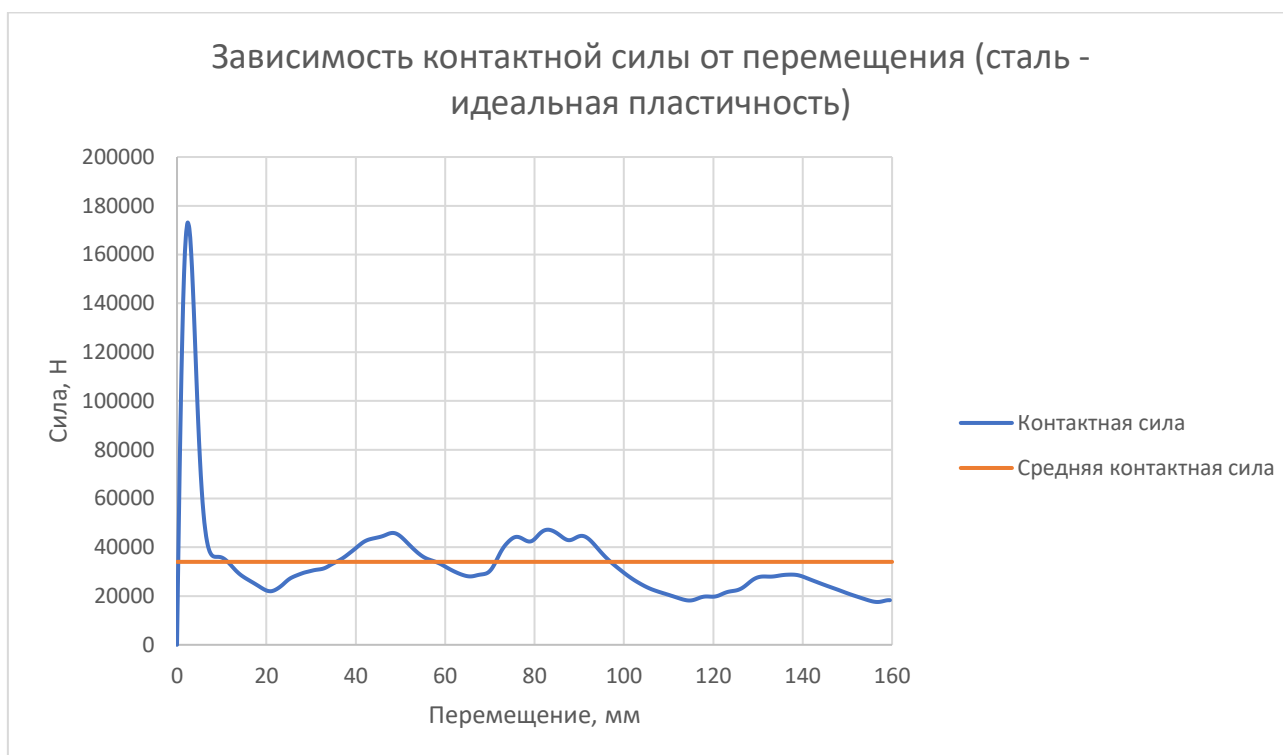


Рисунок 13. Зависимость контактной силы от перемещения для стали, заданной как материал с идеальной пластичностью.

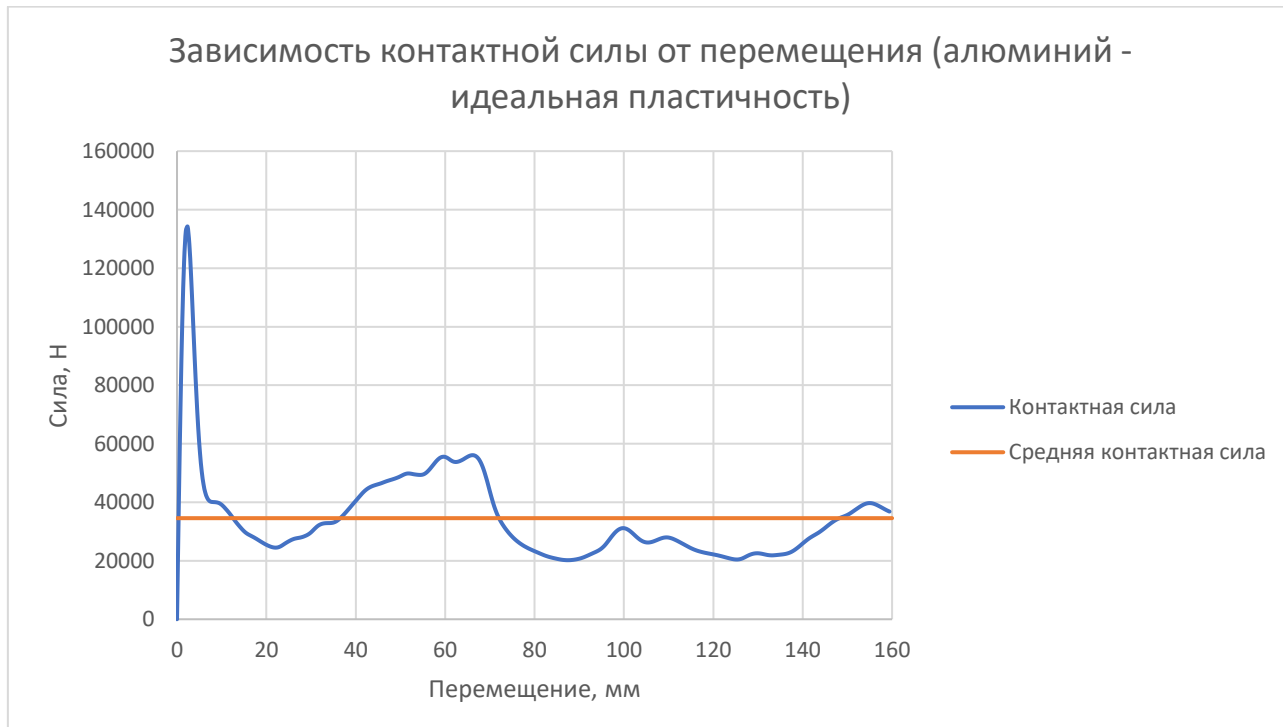


Рисунок 14. Зависимость контактной силы от перемещения для алюминия, заданного как материал с идеальной пластичностью.

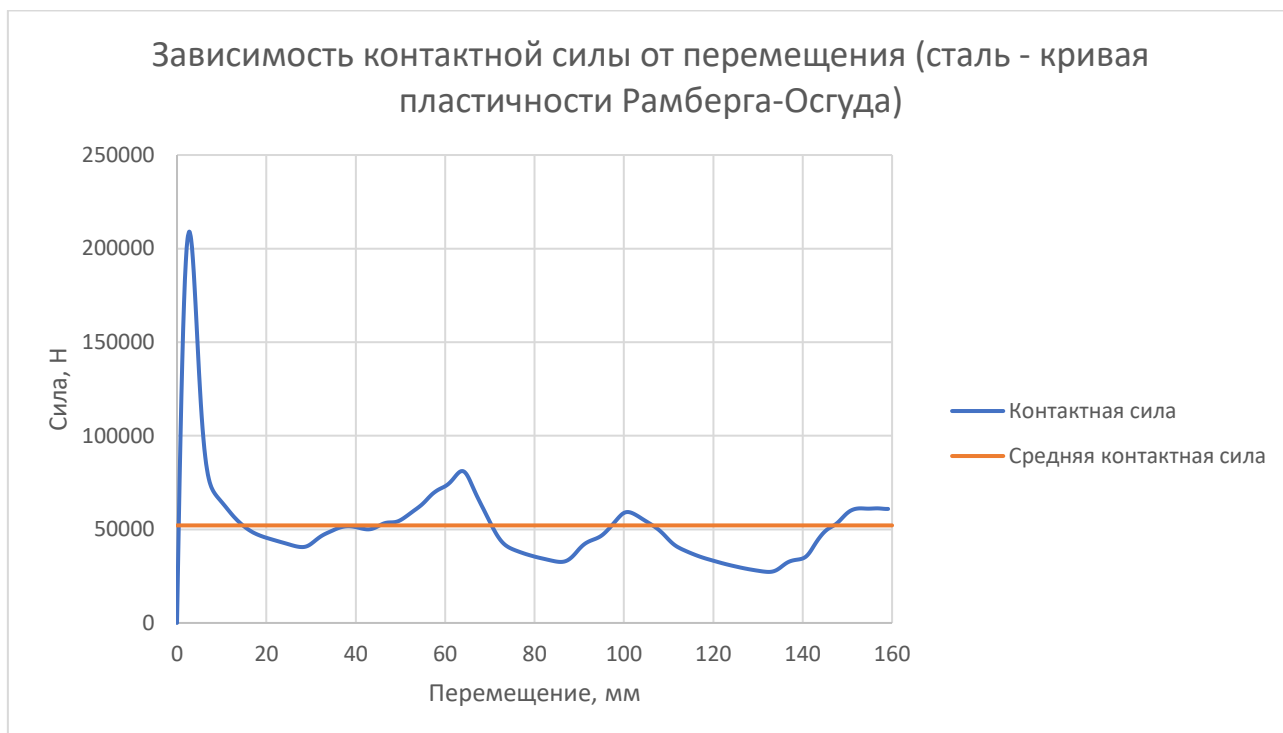


Рисунок 15. Зависимость контактной силы от перемещения для стали, заданной через кривую пластичности Рамберга-Осгуда.

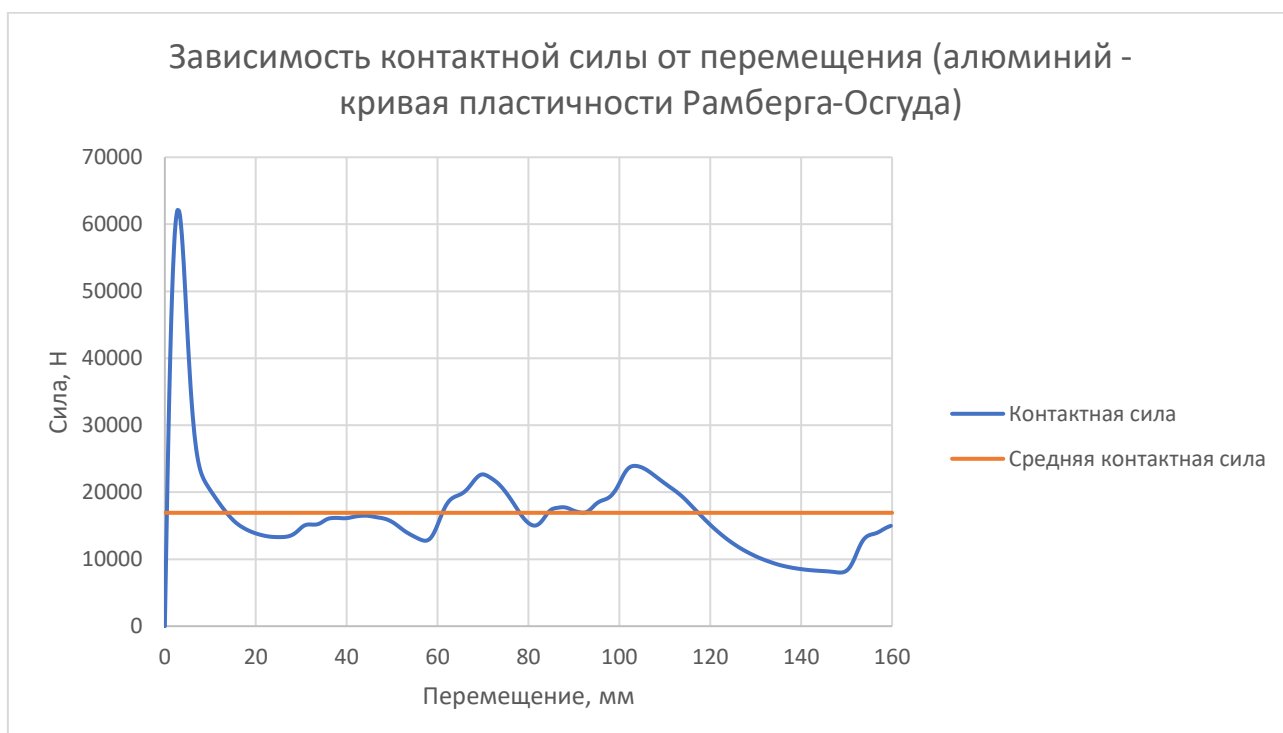


Рисунок 16. Зависимость контактной силы от перемещения для алюминия, заданного через кривую пластичности Рамберга-Осгуда.

На Рисунках 13 - 16 видно, что самая большая сила достигается в случае материала, заданного как сталь с помощью кривой пластичности Рамберга-Осгуда. Минимальная сила достигается для случая материала, заданного как алюминий с кривой пластичности Рамберга-Осгуда. Однако стоит заметить, что в случае с наименьшей максимальной силой средняя сила также самая маленькая относительно других расчетов, что говорит нам о том, что краш-бокс, изготовленный из этого материала, поглотит наименьшее количество энергии. В Таблице 2 представлены полученные значения средней силы и поглощенной энергии для численного и аналитического решения.

	Сталь (идеальная пластичность)	Алюминий (идеальная пластичность)	Сталь (кривая пластичности Рамберга-Осгуда)	Алюминий (кривая пластичности Рамберга-Осгуда)
Средняя сила (численное решение), Н	34018	34550	52110	16925
Средняя сила (аналитическое решение), Н	35718	35718	42266	12799
Энергия поглощения (численное решение), Дж	5442	5528	8338	2708
Энергия поглощения (аналитическое решение), Дж	5715	5715	6763	2048
Ошибка, %	5	3	24	18

Таблица 2. Значения средней силы и поглощенной энергии при численном и аналитическом решении задачи базового краш-бокса с материалами, для которых заданы различные свойства.

В результате расчетов моделей базового краш-бокса, изготовленных из различных материалов, было получено, что для материалов с идеальной пла-

стичностью наша модель дает достаточно точные значения. Ошибка вычислений составляет 5 % и 3 % для стали и алюминия с идеальной пластичностью соответственно. Из этого можно сделать вывод, что наша конечно-элементная модель адекватна, значит, можно усложнять конструкцию модели базового краш-бокса. Для материалов, для которых была задана кривая пластичности, результаты оказались хуже, но это объясняется нелинейным поведением материала.

На основе данной модели начнем усложнять ее конструкцию, добавляя концентраторы напряжений.

## ГЛАВА 3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И РАСЧЕТ МОДЕЛЕЙ КРАШ-БОКСОВ С ИНИЦИАТОРАМИ

### 3.1. Виды инициаторов

Краш-боксы устанавливаются в транспортных средствах для того, чтобы поглотить как можно больше энергии от удара при столкновении, а также уменьшить контактную силу. Если произойдет разрыв материала краш-бокса, то прекратится поглощение энергии. Чтобы этого избежать, в конструкцию краш-боксов включают концентраторы напряжений, так называемые инициаторы. Они бывают разной формы и размеров. Для достижения наилучших результатов поглощения энергии и уменьшения перегрузок, действующих на пассажиров автомобиля, автопроизводители комбинируют инициаторы между собой и рассматривают разные варианты их расположения.

Существует много разных видов инициаторов, среди них отверстия, формовки, насечки, выштамповки и так далее. На Рисунке 17 представлены несколько примеров концентраторов напряжений [17, 18, 20].

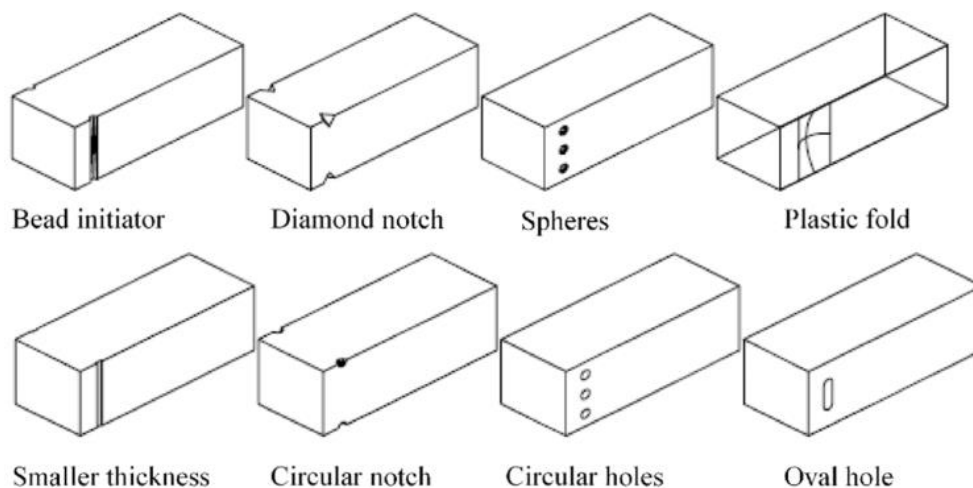


Рисунок 17. Примеры краш-боксов с разными инициаторами.

В данной работе будут рассматриваться варианты простых краш-боксов с разными видами инициаторов по отдельности, чтобы лучше разобраться, какие

из них как влияют на поглощение энергии и уменьшение первого пика силы, возникающей при контакте краш-бокса со стеной.

### 3.2. Построение моделей краш-боксов с инициаторами

В данной работе будем рассматривать 4 модификации базового краш-бокса с разными инициаторами: со скруглениями, с отверстиями на гранях, с выштамповками и с отверстиями на ребрах. За основу для новых моделей берем все ту же модель базового краш-бокса, сохраняя все линейные параметры. На Рисунках 18 - 21 представлены получившиеся модели.

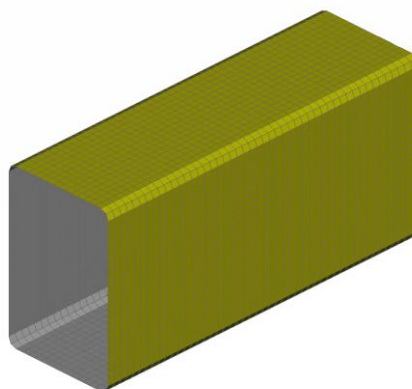


Рисунок 18. Модель краш-бокса со скруглениями.

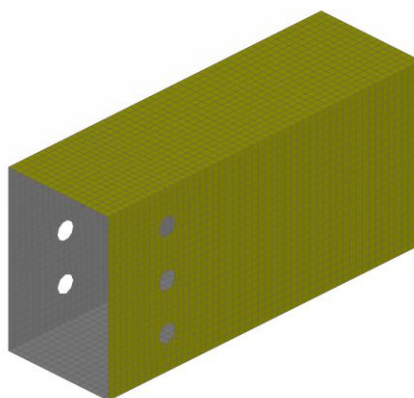


Рисунок 19. Модель краш-бокса с отверстиями на гранях.



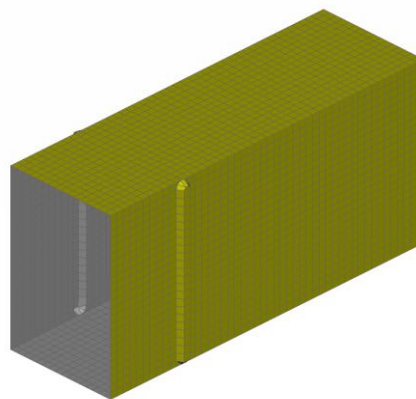


Рисунок 20. Модель краш-бокса с выштамповками.

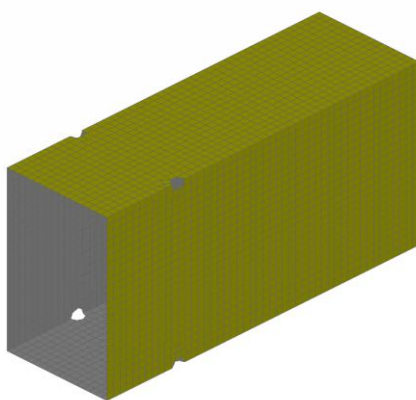


Рисунок 21. Модель краш-бокса с отверстиями на ребрах.

### 3.3. Граничные условия и выбор материалов

Граничные условия оставляем такими же, как при расчете базового краш-бокса. На краш-бокс движется «стена» массой 15 тонн со скоростью 8000 мм/с, другой конец закреплен.

В качестве материала была выбрана сталь, заданная с помощью кривой пластичности Рамберга-Осгуда.

### 3.4. DOE моделирование

Моделирование экспериментов (Design of experiments — DOE) — это статистический метод оптимизации, который предусматривает одновременное изменение различных входных параметров для определения оптимальных выходных значений.

Чтобы получить как можно больше вариантов краш-боксов для лучшей статистической оценки, воспользуемся данным инструментом. Зададим три параметра, которые будем изменять от эксперимента к эксперименту:  $Box\_t$  – толщина краш-бокса в миллиметрах,  $Delta\_Y$  и  $Delta\_Z$  – изменение линейных размеров краш-бокса в миллиметрах по осям  $Y$  и  $Z$  соответственно.

Будем рассматривать изменение параметра  $Box\_t$  от 1 до 2 мм с шагом 0,25 мм, а изменение параметров  $Delta\_Y$  и  $Delta\_Z$  от -50 мм до 50 мм с шагом 25 мм. Заданные параметры представлены на Рисунке 22. Таким образом, получаем по 5 значений для каждого из параметров и будем рассматривать различные их комбинации. Всего было рассмотрено по 125 вариаций каждой модели краш-боксов с инициаторами.

#### Design variables

ID	Name	TYPE	RANGE	Current Value	Min Value	Max Value	Step Value	Discrete Values
2	$Box\_t$	REAL	STEP	1.5	1.	2.	0.25	
3	$Delta\_Z$	REAL	STEP	0.	-50.	50.	25.	
4	$Delta\_Y$	REAL	STEP	0.	-50.	50.	25.	

Рисунок 22. Параметры для DOE-моделирования.

В качестве параметра можно задать также и материал, из которого изготовлен краш-боек. Для этого необходимо определить несколько материалов, задав их плотность, модуль Юнга, предел текучести и другие свойства. В данном разделе варьирование материалов не рассматривалось, чтобы сократить время расчета и обратить большее внимание на виды самих инициаторов. Несколько вариантов материалов были рассмотрены в Главе 1.

### 3.5. Расчет моделей краш-боксов с инициаторами и анализ результатов

Расчеты проводились с помощью инструмента LS-OPT. LS-OPT - пакет для оптимизации конструкции, идентификации системы и вероятностного анализа с интерфейсом к LS-DYNA.

Были смоделированы 4 варианта краш-боксов и для каждого из них были рассмотрены по 125 их модификаций, полученных с помощью DOE-моделирования за счет изменения толщины стенок и линейных параметров.

На Рисунках 23 - 26 представлен процесс сминания краш-боксов под воздействием движущейся стены. Видно, что для моделей с разными инициаторами это происходит по-разному.

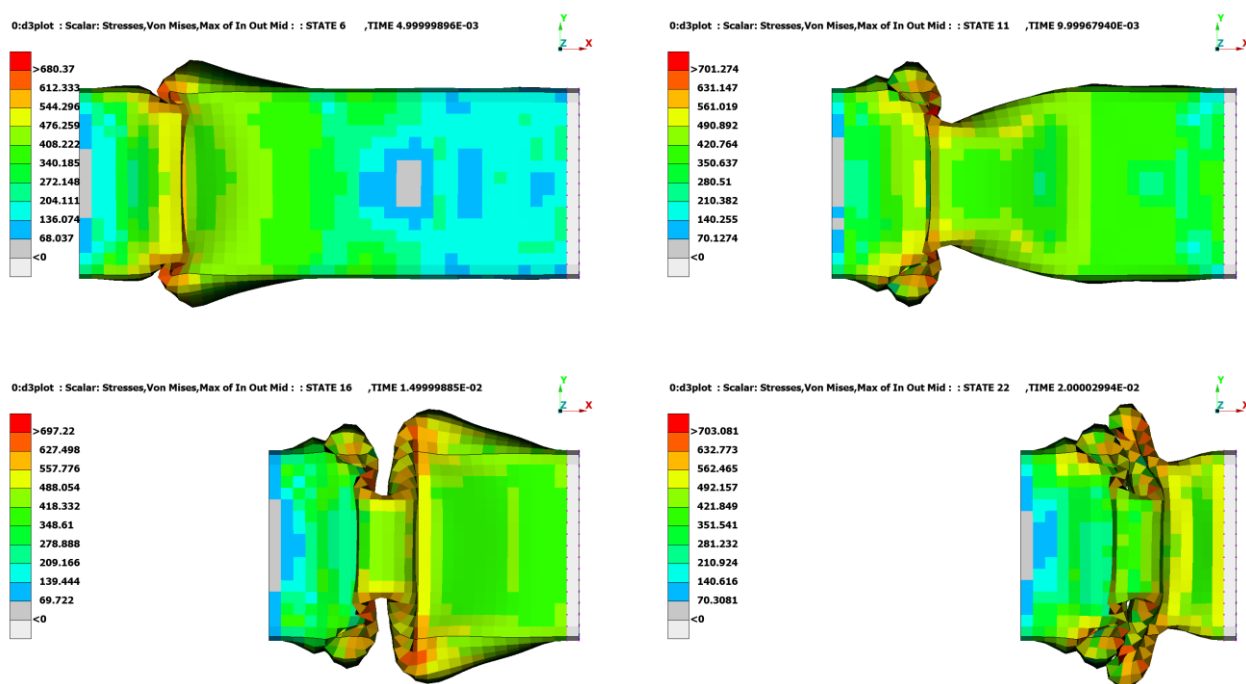


Рисунок 23. Процесс сминания краш-бокса со скруглениями.

На Рисунке 23 показано, что несмотря на то, что эта модель очень схожа с базовой, но образование складок происходит гораздо ближе к левому концу, на который как раз и действует стена.

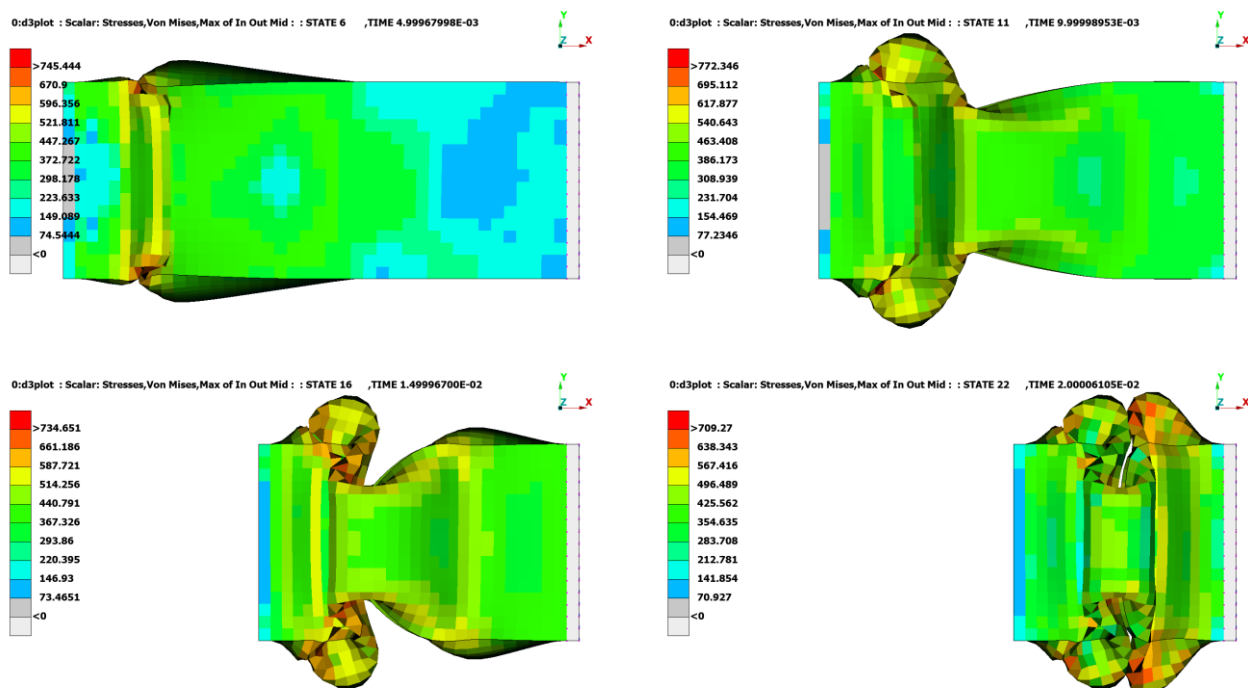


Рисунок 24. Процесс сминания краш-бокса с отверстиями на гранях.

На Рисунке 24 видно, что первая складка расположена как раз в месте, где расположены отверстия, там же и происходит концентрация напряжений.

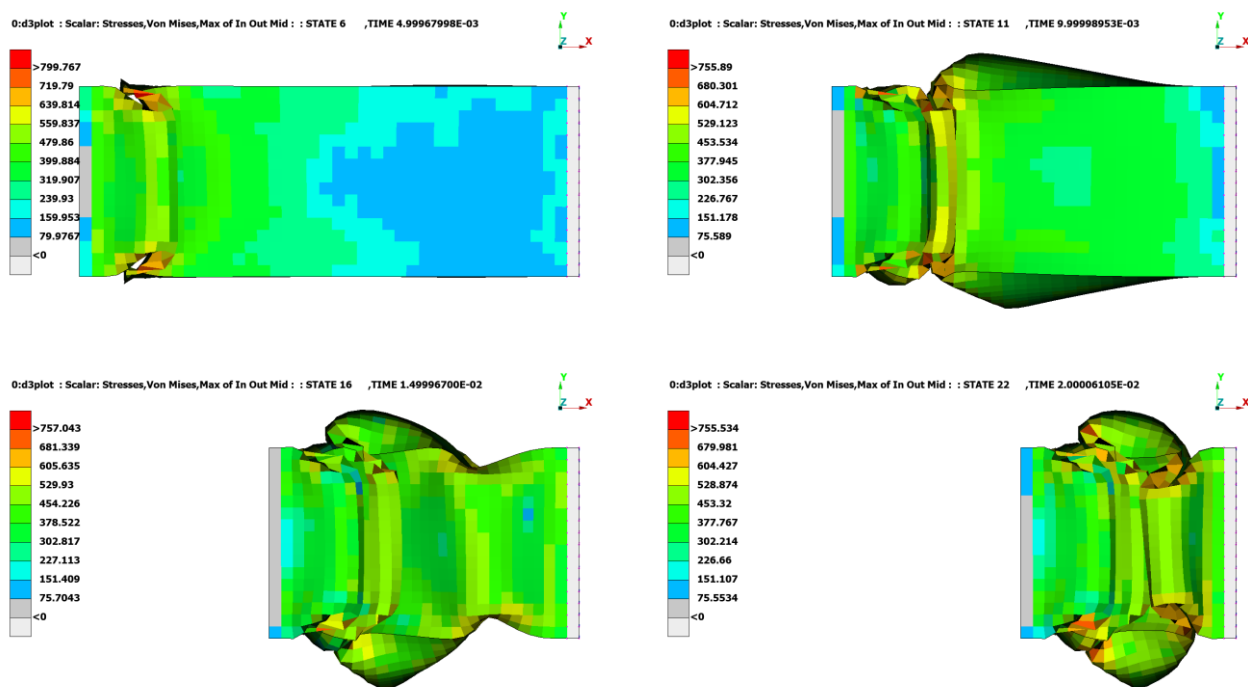


Рисунок 25. Процесс сминания краш-бокса с выштамповками.

При воздействии движущейся стены на краш-бокс с выштамповками, изображенный на Рисунке 25, можно заметить, что материал начал складываться-

ся в местах расположения выштамповок и ушел сильно внутрь коробчатого элемента.

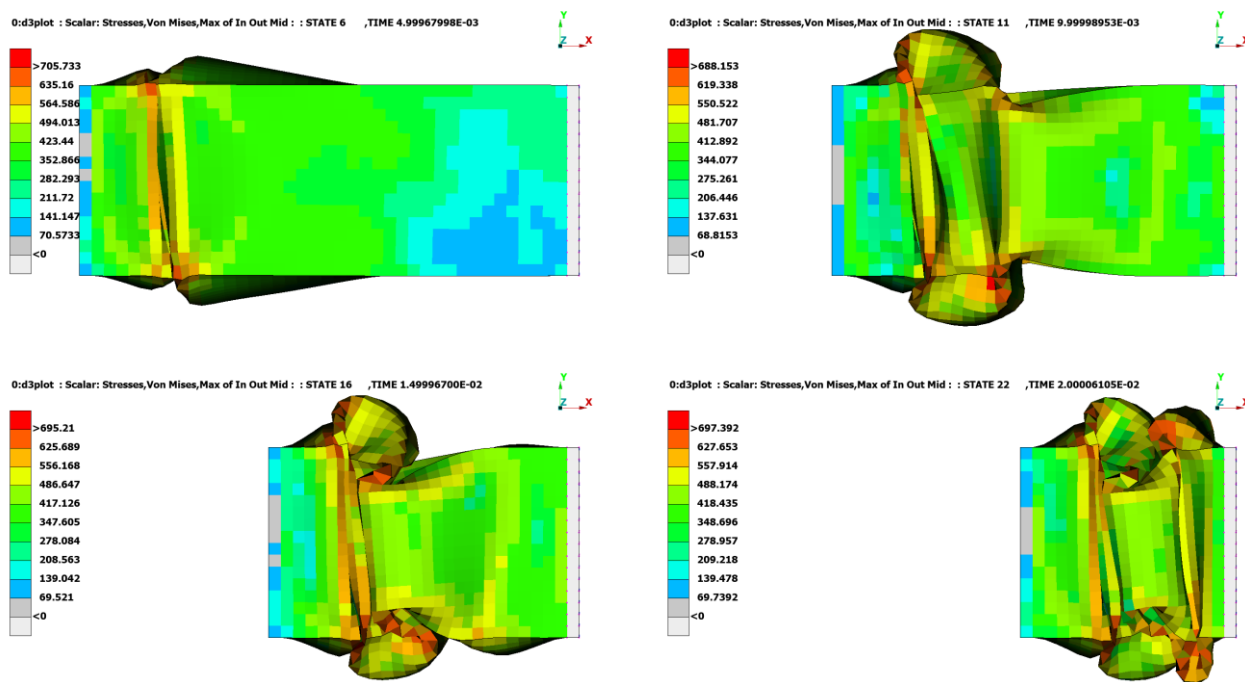


Рисунок 26. Процесс сминания краш-бокса с насечками.

На Рисунке 26 видно, что процесс сминания краш-бокса с насечками происходит несимметрично. Это можно объяснить тем, что в местах расположения насечек много треугольных элементов, расположенных по-разному. Но можно увидеть, что складки начинаются также в местах расположения инициаторов.

Так как в ходе работы мы уже отошли от базовой модели краш-бокса и перешли к более усложненной, необходимо каким-то образом анализировать полученные результаты, то есть придумать простой способ приблизительного расчета энергии поглощения. К сожалению, сравнивать с численным решением базового варианта будет не совсем правильно ввиду того, что тогда необходимо было бы рассчитать все возможные геометрии, материалы и прочее для этого случая, после чего придумать, как и где эти данные хранить. Чтобы ускорить и упростить этот процесс было принято решение сравнивать с аналитическим решением базового краш-бокса. На Рисунках 27 - 30 построены гистограммы

распределения отклонения значения энергии поглощения при численном решении от энергии поглощения при аналитическом решении базового краш-бокса каждого случая. Чем больше ошибка, тем лучше такая модификация краш-бокса поглощает энергию от удара при столкновении со стеной.

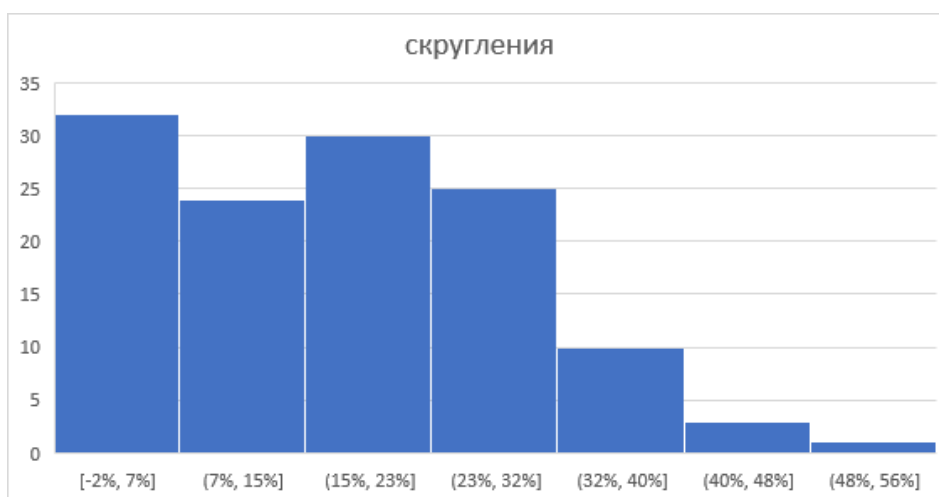


Рисунок 27. Гистограмма распределения ошибки для случая, когда инициаторами выступают скругления.

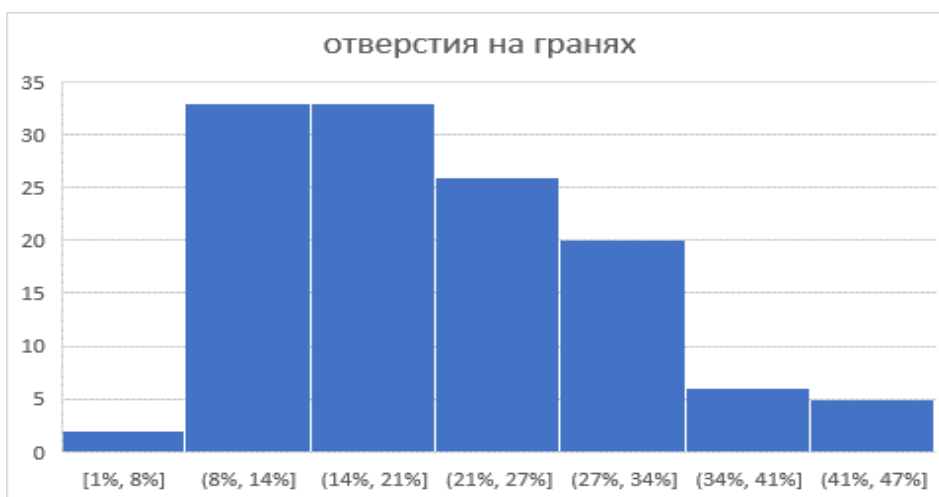


Рисунок 28. Гистограмма распределения ошибки для случая, когда инициаторами выступают отверстия на гранях.

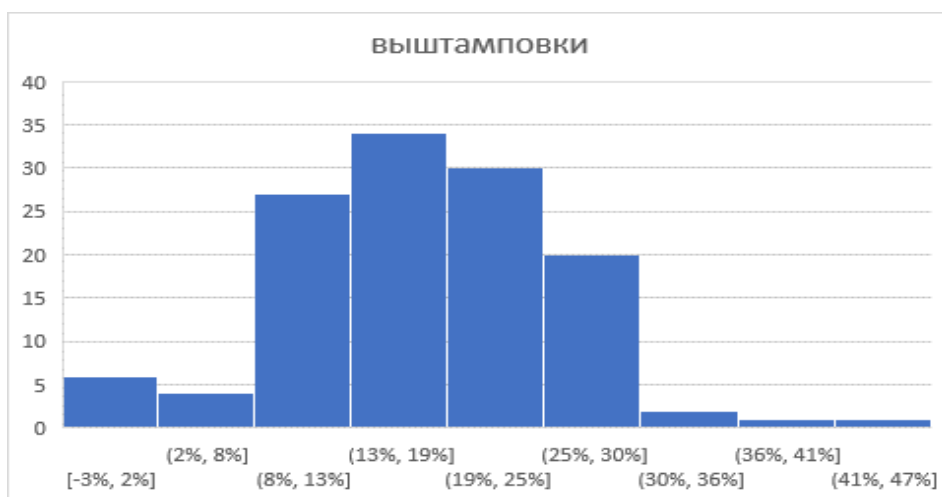


Рисунок 29. Гистограмма распределения ошибки для случая, когда инициаторами выступают выштамповки.

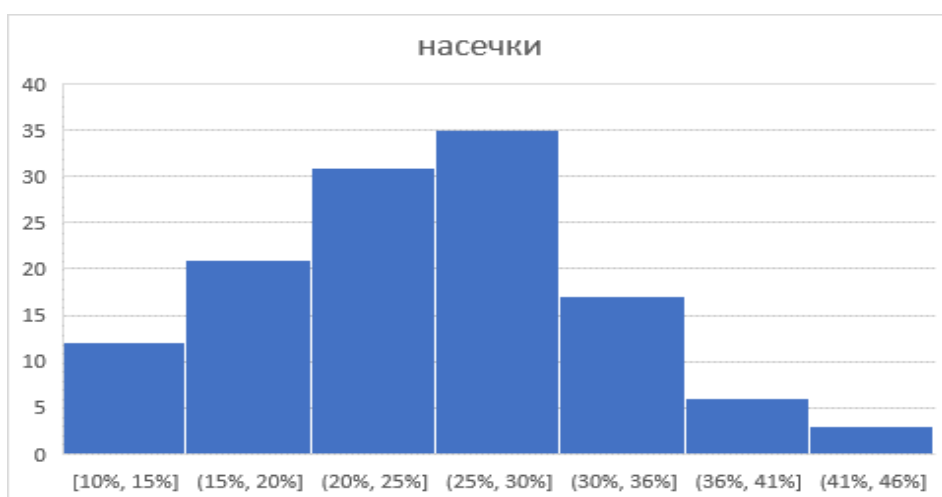


Рисунок 30. Гистограмма распределения ошибки для случая, когда инициаторами выступают насечки.

	Скругления	Отверстия на гранях	Выштамповки	Насечки
Отклонение значения энергии поглощения при численном решении от энергии поглощения при аналитическом решении базового краш-бокса, %	17	21	17	25

Таблица 3. Отклонение значения энергии поглощения при численном решении от энергии поглощения при аналитическом решении базового краш-бокса.

По Рисункам 27 – 30 и Таблице 3 видно, что максимальное количество энергии поглотил краш-бокс с концентраторами напряжений в виде насечек на ребрах, скругления и выштамповки показали худший результат.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было проведено исследование поведения модели базового краш-бокса, представляющего собой коробчатый элемент с ровной поверхностью с заданными размерами и материалами, на который действует движущаяся стена с заданной массой и скоростью, сравнение с аналитическим решением, а также сравнение с усложненными моделями краш-боксов с дополнительными инициаторами.

В первую очередь был проведён литературный анализ по теме исследования. С помощью программного пакета ANSA была построена модель базового краш-бокса, то есть коробчатого элемента с заданными размерами с ровной поверхностью, а также заданы граничные условия.

Далее с помощью литературных источников был произведен выбор материалов для полученной модели. В рассмотрение были включены 4 случая с разными материалами: сталь и алюминий, которые были заданы как материалы с идеальной пластичностью, сталь и алюминий, для которых была задана кривая пластичности Рамберга-Осгуда.

Были произведены расчеты полученных моделей краш-боксов, а также выполнено сравнение результатов численного решения с аналитическим решением этой задачи. В случае материалов с идеальной пластичностью значения численного решения достаточно точно совпадают с аналитикой.

После того, как мы убедились в адекватности нашей модели, было принято решение усложнять конструкцию краш-боксов. С помощью ANSA были построены 4 модели на основе базовой, в которые добавлены различные виды концентраторов напряжений.

С помощью DOE-моделирования для каждого из вариантов краш-боксов было построено по 125 модификаций, а далее проведен расчет всех полученных моделей.

Было замечено, что при добавлении инициаторов в базовую модель образование складок краш-бокса при воздействии движущейся стены сильно отличается от простейшего случая. Больше всего энергии поглотил краш-бокс с инициаторами в виде насечек на ребрах.

Однако открытым вопросом все еще остается насколько большая сила будет воздействовать на пассажиров транспортного средства, потому что ее можно найти только численно, аналитически посчитать нельзя.

Таким образом, в ходе работы были выполнены все поставленные задачи: проведено исследование литературы по теме; построена модель базового краш-бокса, поставлены граничные условия и выбраны материалы, проведены расчет модели и анализ результатов расчета, построены усложненные модели краш-боксов с инициаторами, проведены расчеты моделей с инициаторами и проанализированы результаты расчетов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Арутюнян Г.А., Карташов А.Б. Оценка эффективности применения композиционных материалов для энергопоглощающих зон автомобильных несущих систем // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, №2, 2018. С. 32-41
2. Головина Н. Я. Об одной эмпирической модели нелинейного деформирования упругопластических материалов // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2020. Т. 17. № 3. С. 48–55
3. Келлер И.Э., Петухов Д.С. Критерии прочности и пластичности: учеб. пособие / Келлер И.Э., Петухов Д.С. — Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2020. — 157 с.
4. Луковкин Р.О. Энергопоглощающие характеристики краш-бокса посадочного устройства возвращаемого аппарата // Инженерный журнал: наука и инновации, №10, 2018 – 12 с.
5. Розин Л. А. Метод конечных элементов // Соросовский образовательный журнал, Т. 6, №4, 2000. С. 120-127
6. Туманов А.В., Косов Д.А. Реализация степенного закона Рамберга-Осгуда в конечно-элементном комплексе ANSYS // Труды Академэнерго, №1, 2020 – С. 44-61
7. Фокин В.Г. Метод конечных элементов в механике деформируемого твёрдого тела: Учеб. пособие / В.Г. Фокин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 131 с.
8. Хусаинов А. Ш. Пассивная безопасность автомобиля. Учеб. пособие / А. Ш. Хусаинов, Ю. А. Кузьмин – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – 92 с.
9. Хусаинов А.Ш., Никитин А.Н. Моделирование деформации краш-боксов современных автомобилей // Вестник УлГТУ, № 4, 2012. – С. 28-31
10. Abramowicz W., Jones N. Dynamic axial crushing of square tubes // Pergamon Press Ltd., 1984 – 30 p.

11. Abramowicz W., Wierzbicki T. Axial crushing of foam-filled columns // Pergamon Press, 1988 – 9 p.
12. Ghasemnejad H., Hadavinia H. Energy Absorption of Thin-walled Corrugated Crash Box in Axial Crushing // SDHM, №4, 2008 — p. 29-45
13. Harhash M., Kutz M. Trigger geometry influencing the failure modes in steel/polymer/steel sandwich crashboxes: Experimental and numerical evaluation // Composite Structures, №262, 2021- 19 p.
14. Jones N. Structural impact / Jones N. // Cambridge University Press, 2011 – 603 p.
15. Jones N., Wierzbicki T. Structural crashworthiness and failure // Elsevier applied science, 1993 – 522 p.
16. Kalshetti A.S., Patil S.V. Energy absorption of varying thickness rectangular section crash box for quasi-static axial loading // International Engineering Research Journal — p. 387-391
17. Kumar M.V., Patil S.V. Design and crash analysis of automotive crush box // International Journal on Recent Technologies in Mechanical and Electrical Engineering, 2017 — p. 35-41
18. Liu Y., Ding L. A study of using different crash box types in automobile frontal collision // School of Civil Engineering - 5 p.
19. Osgood W.R., Ramberg W. Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters / NACA Technical Note 902, National Bureau of Standards, Washington DC, 1943. — 29 p.
20. Toksoy A.K. Optimization of the axial crushing behavior of closed-cell aluminum foam filled welded 1050 al squarecross section crash boxes // Izmir, 2009 – 232 p.
21. Yusof N.S.B., Sapuan S.M. Design and materials development of automotive crash box: a review // Portuguese Society of Materials, 2017 – 16 p.