

Министерство науки и высшего образования 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

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА**

**Применение конечно-элементного моделирования для оценки прочности и механического поведения металлической уличной осветительной мачты**

по направлению подготовки

01.03.03 «Механика и математическое моделирование»

Направленность

01.03.03\_02 «Биомеханика и медицинская инженерия»

Выполнил

Студент гр. 5030103/00201

Ю.Н. Гришина

Руководитель

Доцент ВШТМиМФ, к.ф.-м.н.

А.А. Чеврычкина

Консультант

Старший научный сотрудник Инжинирингового центра

«Центр компьютерного инжиниринга»

М.А. Жмайло

Санкт-Петербург

2024

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО**  
**Физико-механический институт**  
**Высшая школа теоретической механики и математической физики**

УТВЕРЖДАЮ

Директор ВШТМиМФ

А. М. Кривцов

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

студенту Гришиной Юлии Николаевне, гр. 5030103/00201

1. Тема работы: Применение конечно-элементного моделирования для оценки прочности и механического поведения металлической уличной осветительной мачты
2. Срок сдачи студентом законченной работы: 10.06.2024
3. Исходные данные по работе: международные стандарты BS EN 00040, геометрия осветительной мачты, чертежи светильника, справочная литература, публикации и исследования по теме работы.
4. Содержание работы (перечень подлежащих разработке вопросов): анализ стандартов и выполнение работы в соответствии с ними, создание трехмерной конечно-элементной модели осветительной стальной уличной мачты с двумя светильниками, выполнение расчета напряженно-деформированного состояния конструкции под действием статических и ветровых нагрузок, определение полей НДС мачты и оценка прочности конструкции, проведение испытания со столкновением легкового автомобиля и мачты и проверка пассивной безопасности мачты.
5. Перечень графического материала (с указанием обязательных чертежей): не предусмотрено.
6. Консультанты по работе: Жмайло М. А. – старший научный сотрудник Инжинирингового центра «Центр компьютерного инжиниринга»
7. Дата выдачи задания 28.02.2024

Руководитель ВКР

Чеврычкина А. А. – доцент ВШТМиМФ, к.ф.-м.н.

Задание принял к исполнению 28.02.2024

Студент

Гришина Ю. Н.

## **РЕФЕРАТ**

На 54 с., 45 рисунков, 2 таблицы.

**ОСВЕТИТЕЛЬНАЯ МАЧТА, НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ, МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ANSYS, ПРОЧНОСТЬ, ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ, ПАССИВНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

В данной работе по международному стандарту были проведены цифровые испытания стальной уличной осветительной мачты с двумя светильниками HE12T120, расположенной в сельской местности. С помощью программного пакета ANSYS Workbench выполнены расчет напряженно-деформированного состояния конструкции, проверка ее на прочность, оптимизация конструкции путем уменьшения максимального напряжения, а также была проверена пассивная безопасность мачты путем испытания столкновения легкового автомобиля с ней.

## **THE ABSTRACT**

54 pages, 45 pictures, 2 tables.

**LIGHTING COLUMNS, STRESS-STRAIN STATE, FINITE ELEMENT METHOD, ANSYS, STRENGTH, OPTIMIZING STRUCTURE, PASSIVE SAFETY**

In this paper, digital tests of a steel street lighting columns with two luminaires HE12T120 located in a rural area were carried out according to the international standard. Using the ANSYS Workbench software package, the stress-strain state of the structure was calculated, its strength was tested, the structure was optimized by reducing the maximum stress, and the passive safety of the column was tested by testing the collision of a passenger car with it.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
ГЛАВА 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ МАЧТЫ И ОСОБЕННОСТИ ЕЕ УСТАНОВКИ .....	7
1.1. Сфера применения и требования к мачтам освещения .....	7
1.2. Классификация осветительных мачт .....	8
ГЛАВА 2. МОДЕЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ .....	11
2.1. Задача о консольной балке с распределенной нагрузкой .....	11
2.2. Задача о консольной балке с сосредоточенной силой .....	15
ГЛАВА 3. ПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЕТ ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ МАЧТЫ .....	20
3.1. Постановка задачи .....	20
3.2. Решение .....	20
3.2.1. Построение геометрии .....	20
3.2.1.1. Геометрия для статических нагрузок .....	22
3.2.1.2. Геометрия для ветровых нагрузок .....	23
3.2.2. Материалы .....	24
3.2.3. Конечно-элементная сетка .....	24
3.2.4. Граничные условия и расчет нагрузок .....	25
3.2.5. Результаты .....	29
3.3. Внесение изменений в мачту для уменьшения напряжения .....	34
3.4. Сеточная сходимость .....	38
ГЛАВА 4. ПАССИВНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ МАЧТЫ .....	40
4.1. Постановка задачи .....	40
4.2. Геометрия испытания .....	41
4.3. Материалы .....	43
4.4. Конечно-элементная сетка, контакты и граничные условия .....	44
4.5. Результаты .....	45
4.6. Анализ результатов и критерии безопасности .....	49
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	56
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	57

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из сфер жизни города, где происходит значительный прогресс, является наружное освещение. Это связано с развитием инфраструктуры города и изменением критериев качества жизни горожан. Искусственное освещение становится все более актуальным в системе жизнеобеспечения современного города. Уличное движение водителей и пешеходов в темное время суток осуществляется искусственным освещением с целью создания видимости объектов на определенной территории пространства. Искусственное освещение крепко вошло в показатели качества жизни города и с течением времени требуется усовершенствование. Появились и были применены новые типы ламп накаливания, разновидности газоразрядных источников света с флуоресцентным и без него свечением, светильники сложного типа. Модернизация освещения проводится в соответствии с оценкой эксплуатационной надежности.

Большие территории не могут освещаться без специальных мачт с установленной на большой высоте над землей световой аппаратурой. По мере того, чем выше источники света, тем больше освещаемая ими площадь, поэтому одна или несколько мачт являются основным решением для системного размещения светового оборудования, высокого по мощности. Как правило, такие осветительные мачты изготавливаются и устанавливаются по определенным стандартам. Оценка эксплуатационной надежности мачты может основываться на исследованиях напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции под действием статических и ветровых нагрузок. Из-за высокой сложности процессов, связанных со сложной геометрией модели, а также с учетом многих внешних факторов в современности для таких расчетов используют численные методы с программами на основе метода конечных элементов (МКЭ). МКЭ является одним из самых распространенных методов математического моделирования

для определения НДС не только механических сооружений, но и для других сложных трехмерных систем.

Настоящая работа посвящена проведению цифровых испытаний стальной уличной осветительной мачты с двумя светильниками, расположенной в сельской местности, по международным стандартам. Актуальность работы заключается в замене натуральных испытаний на цифровые, так как на этапе разработке конструкции неизвестно, каким получится результат. Поэтому испытания в цифровом виде дешевле проводить, чем изготавливать прототипы и проводить натурные испытания. Целью данной работы является определение полей напряжений и перемещений, возникающих в мачте, определение прочности конструкции под действием различных нагрузок, а также проверка пассивной безопасности мачты при столкновении автомобиля с ней. Исходя из поставленной цели, решаются такие задачи как построение САД-модели столба мачты и светильников, построение конечно-элементной модели, определение граничных условий, подключение модели автомобиля, расчёт механических задач и анализ полученных результатов. Получившееся решение этих задач позволит получить информацию о прочности осветительной мачты и о ее пассивной безопасности.

# ГЛАВА 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ МАЧТЫ И ОСОБЕННОСТИ ЕЕ УСТАНОВКИ

## 1.1. Сфера применения и требования к мачтам освещения

Конструкции выше 10 м, на которых устанавливается осветительная аппаратура, называются мачтами (рисунок 1). Они применяются на больших территориях, где необходимо обеспечить видимость объектов:

- в городской инфраструктуре: на улицах, автомобильных дорогах, парках, площадях и т. д.;
- на спортивных сооружениях, например стадионах – в темное время суток;
- на промышленных объектах – для безопасности сотрудников;
- в портах/аэропортах/вокзалах – для освещения пирсов/взлетно-посадочных полос/ж/д путей.



Рисунок 1. Осветительная мачта

В данной задаче рассматривается установка мачты для освещения уличного движения.

Безопасность людей – главный критерий, по которому разрабатываются технические требования к установке мачт освещения. Они прописаны в рассматриваемом международном стандарте BS EN 00040. В настоящей задаче в рамках оценки эксплуатационной надежности проводятся испытания только на прочность мачты, но при установке мачты в реальности необходимо учитывать следующие требования [16]:

- материал должен быть устойчив к воздействию ветра, осадков, коррозии;
- осветительная аппаратура должна быть установлена на мачтовой короне с учетом норм освещенности выделяемой территории, а также должен быть обеспечен равномерный световой фон;
- должно быть обеспечено надежное крепление оборудования;
- столбы мачт должны иметь защиту от электрических перегрузок;
- минимальная температура эксплуатации – минус 55°;
- мачта должна быть сейсмоустойчивой (до 6 баллов);
- установка осветительной мачты выполняется только в однородном непросадочном грунте.

## **1.2. Классификация осветительных мачт**

Осветительные конструкции принято классифицировать по типу короны (рамы крепления источника света), форме, назначению и материалу [16].

По типу короны:

- мобильные – можно снимать и демонтировать, устанавливаются там, где требуется временное освещение, например, при строительных работах или авариях;

- стационарные – устанавливаются без возможности снятия, выдерживают большой вес светового оборудования.

По форме:

- конические;
- флажковые.

По назначению:

- уличные;
- спортивные;
- промышленные;
- транспортные;
- ландшафтно-архитектурные;
- рекламные.

По материалу:

- стальные – высокая прочность и долговечность (до 50 лет), устойчивость к перепадам температур и коррозии, возможность монтажа на любом типе грунта, большой вес;
- алюминиевые – легкость, прочность, устойчивость к коррозии и осадкам, простота монтажа и транспортировки, меньший срок службы (до 25 лет);
- композитные (стекловолокно или углеволокно) – высокая прочность на растяжение/изгиб, малый вес, устойчивы к кислотам и щелочам, не проводят электрический ток (безопасны вблизи линий электропередач), не притягиваются к магнитам.

В предстоящей задаче рассматривается мобильная коническая [6] уличная стальная осветительная мачта [7] высокого энергопоглощения с двумя светильниками HE12T120 массой 132 кг и высотой 12 м [17]. Модель мачты представлена на рисунке 2.



Рисунок 2. Осветительная мачта HE12T120

Подводя итоги, можно сделать выводы:

- Осветительные мачты нужны для освещения больших территорий;
- Существует несколько разновидностей осветительных конструкций, классифицируемых в зависимости от материала, формы, назначения и типа короны;
- Монтаж мачт осуществляется поэтапно с соблюдением стандартов.

## ГЛАВА 2. МОДЕЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ

Численное решение задачи прочности осветительной мачты требует достаточной вычислительной мощности компьютера, чтобы результаты получились корректными. Моделирование проводится в программной системе для инженерного анализа Ansys Workbench [1], которая основывается на методе конечных элементов (МКЭ) – численном методе решения дифференциальных уравнений в частных производных.

Основная идея метода конечных элементов состоит в том, что любую непрерывную величину можно аппроксимировать дискретной моделью, состоящей из отдельных элементов (участков). На каждом из этих элементов исследуемая непрерывная величина аппроксимируется кусочно-непрерывной функцией, которая строится на значениях исследуемой непрерывной величины в конечном числе точек рассматриваемого элемента [5].

Перед решением основной задачи необходимо решить несколько модельных задач для того, чтобы убедиться, что применяемая далее методология корректна. Рассматриваются задачи консольных балок с распределенной нагрузкой и сосредоточенной силой. Необходимо найти перемещения свободного конца балки и сравнить результаты аналитического решения и численного моделирования.

### 2.1. Задача о консольной балке с распределенной нагрузкой

Рассматривается задача, близкая к основной задаче прочности конструкции мачты, о консольной балке (с одного конца закрепленной жесткой заделкой и с другим свободным концом). Схема балки представлена на рисунке 3. Распределенная нагрузка прикладывается ко всей балке. Данные для расчета:  $p = 200$  Па – ветровое давление,  $l = 12$  м – длина балки,  $D = 0,2$  м – диаметр балки,  $q = p\pi D = 40\pi \frac{\text{Н}}{\text{м}}$  – распределенная нагрузка,  $s = 0,003$  м – толщина сечения балки.

Вывод уравнений прогиба и угла поворота свободного конца балки [4]:

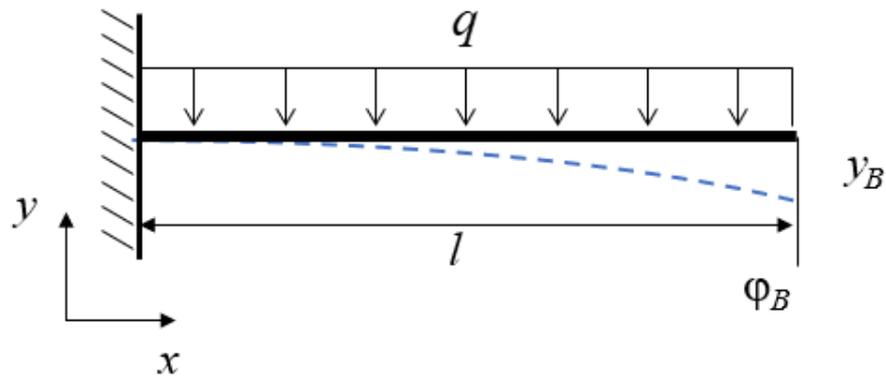


Рисунок 3. Консольная балка с распределенной нагрузкой

Для удобства выбирается направление обхода справа налево.

Дифференциальное уравнение упругой линии балки:

$$EI_z y'' = M_z = -q \frac{x^2}{2}.$$

Интегрируя, получается уравнение для угла поворота:

$$EI_z y' = -q \frac{x^3}{6} + C.$$

Интегрируя второй раз, получается уравнение для прогиба:

$$EI_z y = -q \frac{x^4}{24} + Cx + D.$$

Граничные условия для заделки имеют вид:

$$y(l) = 0;$$

$$y'(l) = 0.$$

Подставляя уравнения для угла поворота и прогиба в граничные условия, можно рассчитать константы интегрирования:

$$C = q \frac{l^3}{6}, D = -q \frac{l^4}{8}.$$

Таким образом, уравнения для угла поворота и прогиба:

$$y' = -\frac{q}{EI_z} \left( \frac{x^3}{6} - \frac{l^3}{6} \right);$$

$$y = -\frac{q}{EI_z} \left( \frac{x^4}{24} - \frac{l^3}{6} x + \frac{l^4}{8} \right).$$

В точке B уравнения примут вид:

$$y'_B = -q \frac{l^3}{6EI_z};$$

$$y_B = -q \frac{l^4}{8EI_z}.$$

Рассматривается сечение тонкостенной балки (рисунок 4).

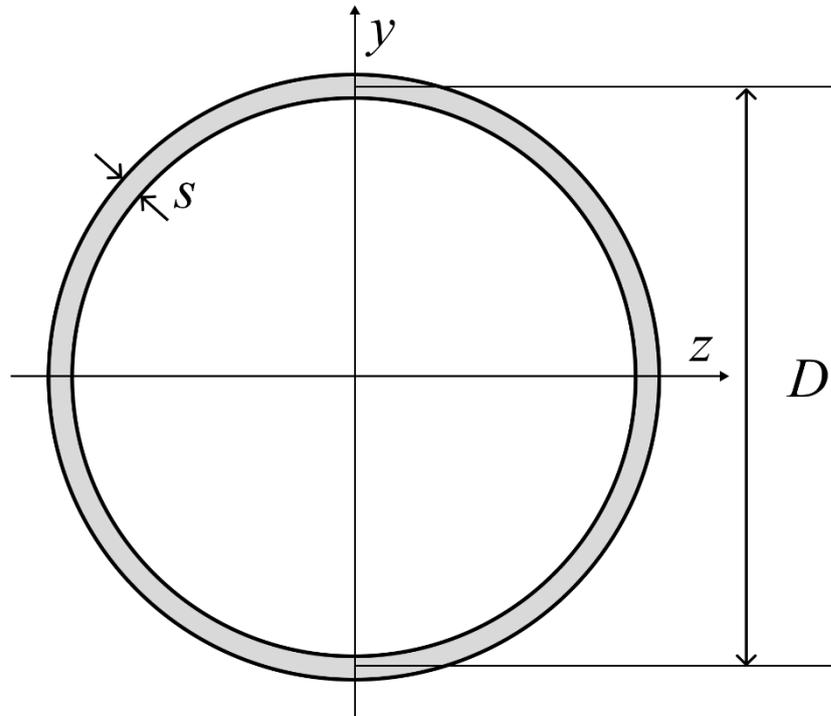


Рисунок 4. Сечение балки

Осевой момент инерции:

$$I_z = \frac{\pi D^3 s}{8} = 3 \cdot 10^{-6} \pi \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Максимальный прогиб:

$$y_B = -q \frac{l^4}{8EI_z} = -0,1728 \text{ м}; |y_B| = 172,8 \text{ мм}.$$

Необходимо сравнить перемещение свободного конца балки, полученного в результате аналитического решения, с максимальным перемещением свободного конца стальной балки при анализе результатов в Ansys Mechanical – Static Structural. Для поиска оптимального результата используются твердотельная, оболочечная и балочная модели трубы.

Твердотельная и оболочечная модель строятся в SpaceClaim, балочная – в DesignModeller. Модели представлены на рисунках 5-7.



Рисунок 5. Твердотельная модель



Рисунок 6. Оболочечная модель



Рисунок 7. Балочная модель

Задаются материал (сталь), толщина в 3 мм для оболочечной модели, сетка (размер – элемент на 3 толщины, более мелкое разбиение в случае твердотельной и оболочечной модели Ansys выполнить не может) и граничные условия и нагрузки (Fixed Support на левый конец балки, Pressure для оболочечной и твердотельной модели в 200 Па, для балочной – Line Pressure в  $40\pi \frac{\text{Н}}{\text{м}}$  на всю длину балки).

Поля перемещений для случая с распределенной нагрузкой для каждой модели представлены на рисунках 8-10.

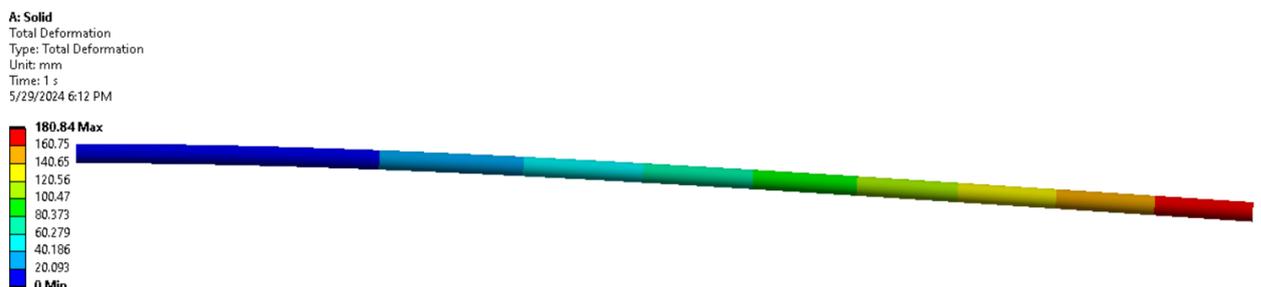


Рисунок 8. Поле перемещений твердотельной модели при распределенной нагрузке, мм

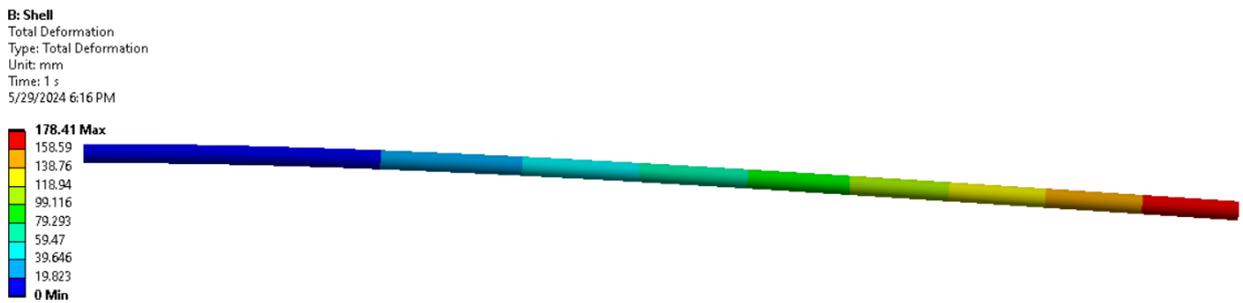


Рисунок 9. Поле перемещений оболочечной модели при распределенной нагрузке, мм

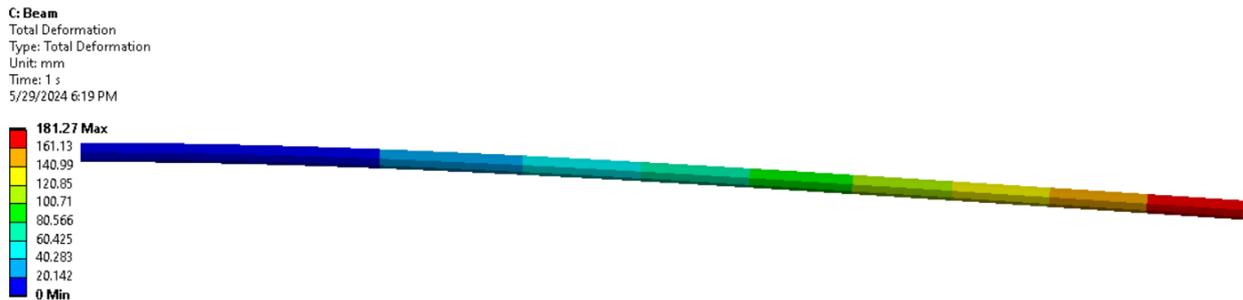


Рисунок 10. Поле перемещений балочной модели при распределенной нагрузке, мм

Таким образом, перемещения свободного конца балки для твердотельной, оболочечной и балочной модели соответственно равны по модулю 180,84 мм, 178,41 мм и 181,27 мм. Следовательно, сравнивая результаты с аналитическим решением ( $|y_B| = 172,8$  мм), можно сказать, что результаты приблизительно совпадают для всех моделей. Но перемещение свободного конца оболочечной модели наиболее близко к аналитическому результату, из чего можно сделать вывод, что выбор оболочечной модели при расчете балочных конструкций выглядит как оптимальное решение.

## 2.2. Задача о консольной балке с сосредоточенной силой

Также для полного отображения корректности конечно-элементного решателя рассматривается задача о консольной балке с сосредоточенной силой. Схема балки представлена на рисунке 11. Данные для расчета:  $m = 100$  кг,  $F = mg = 981$  Н,  $l = 12$  м,  $D = 0,2$  м,  $s = 0,003$  м.

Вывод уравнений прогиба и угла поворота свободного конца балки [4]:

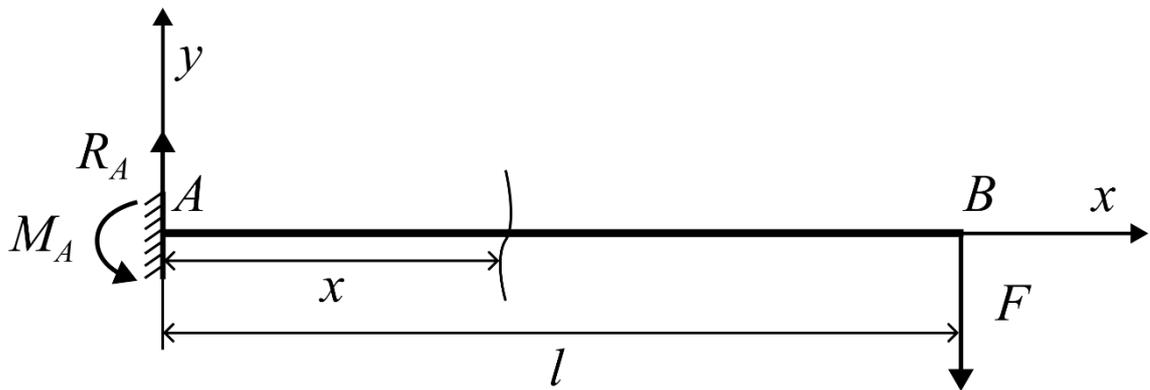


Рисунок 11. Консольная балка с сосредоточенной силой

Условия равновесия и нахождение опорных реакций:

$$\begin{aligned}\sum F_x &= 0; \\ \sum F_y &= 0: R_A - F = 0; \\ R_A &= F; \\ \sum M_{z(A)} &= 0: M_A - Fl = 0; \\ M_A &= Fl.\end{aligned}$$

Изгибающий момент в сечении  $x$ :

$$M_z(x) = -M_A + R_A x = -F(l - x).$$

Дифференциальное уравнение упругой линии балки:

$$EI_z y'' = M_z = F(x - l).$$

Интегрируя, получается уравнение для угла поворота:

$$EI_z y' = F \left( \frac{x^2}{2} - lx \right) + C.$$

Интегрируя второй раз, получается уравнение для прогиба:

$$EI_z y = F \left( \frac{x^3}{6} - \frac{lx^2}{2} \right) + Cx + D.$$

Граничные условия для заделки имеют вид:

$$\begin{aligned}y(0) &= 0; \\ y'(0) &= 0.\end{aligned}$$

Подставляя уравнения угла поворота и прогиба в граничные условия, можно рассчитать константы интегрирования:

$$C = 0, D = 0.$$

Таким образом, уравнения для угла поворота и прогиба:

$$y' = \frac{F}{EI_z} \left( \frac{x^2}{2} - lx \right);$$

$$y = \frac{F}{EI_z} \left( \frac{x^3}{6} - \frac{lx^2}{2} \right).$$

В точке  $B$  уравнения примут вид:

$$y'(l) = -\frac{Fl^2}{2EI_z};$$

$$y(l) = -\frac{Fl^3}{3EI_z}.$$

Рассматривается аналогичное сечение тонкостенной балки:

Осевой момент инерции:

$$I_z = \frac{\pi D^3 S}{8} = 3 \cdot 10^{-6} \pi \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Максимальный прогиб:

$$y(l) = -\frac{Fl^3}{3EI_z} = -0,3 \text{ м}; |y_B| = 300 \text{ м}.$$

Аналогично случаю с распределенной нагрузкой необходимо сравнить максимальное перемещение свободного конца стальной балки, полученное при аналитическом и численных решениях. Также рассматриваются твердотельная, оболочечная и балочная модели.

Постановка задачи практически не отличается. Меняется только нагрузка с распределенной на сосредоточенную. Так как силу можно приложить только к точке, для твердотельной и оболочечной модели применяется инструмент Remote Force, заданный в серединной точке сечения

трубы на свободном конце. Для балочной модели соответственно применяется инструмент Force, приложенный к свободному концу балки.

Поля перемещений для случая с сосредоточенной силой для каждой модели представлены на рисунках 12-14.

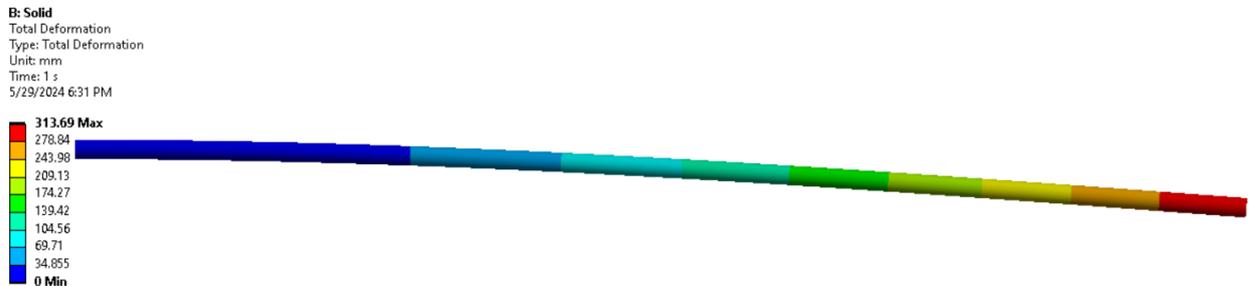


Рисунок 12. Поле перемещений твердотельной модели при сосредоточенной силе, мм

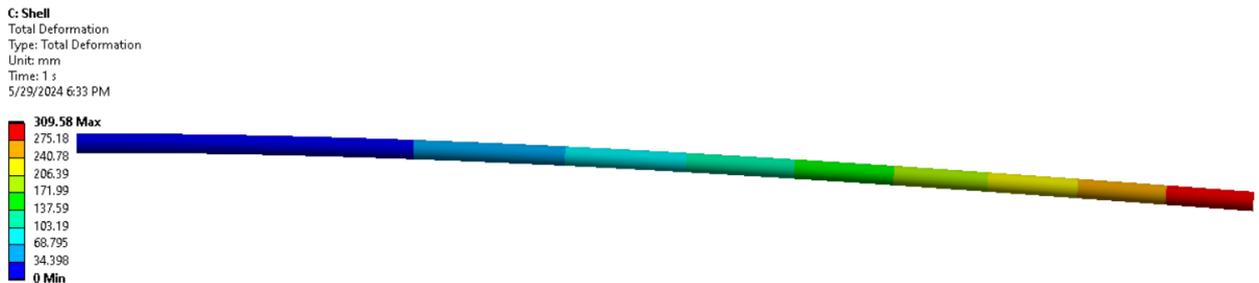


Рисунок 13. Поле перемещений оболочечной модели при сосредоточенной силе, мм

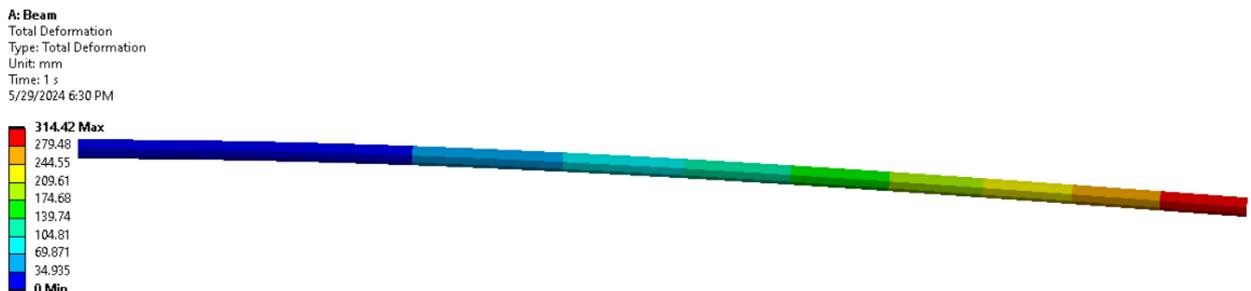


Рисунок 14. Поле перемещений балочной модели при сосредоточенной силе, мм

Таким образом, перемещения свободного конца балки для твердотельной, оболочечной и балочной модели соответственно равны по модулю 313,69 мм, 309,58 мм и 314,42 мм. Следовательно, сравнивая результаты с аналитическим решением ( $|y_B| = 300$  мм), можно сказать, что результаты приблизительно совпадают для всех моделей. Такая особенность замечена и в случае с распределенной нагрузкой, значит, можно сделать

вывод о том, что конечно-элементные решатели дают достаточно близкие к аналитическим решения. Также и в этом сценарии нагружения можно заметить, что оболочечная модель дает более близкий к теоретическому результат. Поэтому при рассмотрении осветительной мачты оптимально будет взять ее модель в формате оболочки и задать ей впоследствии необходимую толщину.

## **ГЛАВА 3. ПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЕТ ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ МАЧТЫ**

### **3.1. Постановка задачи**

При проектировании и эксплуатации осветительных конструкций для проверки на прочность необходимо учитывать не только статические нагрузки, вызванные собственным весом опоры и светильников, но и воздействие ветровых нагрузок, которые могут повлиять на их устойчивость и надежность.

Испытание проводится в соответствии со стандартом BS EN 00040 [6,7,8,9]. Необходимо привести к расчетному виду модель самой осветительной мачты и светильников, прикрепленных к ней, в Ansys Static Structural [1]: приложить гравитацию к столбу и светильникам, а также ветровое давление к ним. С помощью конечно-элементного моделирования требуется провести расчет модели: получить напряжения и перемещения элементов мачты при статических и ветровых нагрузках, оценить результаты и сделать выводы о прочности конструкции по международным стандартам.

### **3.2. Решение**

#### **3.2.1. Построение геометрии**

На рисунке 15 представлена модель мачты одного из крупных иностранных производителей. Берется безопасная коническая мачта с высоким энергопоглощением HE12T120 массой 132 кг и высотой 12 м. Модель представлена в формате оболочки.

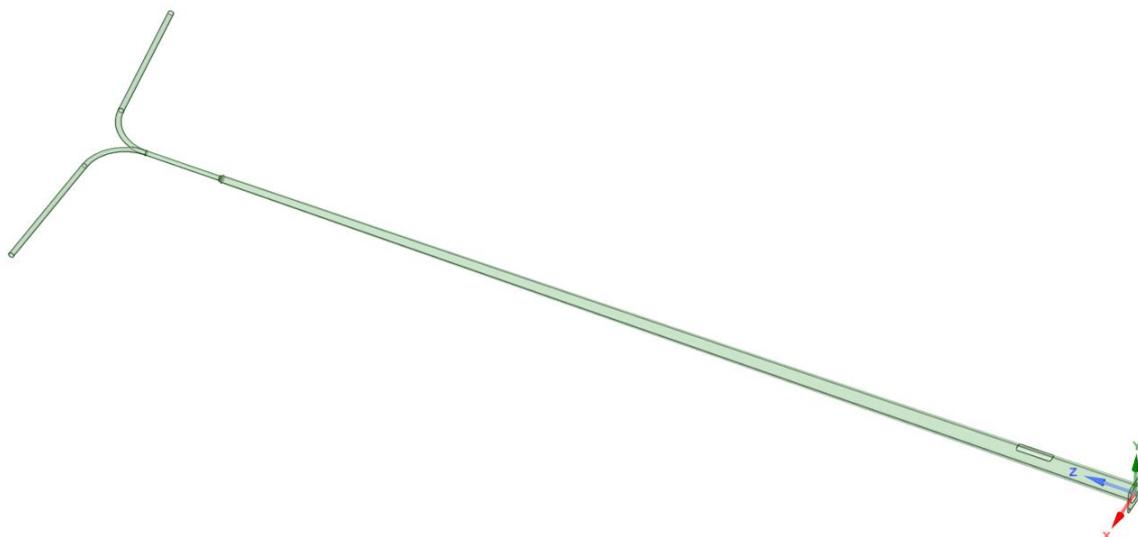
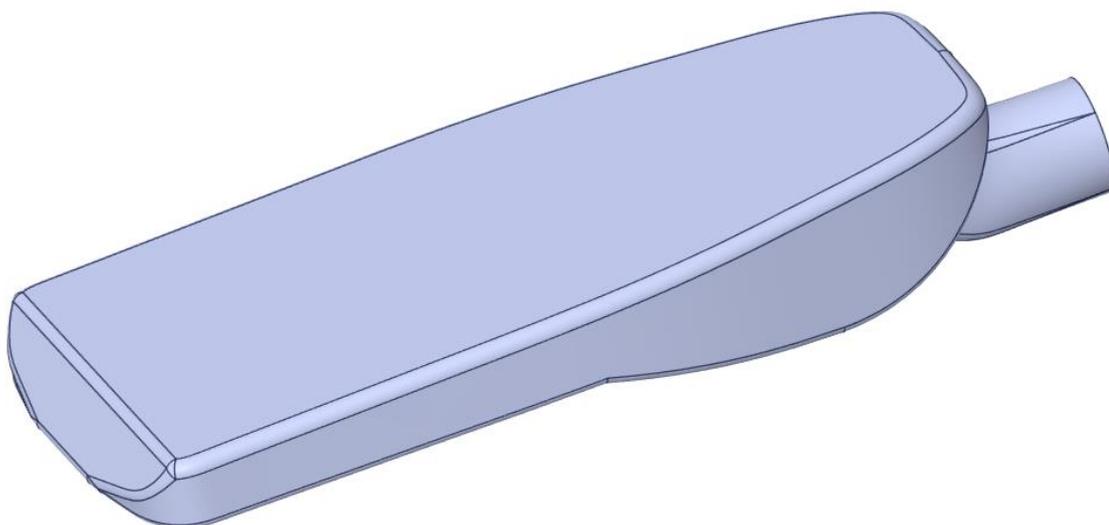


Рисунок 15. Геометрия столба

Модель светильника, показанная на рисунке 16, представляет собой уличный фонарь VEGA 3 Cobra 120W-180W, подобранный под столб данной высоты. 3D-модель светильника построена в программе SOLIDWORKS [2] по чертежам (рисунок 17), указанным на сайте производителя светильника [14].



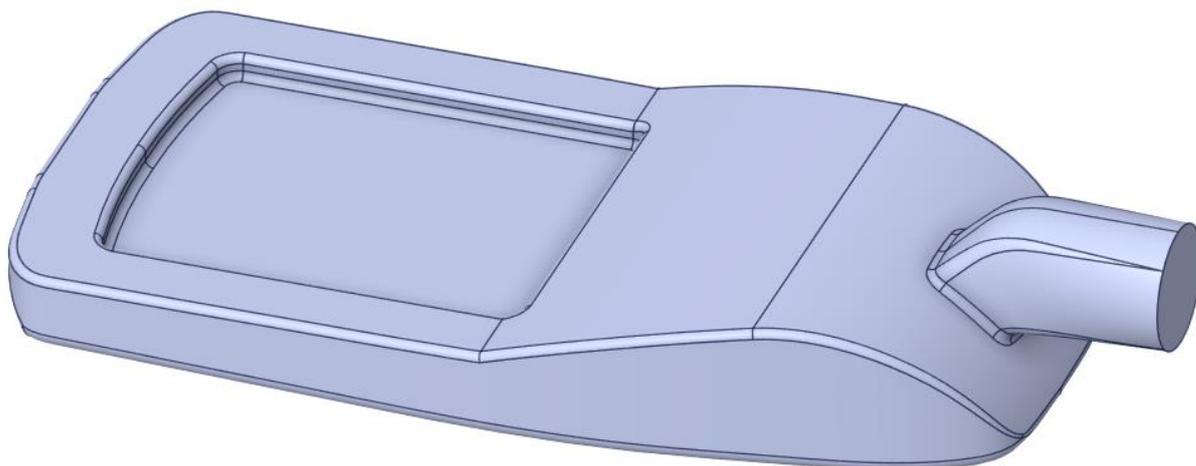


Рисунок 16. Геометрия светильника

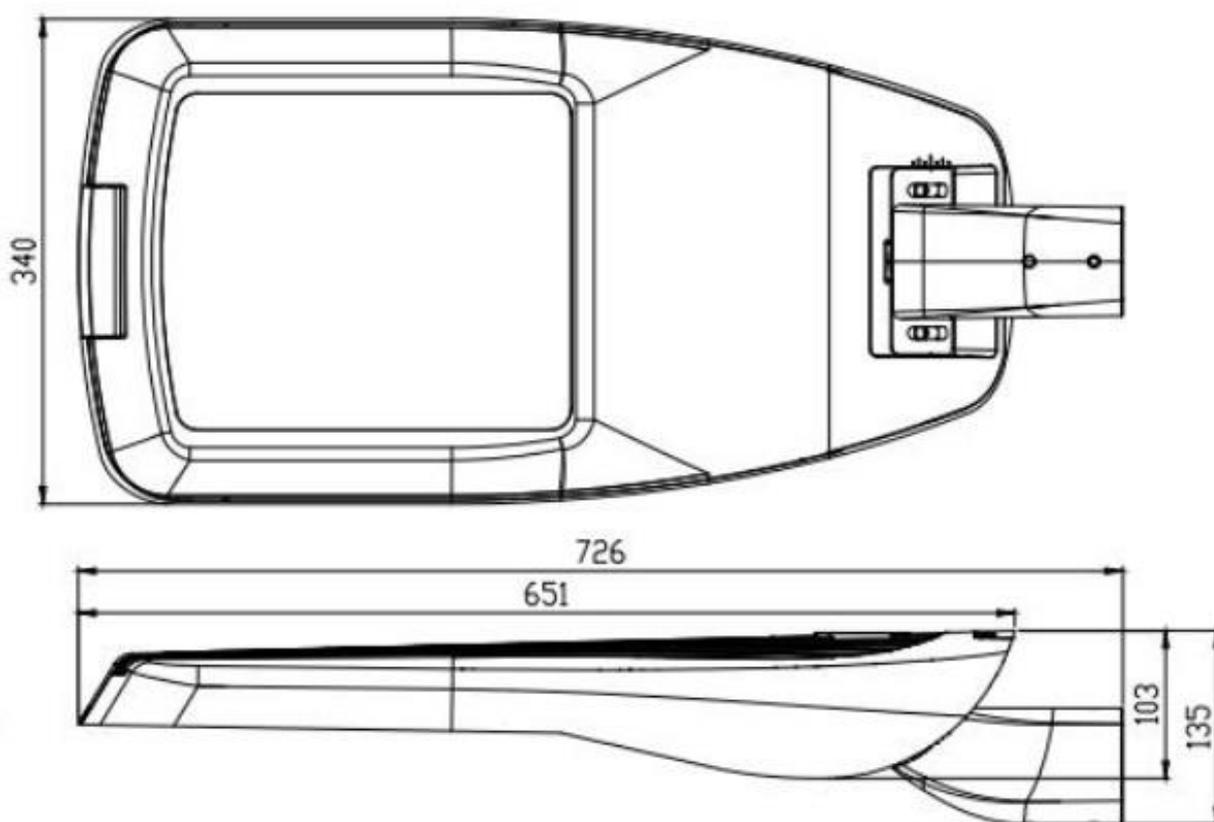


Рисунок 17. Чертежи светильника

### 3.2.1.1. Геометрия для статических нагрузок

В сборочную модель соединены столб и светильники, заданы толщины закрепляемого фланца - 10 мм, столба – 3 мм, двух разветвлений мачты – 2 мм (рисунок 18).

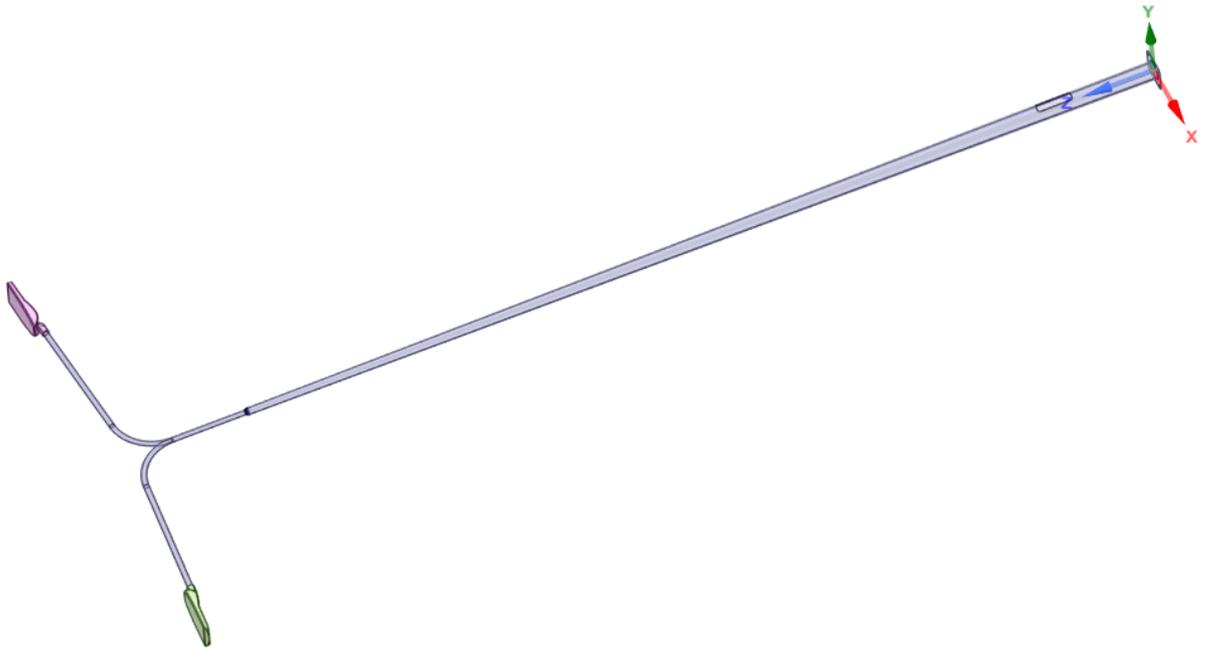


Рисунок 18. Геометрия мачты со светильниками для статических нагрузок

### 3.2.1.2. Геометрия для ветровых нагрузок

По стандарту для испытания с ветровыми нагрузками к мачте прикладывается ветровое давление  $q(z)$ , формула для которого будет представлена впоследствии. Ветровое давление является переменным по высоте, поэтому, чтобы его приложить на разных высотах, для упрощения расчета можно разбить сам металлический столб, например, на 20 уровней по высоте в Space Claim (рисунок 19), чтобы на каждом уровне прикладывать вычисленное определенное постоянное давление. Также применяется Share Topology для обоих сценариев нагружения, так как этот инструмент создает согласованную сетку и объединяет поверхности. Модель мачты для сценария с ветровыми нагрузками представлена на рисунке 19.

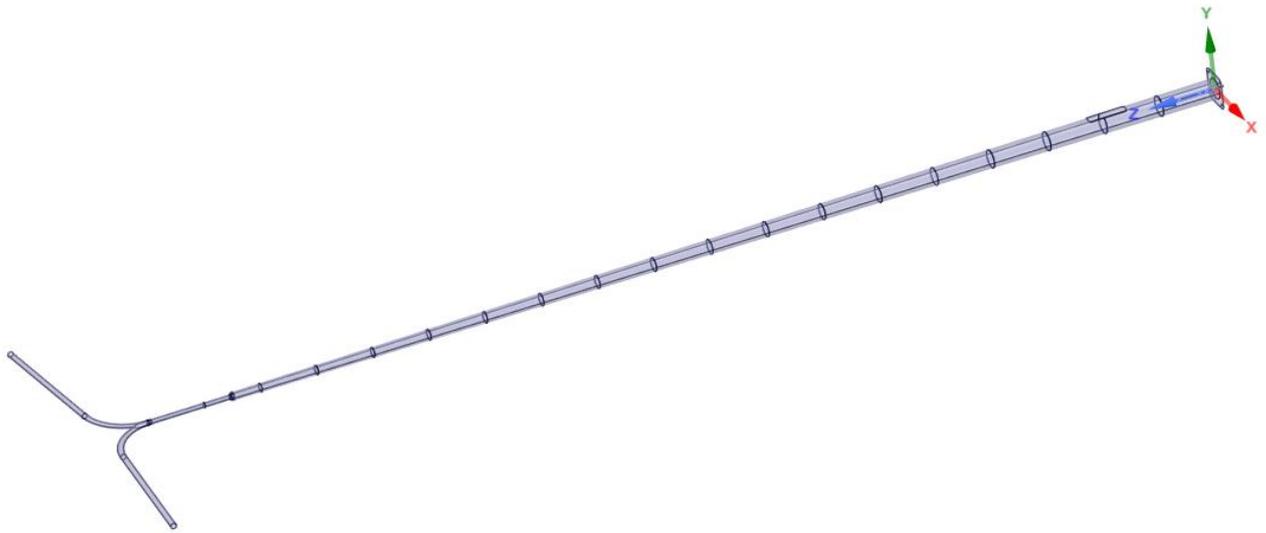


Рисунок 19. Геометрия мачты для ветровых нагрузок

### 3.2.2. Материалы

Мачта изготовлена из стали, по стандартам для стальных осветительных мачт известно [9], что в данной задаче представлена холоднодеформированная стальная труба по стандарту EN 10219 [10]. Такая сталь нелинейная, высокопрочная и ее предел текучести  $\sigma_T$  равен 355 МПа.

Светильники изготовлены из литого алюминия, но в расчетах берется их масса – 8 кг.

### 3.2.3. Конечно-элементная сетка

Так как прежде всего оценивается прочность стального столба осветительной мачты, то светильники могут учитываться не как целое тело, а как материальная точка (если генерировать сетку на столбе со светильником, она получится очень грубой и некачественной из-за формы светильника, что исказит корректность результатов). Поэтому при создании сетки светильники скрываются, а впоследствии для приложения нагрузок находятся их центры тяжести.

Для всего столба и фланца используется метод «Body Sizing» с размером элемента 10 мм, данный метод применяется для обоих сценариев нагружения. Конечно-элементная сетка представлена на рисунке 20.

Количество узлов – 59606, количество элементов – 59502.

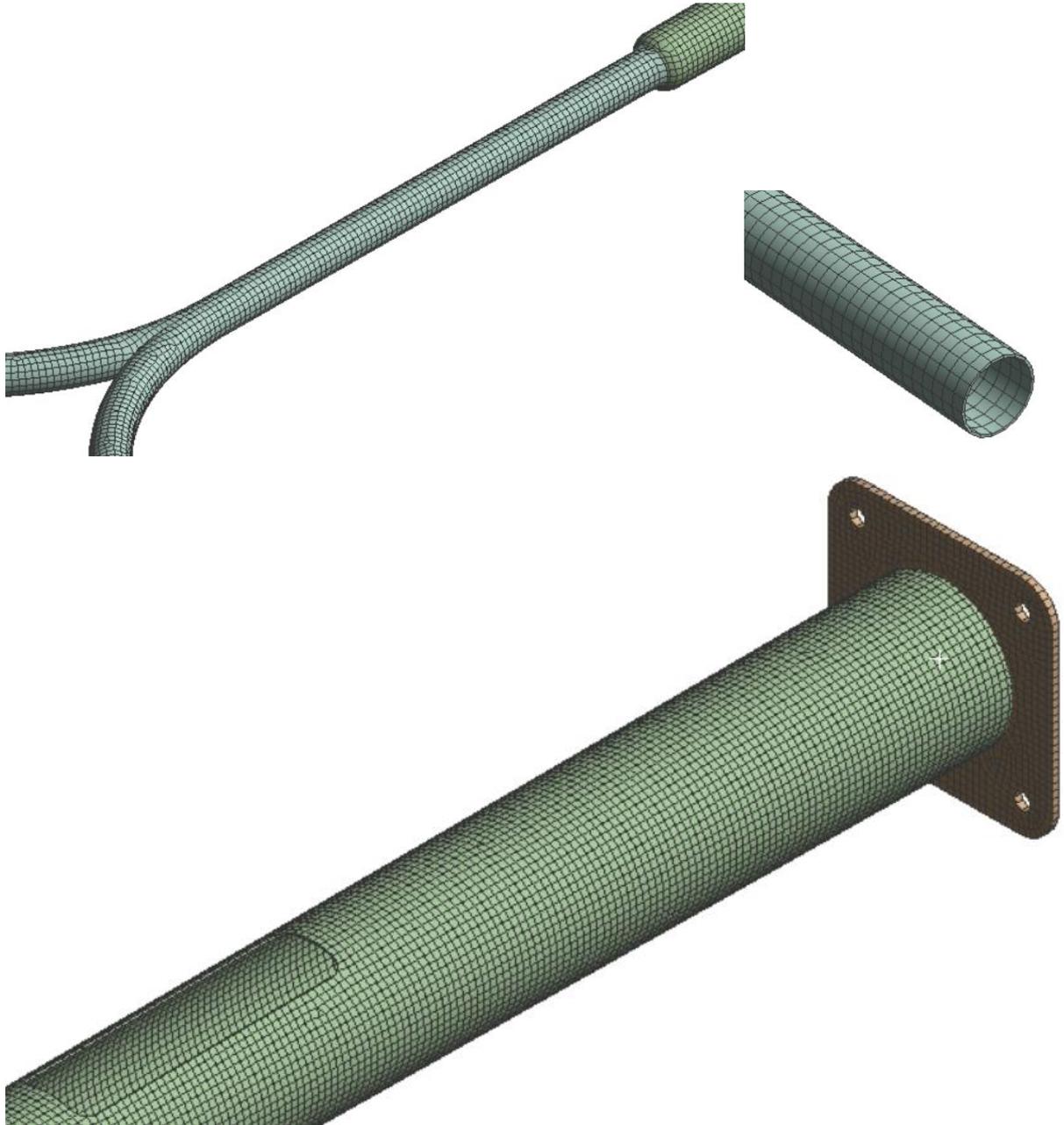


Рисунок 20. Конечно-элементная сетка на разных частях мачты

### 3.2.4. Граничные условия и расчет нагрузок

В обоих случаях ставится жесткая заделка «Fixed Support» на фланец. При расчете статических нагрузок прикладывается стандартная гравитация «Standard Earth Gravity» к столбу. В SOLIDWORKS [2] находятся центры масс светильников, которые являются точками приложения силы тяжести, на высоте мачты. Сила гравитации, прикладываемая к светильникам, определяется как:  $F = -mg = -8 \cdot 9,81 = -78,48 \text{ Н}$ . Эта сила прикладывается к центрам масс фонарей по

направлению оси  $z$  с помощью «Remote Force». Для статического испытания граничные условия и нагрузки [8] представлены на рисунке 21.

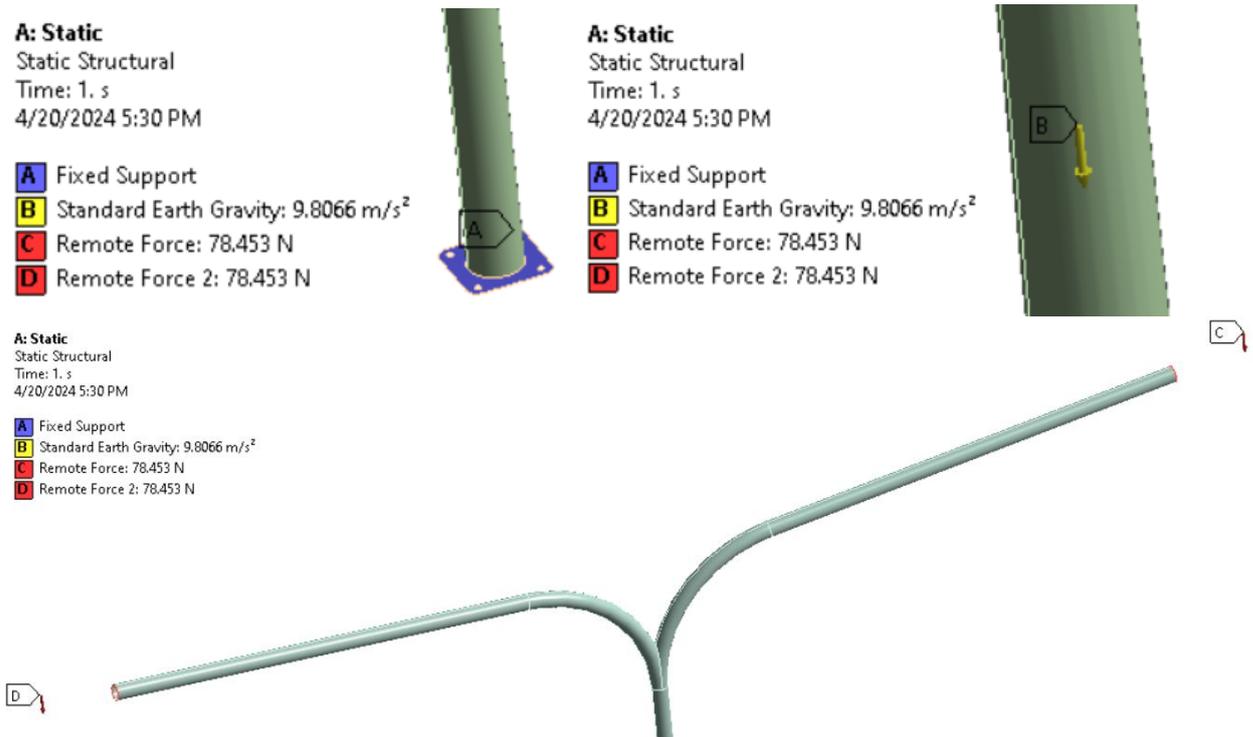


Рисунок 21. Граничные условия и нагрузки для статического испытания

Эти граничные условия и нагрузки также применяются и для испытания с ветровым давлением, так как в реальных условиях для любых сценариев нагружения необходимо учитывать гравитацию [8].

Теперь рассматривается переменное по высоте давление ветра. По стандартам оно рассчитывается по формуле:  $q(z) = \delta \cdot \beta \cdot f \cdot c_e(z) \cdot q(10)$ ,  $\delta$  – фактор, связанный с размером столба,  $\beta$  – фактор, зависящий от динамического поведения колонны,  $f$  – фактор, связанный с топографией,  $c_e(z)$  – коэффициент, зависящий от рельефа площадки и высоты  $z$  над землей,  $q(10)$  – эталонное давление ветра.

$$\delta = 1 - 0,01h = 1 - 0,01 \cdot 12 = 0,88, h - \text{высота столба}$$

$$\begin{aligned} \beta &= 1,00240 - 0,00500T^4 + 0,05144T^3 - 0,22793T^2 + 0,67262T = \\ &= 1,00240 - 0,00500 \cdot 2^4 + 0,05144 \cdot 2^3 - 0,22793 \cdot 2^2 + 0,67262 \cdot 2 = \\ &= 1,77, T - \text{основной период вибрации} \end{aligned}$$

$$f = 1$$

Коэффициенты  $c_e(z)$  для разных высот  $z$  над землей представлены в таблице 1. По умолчанию выбирается категория местности II (сельскохозяйственные земли с живой изгородью, редкими небольшими фермерскими постройками, домами или деревьями).

$$q(10) = 0,5 \cdot \rho \cdot (C_S)^2 \cdot V_{ref}^2,$$

$V_{ref} = C_{ALT} \cdot V_{ref,0} = 1 \cdot 21 = 21 \frac{м}{с}$  – средняя 10-минутная скорость ветра, выраженная через произведение базового значения эталонной скорости ветра и высотного коэффициента.

$$\rho = 1,25 \frac{кг}{м^3} \text{ – плотность воздуха}$$

$$C_S = \sqrt{0,92} \text{ – коэффициент преобразования}$$

$$q(10) = 0,5 \cdot 1,25 \cdot 0,92 \cdot 441 = 253,58 \frac{Н}{м^2}$$

$$q(z) = 394,98 c_e(z) \text{ – промежуточная формула для давления на высоте } z$$

Таблица 1. Коэффициент воздействия в зависимости от высоты  $z$

Высота над землей $z$ , м	Категория местности			
	I	II	III	IV
12	2,89	2,47	1,91	1,56
11	2,83	2,41	1,85	1,56
10	2,78	2,35	1,78	1,56
9	2,71	2,29	1,71	1,56
8	2,64	2,21	1,63	1,56
7	2,57	2,13	1,63	1,56
6	2,48	2,04	1,63	1,56
5	2,37	1,93	1,63	1,56
4	2,25	1,80	1,63	1,56
3	2,09	1,80	1,63	1,56
2	1,88	1,80	1,63	1,56
1	1,88	1,80	1,63	1,56

Для того, чтобы интегральное усилие приложилось корректно, необходимо приложить давление к участку 1, как к участку 2 (рисунок 22). Для этого нужно ввести коэффициент масштаба  $K(z) = \frac{S_1(z)}{S_2(z)}$ , где  $S_1(z)$  – площадь цилиндрического участка столба 1 на высоте  $z$ ,  $S_2(z)$  – площадь участка среднего сечения 2 на высоте  $z$ . Давление «Pressure» прикладывается против оси  $y$ . Площади аналогично рассчитываются для светильников на высоте 12 м.

Тогда итоговая формула для расчета ветрового давления на высоте  $z$  выглядит так:  $q(z) = -394,98c_e(z)K(z)$ .

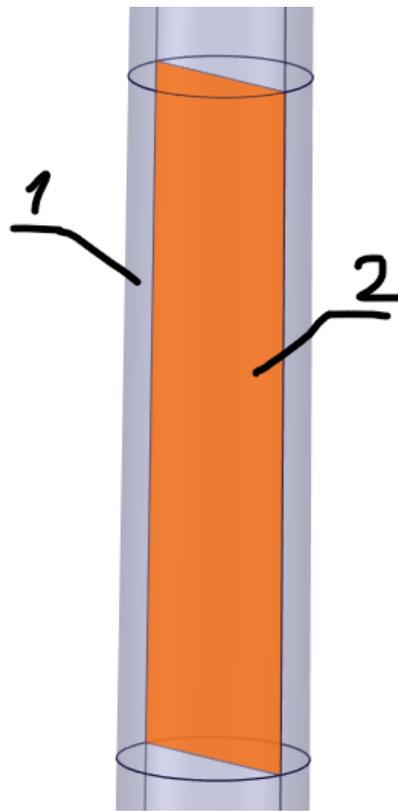


Рисунок 22. Участки 1 и 2 части столба

Граничные условия и нагрузки для ветрового испытания представлены на рисунке 23.

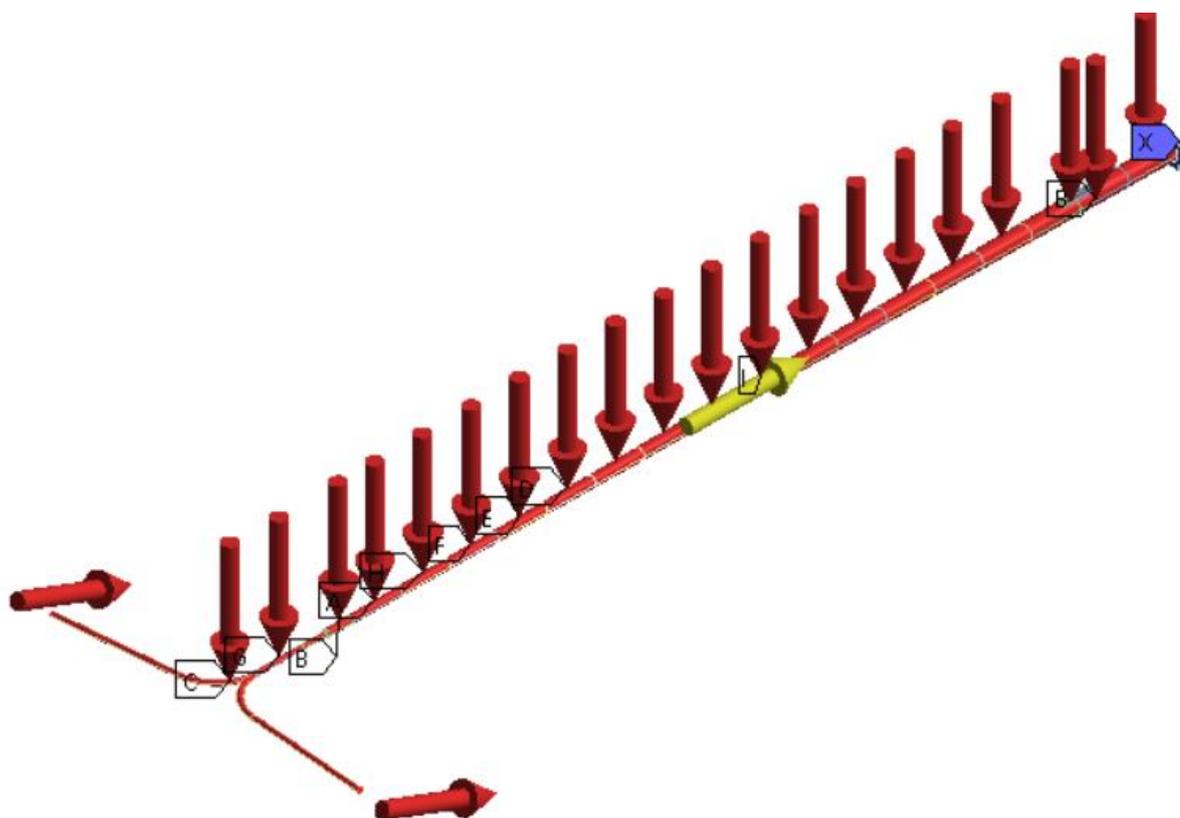


Рисунок 23. Граничные условия и нагрузки для ветрового испытания

### 3.2.5. Результаты

Найдены распределения перемещений мачты и эквивалентных напряжений по Мизесу в ней при статических нагрузках, представленные на рисунках 24 и 25, и аналогичные поля при ветровых нагрузках на рисунках 26 и 27.

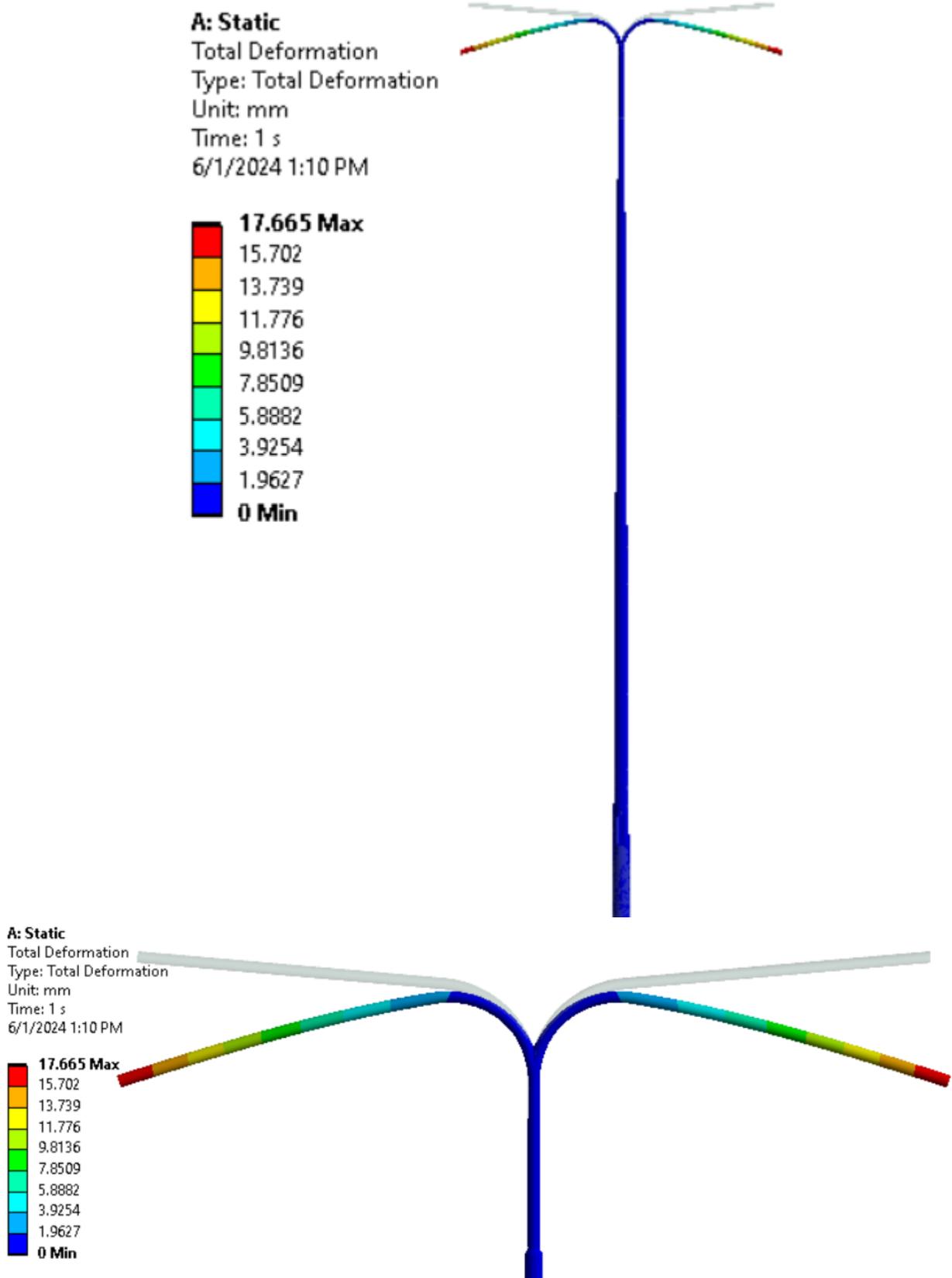


Рисунок 24. Распределение перемещений мачты для статического испытания, мм

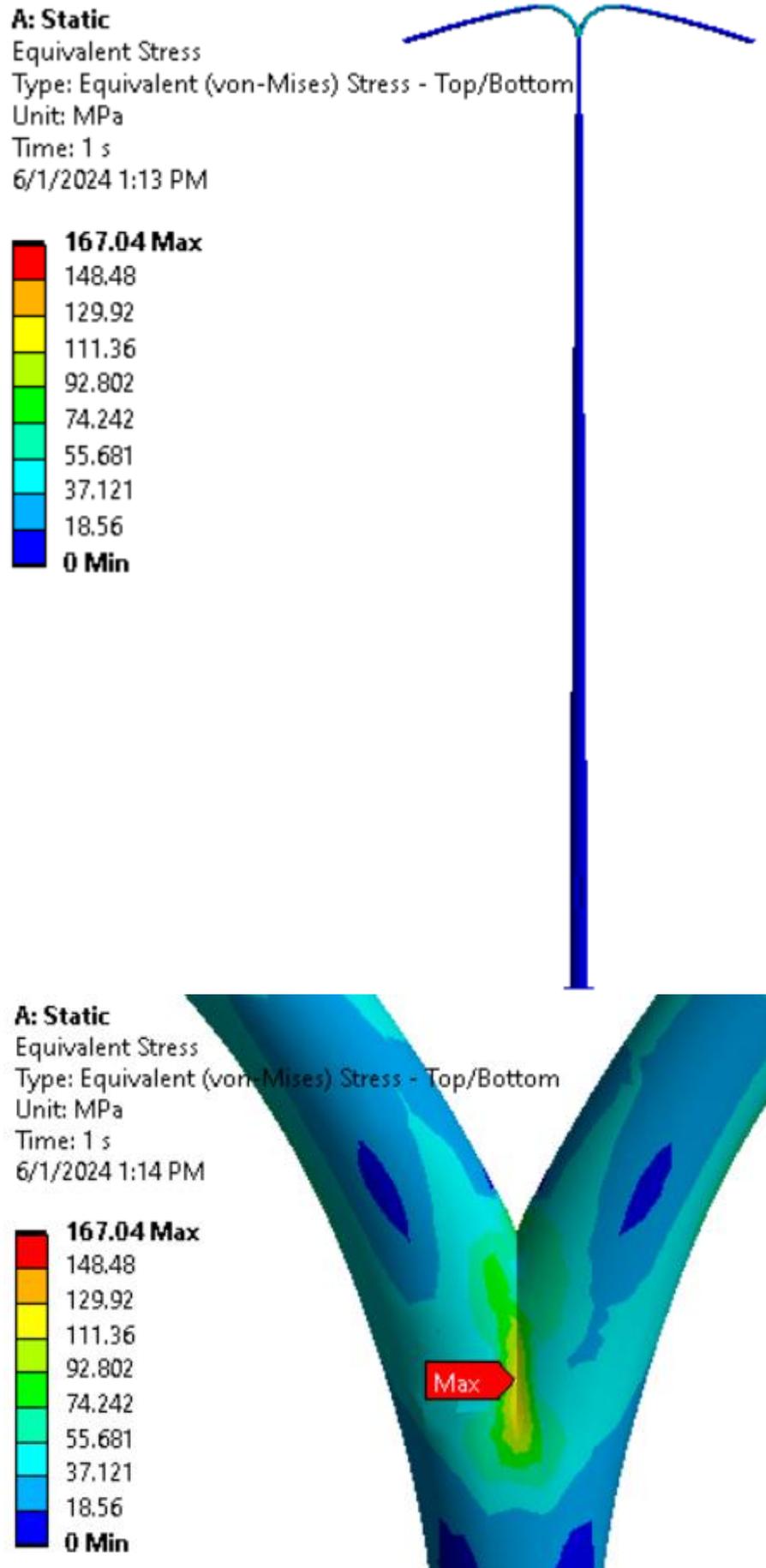


Рисунок 25. Распределение напряжений мачты для статического испытания, МПа

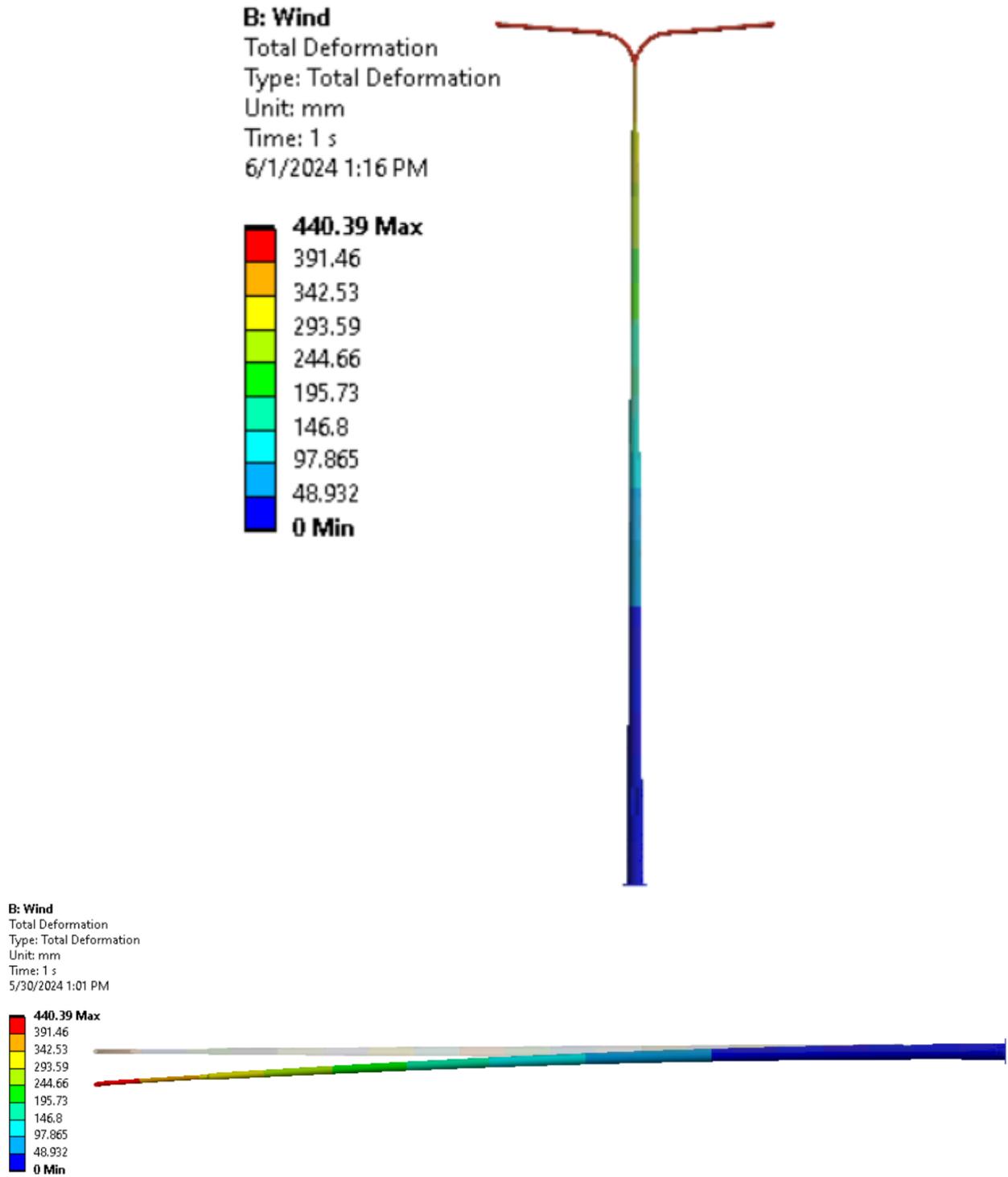
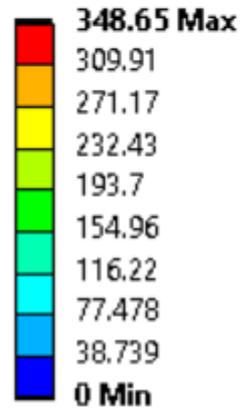
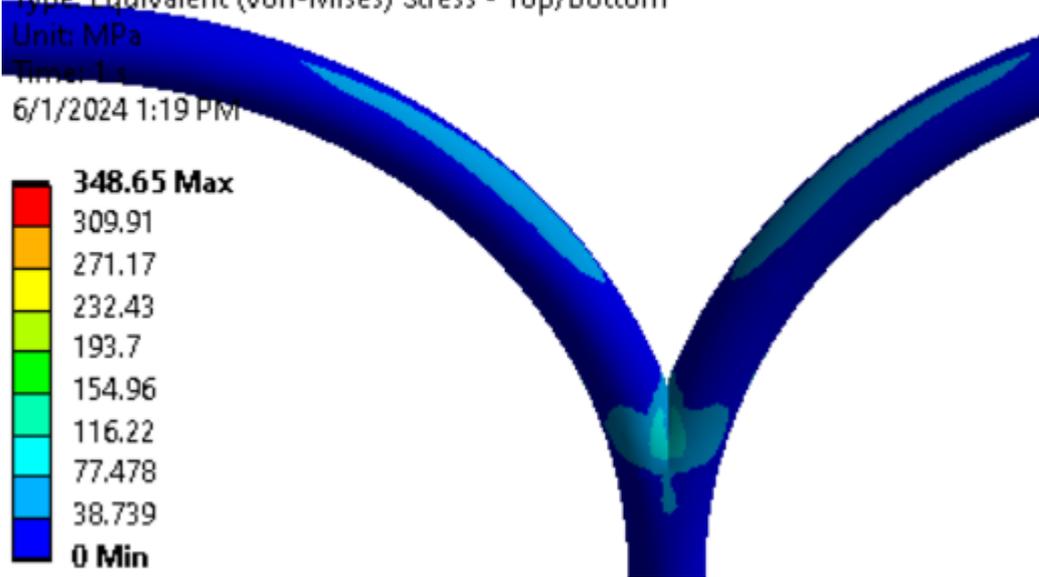
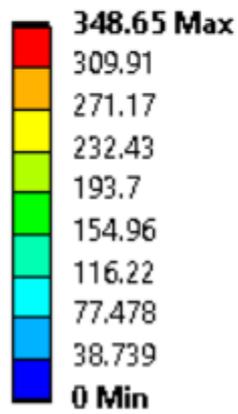


Рисунок 26. Распределение перемещений мачты для ветрового испытания, мм

**B: Wind**  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa  
Time: 1 s  
6/1/2024 1:18 PM



**B: Wind**  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa  
Time: 1 s  
6/1/2024 1:19 PM



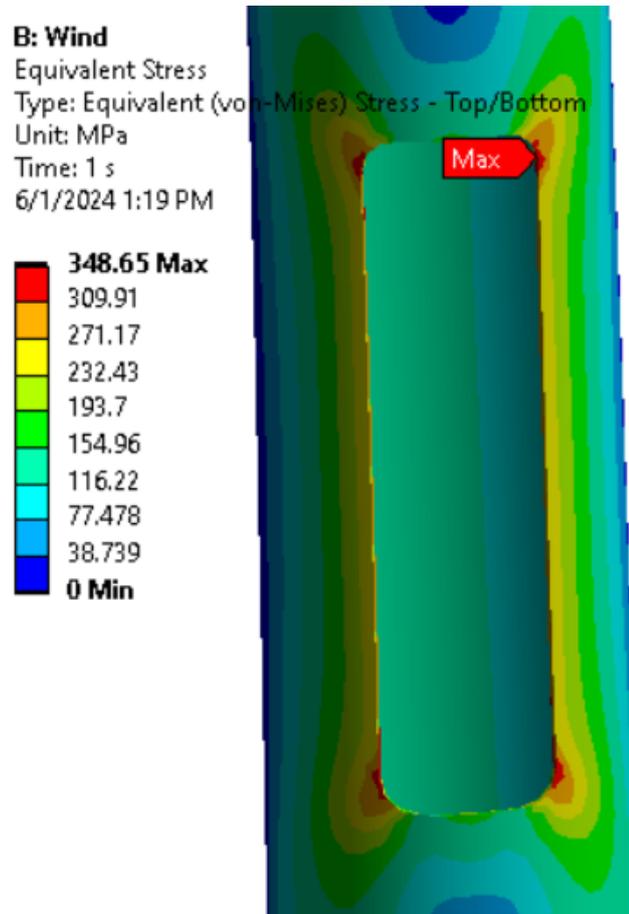


Рисунок 27. Распределение напряжений мачты для ветрового испытания, МПа

Максимальные перемещения в статическом и ветровом испытаниях соответственно: 17,7 и 440,4 мм. Максимальные напряжения в статическом и ветровом испытаниях соответственно: 167,04 и 348,7 МПа  $< \sigma_T$  [4]. Видно, что при ветровых нагрузках максимальное напряжение близко к пределу текучести в области продольного отверстия, обеспечивающего доступ к электрике, поэтому для дальнейшей доработки необходимо уменьшить максимальное напряжение, чтобы конструкция мачты удерживала нужные нагрузки.

### 3.3. Внесение изменений в мачту для уменьшения напряжения

Для того, чтобы максимальное напряжение не было близко к пределу текучести материала, необходимо внести некоторые изменения в конструкцию мачты около продольного отверстия, где это напряжение и возникает.

Рассматривается 3 три варианта изменения конструкции путем создания металлических пластин около отверстия: 1. вертикальные пластины по бокам от отверстия, 2. наложение пластины аналогичной отверстию формы путем задания контакта с мачтой, 3. разделение поверхности мачты аналогичной отверстию кривой и локальное увеличение толщины поверхности (рисунок 28)

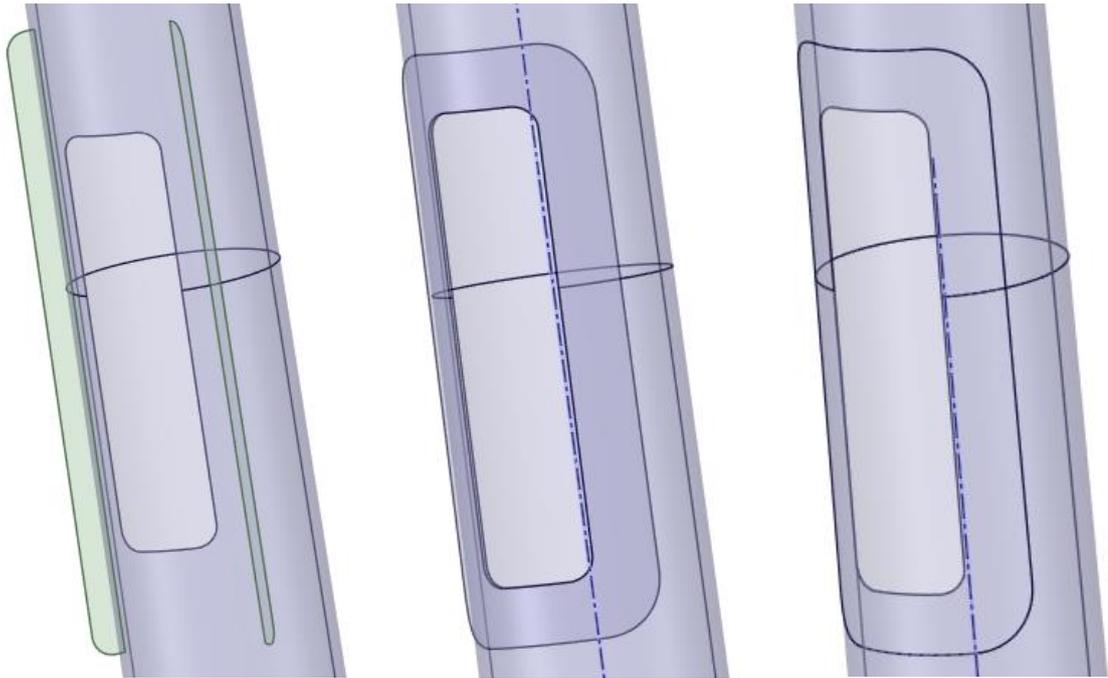


Рисунок 28. Варианты изменений 1, 2, 3 конструкции мачты

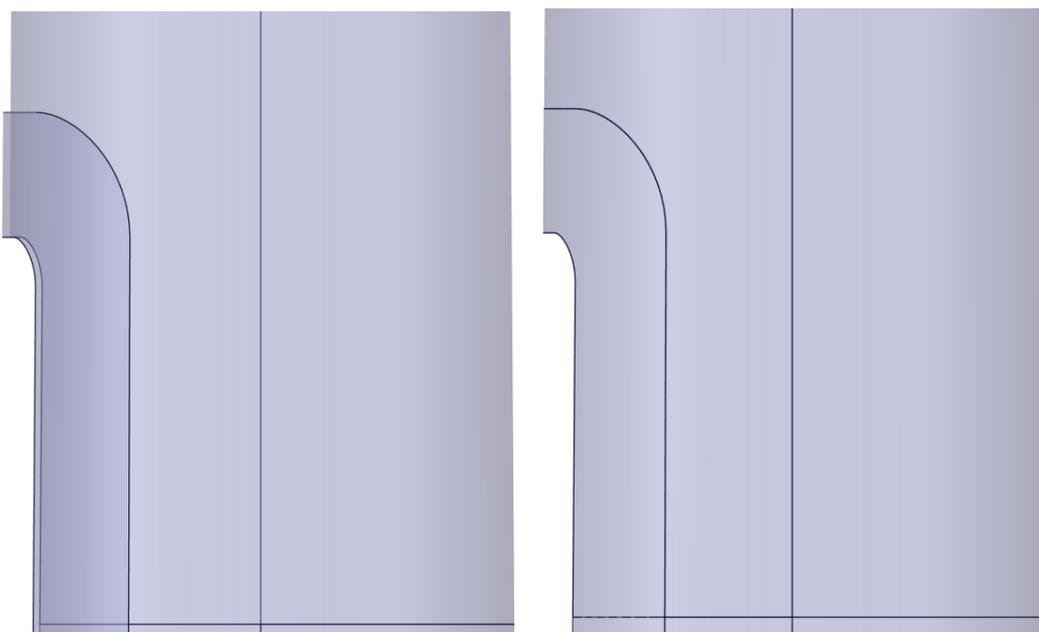


Рисунок 29. Отличие между 2 и 3 вариантами изменения

На рисунке 29 видно, что во 2 варианте изменения пластина представляет собой отдельное тело, а в 3 является частью оболочки мачты.

Постановки задач для трех случаев практически не отличаются от изначального ветрового испытания, за исключением небольших изменений. В первых двух случаях толщина пластин равна 3 мм. В третьем случае задается толщина 6 мм поверхности у отверстия с Offset Type – Middle для того, чтобы также увеличить количество материала в области отверстия. Дополнительный контакт пластины с мачтой типа Bonded необходимо задать только во 2 случае, так как происходит сваривание пластины с мачтой.

Конечно-элементные сетки строятся также методом Body Sizing с размером элемента 10 мм на все поверхности, за исключением 2 и 3 случая, где для более точного решения на пластину задается более мелкая сетка с размером элемента 5 мм (рисунок 30). Параметры сеток представлены в таблице 2.

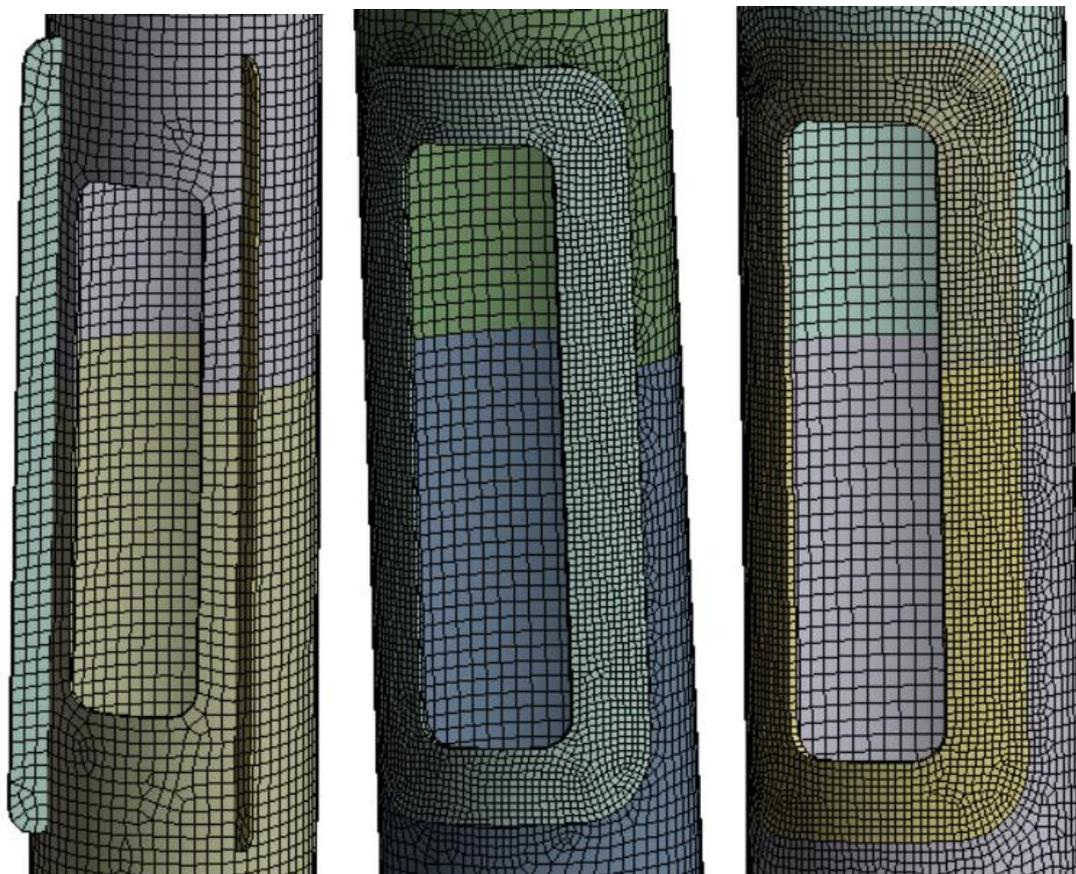


Рисунок 30. Конечно-элементная сетка вблизи пластин в вариантах 1, 2, 3

Таблица 2. Параметры сеток трех вариантов изменений конструкции

	1 вариант	2 вариант	3 вариант
Локальный размер элемента, мм	10	5	5
Количество узлов	60290	65002	62584
Количество элементов	60181	64638	62442

Граничные условия и нагрузки не отличаются от изначального ветрового испытания, поэтому необходимо вывести поля напряжений, чтобы сравнить максимальные значения с пределом текучести (рисунок 31).

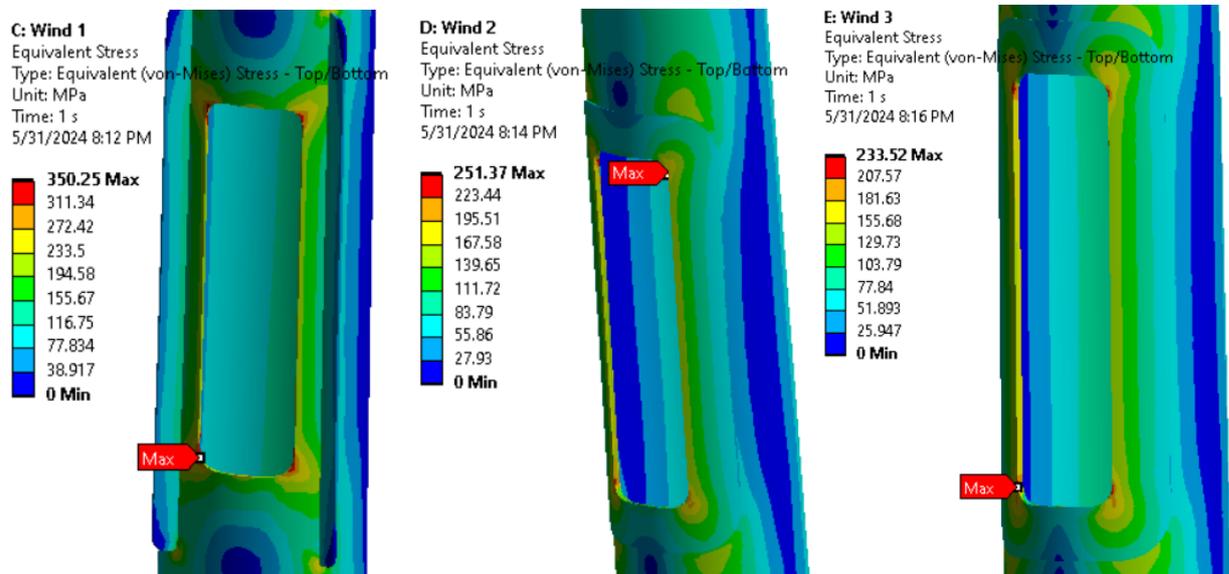


Рисунок 31. Поля напряжений и максимальные значения в вариантах 1, 2, 3

Максимальные напряжения в вариантах 1, 2, 3 соответственно: 350,25 МПа, 251,37 МПа, 233 МПа  $< \sigma_T$  [4]. Видно, что в третьем варианте максимальное напряжение значительно снизилось, объяснить это можно тем, что изменение велось непосредственно с опорой, а не посредством дополнительных элементов, из-за которых появляются лишние связи. Поэтому проведя сравнение, можно сказать, что конструкция мачты в варианте 3 является оптимальной в расчетах прочности и может применяться в дальнейших расчетах на другие нагрузки, например, в дальнейшем

испытании пассивной безопасности мачты. Для будущих расчетов необходимо также выполнить исследование на разных размерах сетки.

### 3.4. Сеточная сходимость

После выявления оптимальной конструкции мачты необходимо исследовать сеточную сходимость (зависимость максимального напряжения от размера элемента) для того, чтобы проверить, что на самой мелкой сетке максимальное напряжение тоже не превышает предел текучести. Исследование будет проводиться для размера элемента поверхности пластины толщиной 6 мм, так как максимальные напряжения проявляются именно в этой области. Расчет будет проводиться измельчением сетки в 1,5 раза на каждом шаге. Всего таких шагов будет 7. Исследование представлено на рисунке 32.

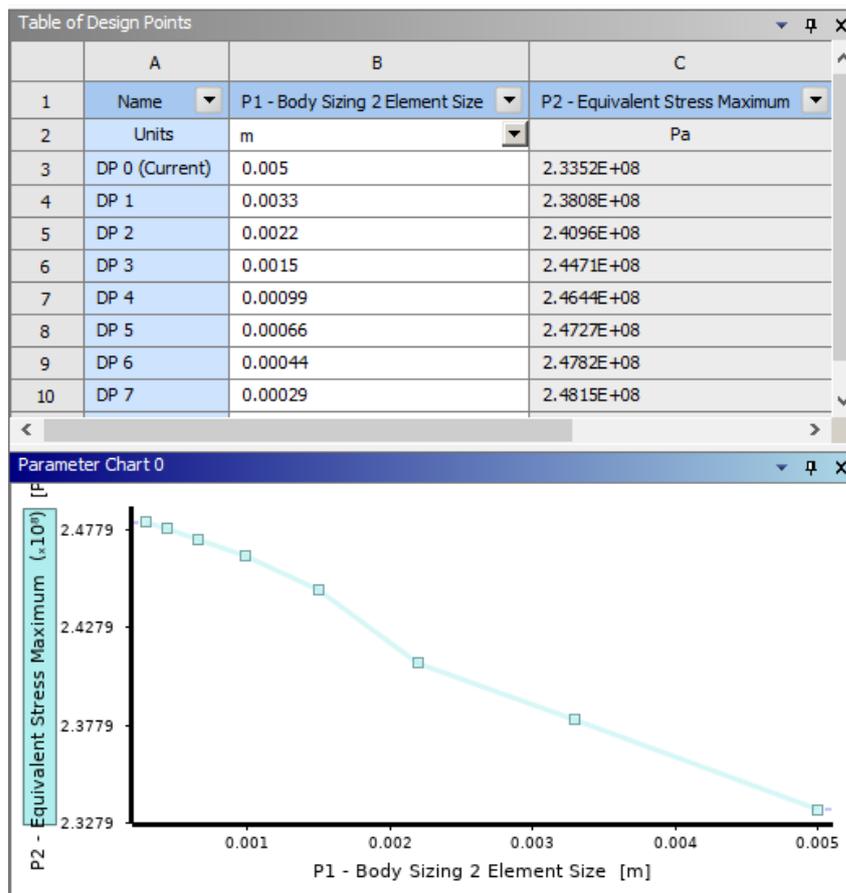


Рисунок 32. Исследование напряжений в локальной сетке при разных размерах элемента

Проведя исследование, видно, что при уменьшении размера элемента максимальное напряжение увеличивается, но все равно не превышает предела текучести. Даже на самом мелком разбиении конструкция выдерживает нагрузки и проходит по прочности. Благодаря этому получившуюся оптимальную конструкцию осветительной мачты можно применять для дальнейших расчетов и вводить в эксплуатацию.

## ГЛАВА 4. ПАССИВНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ МАЧТЫ

### 4.1. Постановка задачи

На тяжесть несчастных случаев для пассажиров транспортных средств влияют характеристики опорных конструкций для элементов дорожной техники, находящихся под ударом. Из соображений безопасности их можно изготовить таким образом, чтобы они отсоединялись или поддавались при ударе транспортного средства.

Энергопоглощающие опорные конструкции (такие как рассматриваемая в работе мачта) значительно замедляют движение транспортного средства и, таким образом, можно снизить риск вторичных столкновений с конструкциями, деревьями, пешеходами и другими участниками дорожного движения.

В настоящем испытании используется легковой автомобиль для проверки того, что уровни тяжести удара удовлетворительно достигнуты и совместимы с безопасностью пассажиров легкового автомобиля.

Испытание проводится в соответствии со стандартом BS EN 12767 [11] в Ansys LS-Dyna [13], так как этот решатель хорошо подходит для моделирования быстро протекающих процессов, характеризующихся наличием нелинейностей и контактного взаимодействия. Уровень энергопоглощения мачты HE, со скоростью автомобиля 100 км/ч и первым уровнем безопасности пассажиров. Задача заключается в том, чтобы проверить, что мачта принадлежит классу пассивной безопасности 100HE1 с помощью соответствующих критериев безопасности и сделать выводы о тяжести несчастных случаев для пассажиров автомобиля.

## 4.2. Геометрия испытания

За осветительный столб берется оптимизированная оболочечная модель мачты, которой задаются такие же толщины с выявленным самым низким максимальным напряжением. Данная модель уже не делится на 20 частей, так как ветровое давление при оценке пассивной безопасности мачты не рассматривается. Также необходимо отметить, что светильники уже не рассматриваются как материальные точки, поэтому они включены в геометрию модели мачты. Геометрия мачты для испытания пассивной безопасности представлена на рисунке 33.

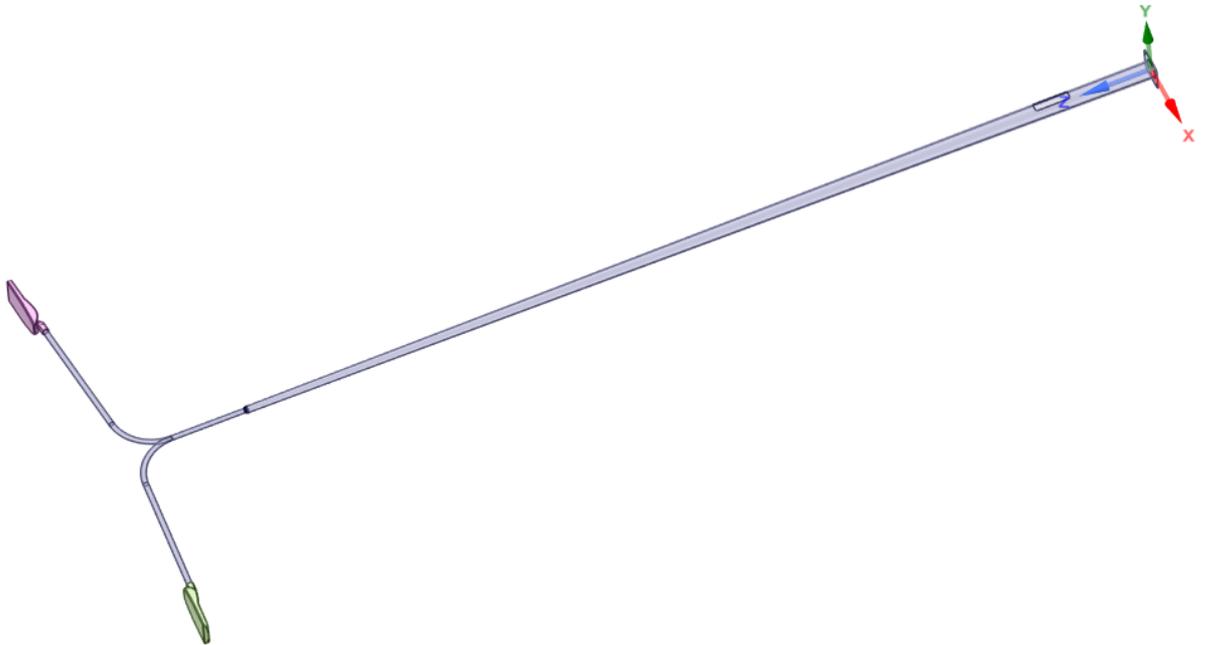


Рисунок 33. Геометрия мачты для оценки пассивной безопасности

Автомобилем, который будет использоваться для испытания, был выбран Toyota Yaris II 2010 года выпуска, взятая с соответствующего ресурса [15] (рисунок 34). Автомобиль по стандарту подходит по массе и размеру (масса 850 кг, размеры 4300x1690x1140 мм).

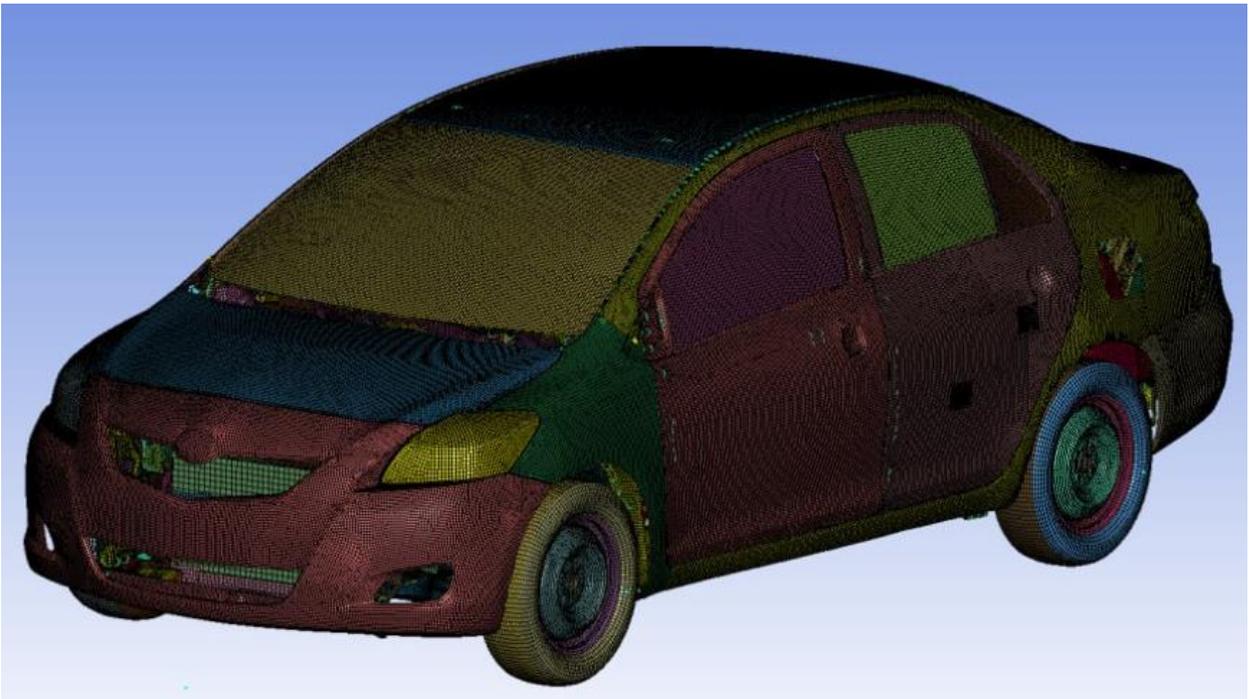


Рисунок 34. Модель автомобиля Toyota Yaris

Автомобиль будет передвигаться по прямоугольной площадке, расположенной в плоскости  $XU$ , на которой будет стоять и мачта.

Также в стандарте указано, что автомобиль сталкивается с мачтой под углом  $20$  градусов. Это отображает то, что автомобиль, съехав с проезжей части, передвигается к направлению мачты под углом. Также нужно отметить, что автомобиль перемещается до столкновения с мачтой только по оси  $X$ . Таким образом, итоговая картина начала испытания при виде сверху представлена на рисунке 35.

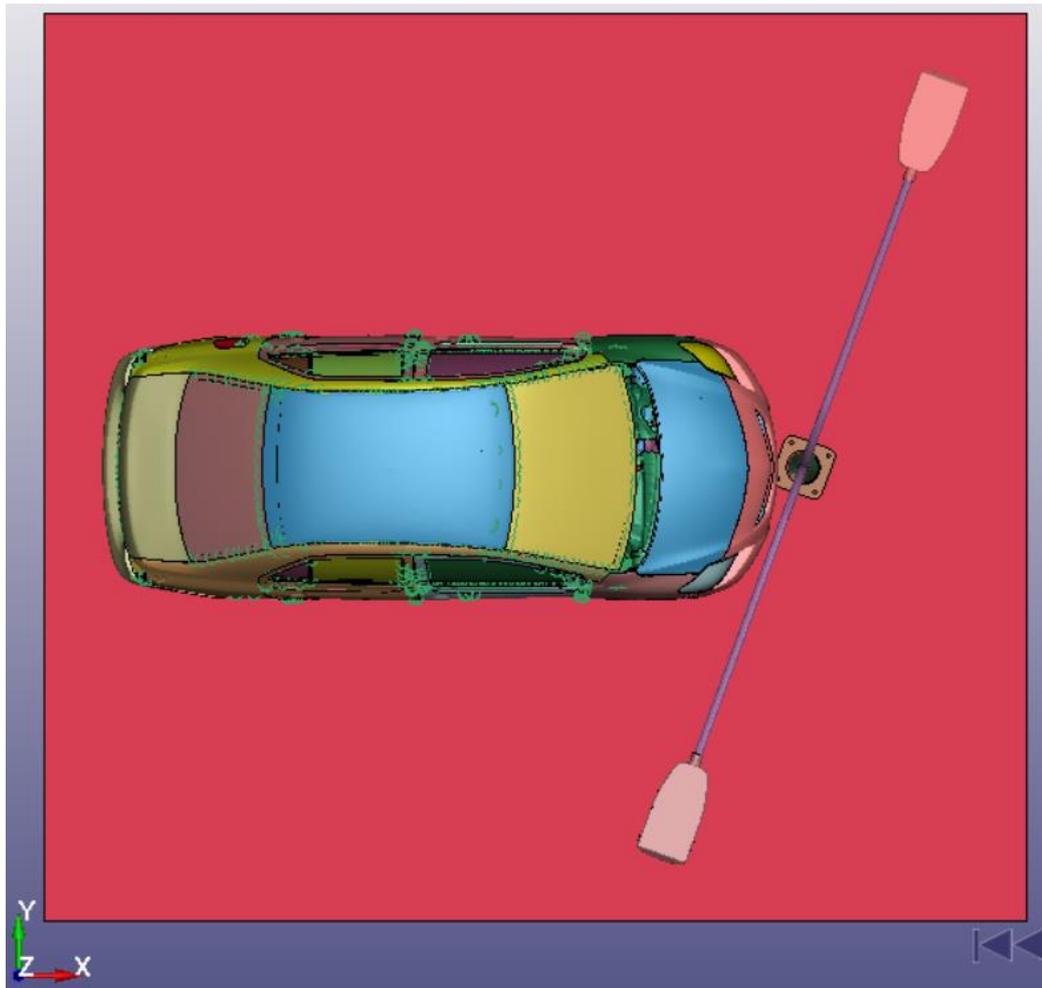


Рисунок 35. Начальный момент испытания пассивной безопасности мачты

### 4.3. Материалы

Фонари сделаны из алюминия, им задается плотность  $667,7 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ . Также задается модуль Юнга, равный 71 МПа, и коэффициент Пуассона, равный 0,33.

Настоящие свойства алюминия: плотность  $2700 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ , модуль Юнга 70 МПа, коэффициент Пуассона 0,33.

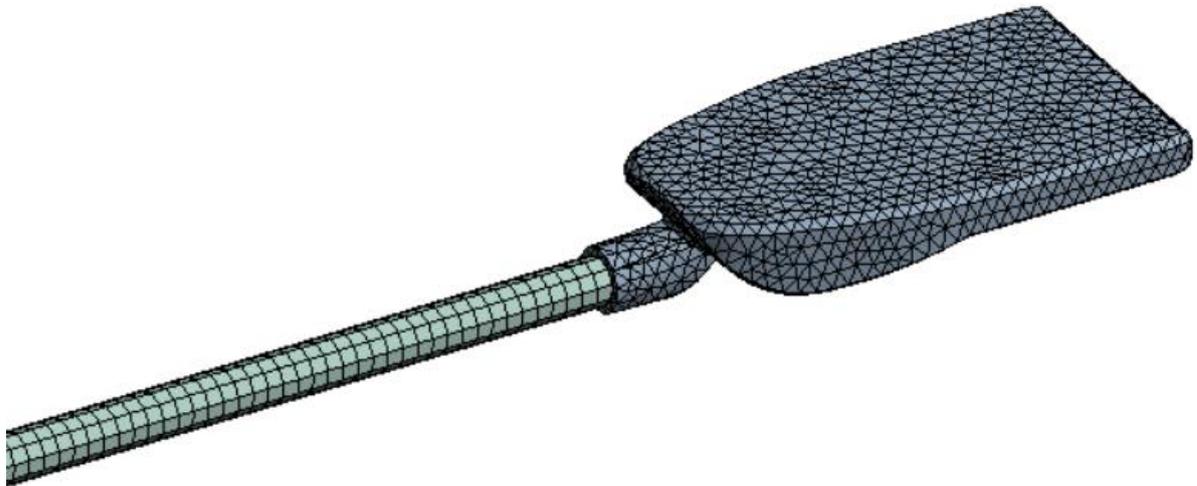
Стали, из которой сделана мачта, необходимо задать материал с пластичностью с изотропным упрочнением [3]. Задается плотность, равная  $7850 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ , модуль Юнга, равный 200 ГПа, коэффициент Пуассона, равный 0,3, и кривая пластичности по 8 точкам: (пластическая деформация в мм,

напряжение в МПа) соответственно: (0; 235), (0,04; 274), (0,11; 334), (0,17; 363), (0,26; 386), (0,47; 410), (0,75; 434), (1; 454).

Материалы составляющих автомобиля берутся вместе с самой моделью с соответствующего ресурса [15].

#### **4.4. Конечно-элементная сетка, контакты и граничные условия**

Перейдя в Mechanical, необходимо задать параметры конечно-элементной сетки: размер элемента на светильниках и верхней части мачты равен 20 мм, в нижней части мачты – 25 мм, а также на фланцевых отверстиях задается разбиение на 8 элементов на каждом ребре. Конечно-элементная сетка для испытания пассивной безопасности мачты представлена на рисунке 36. Количество узлов – 17724, количество элементов – 40013.



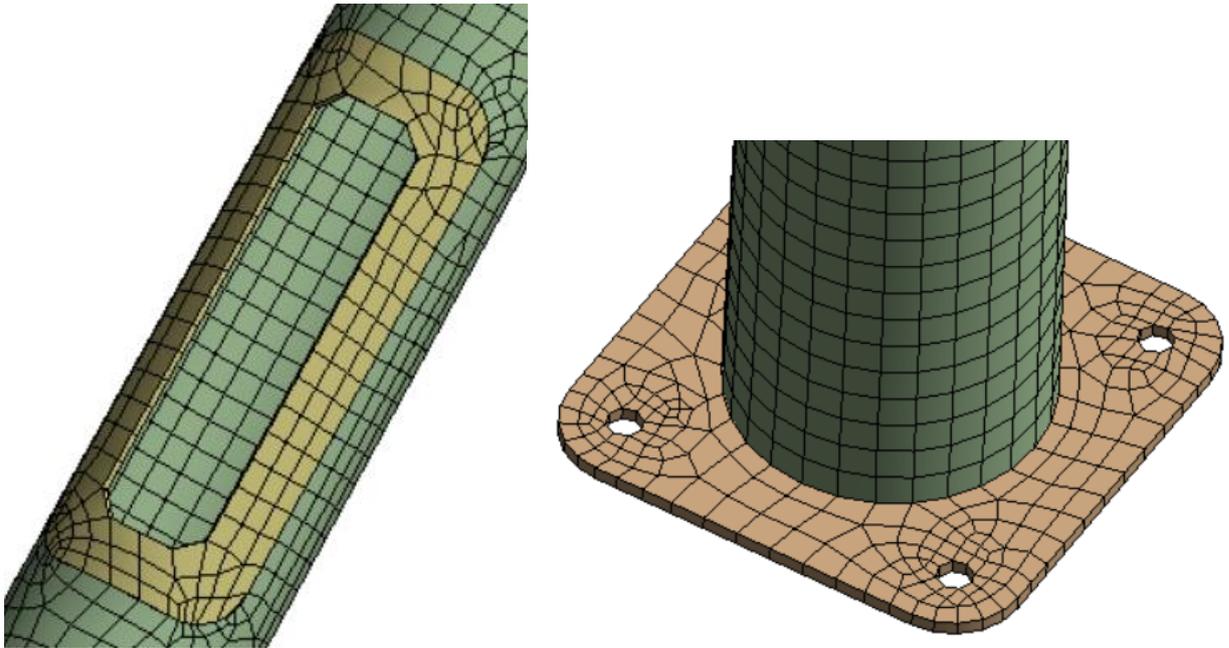


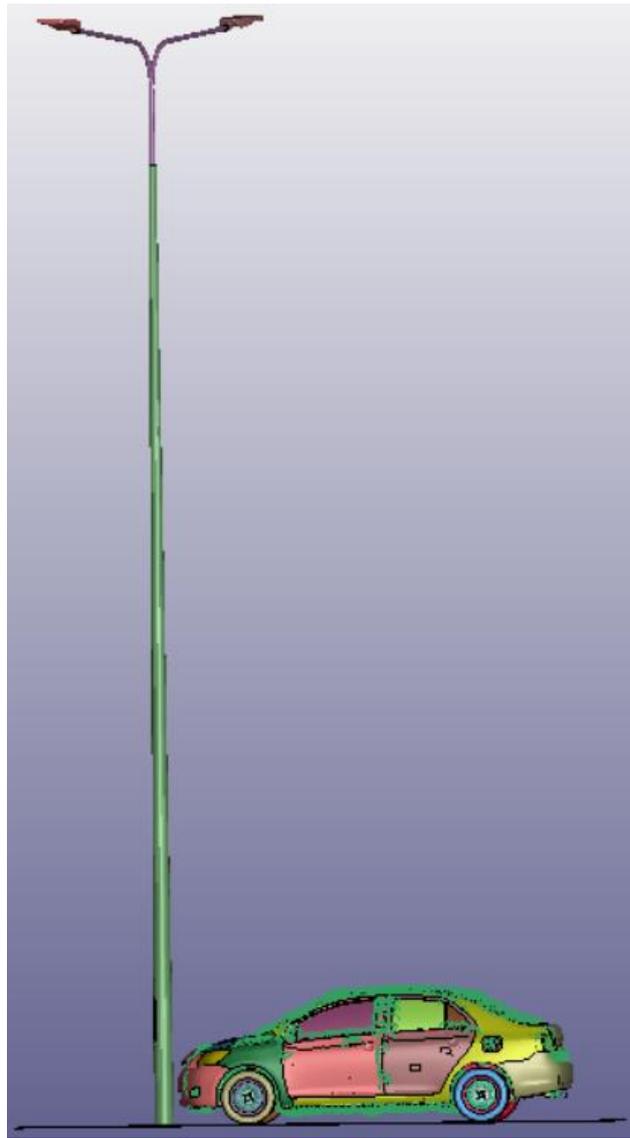
Рисунок 36. Конечно-элементная сетка на разных частях мачты

Также необходимо задать контакты типа Bonded между светильниками и мачтой для того, чтобы они взаимодействовали как одно целое. И задается контакт Body Interaction типа Frictional, который объясняет взаимодействие всех тел, участвующих в испытании, друг с другом.

Из граничных условий необходимо задать только ограничение перемещения по всем осям на болтовые отверстия в фланце, так как фланец закрепляется на площадке. Гравитация и скорость машины учитываются в отдельных входных файлах.

#### 4.5. Результаты

В результате расчета можно получить картину взаимодействия автомобиля на скорости 100 км/ч и мачты (рисунки 37-38).



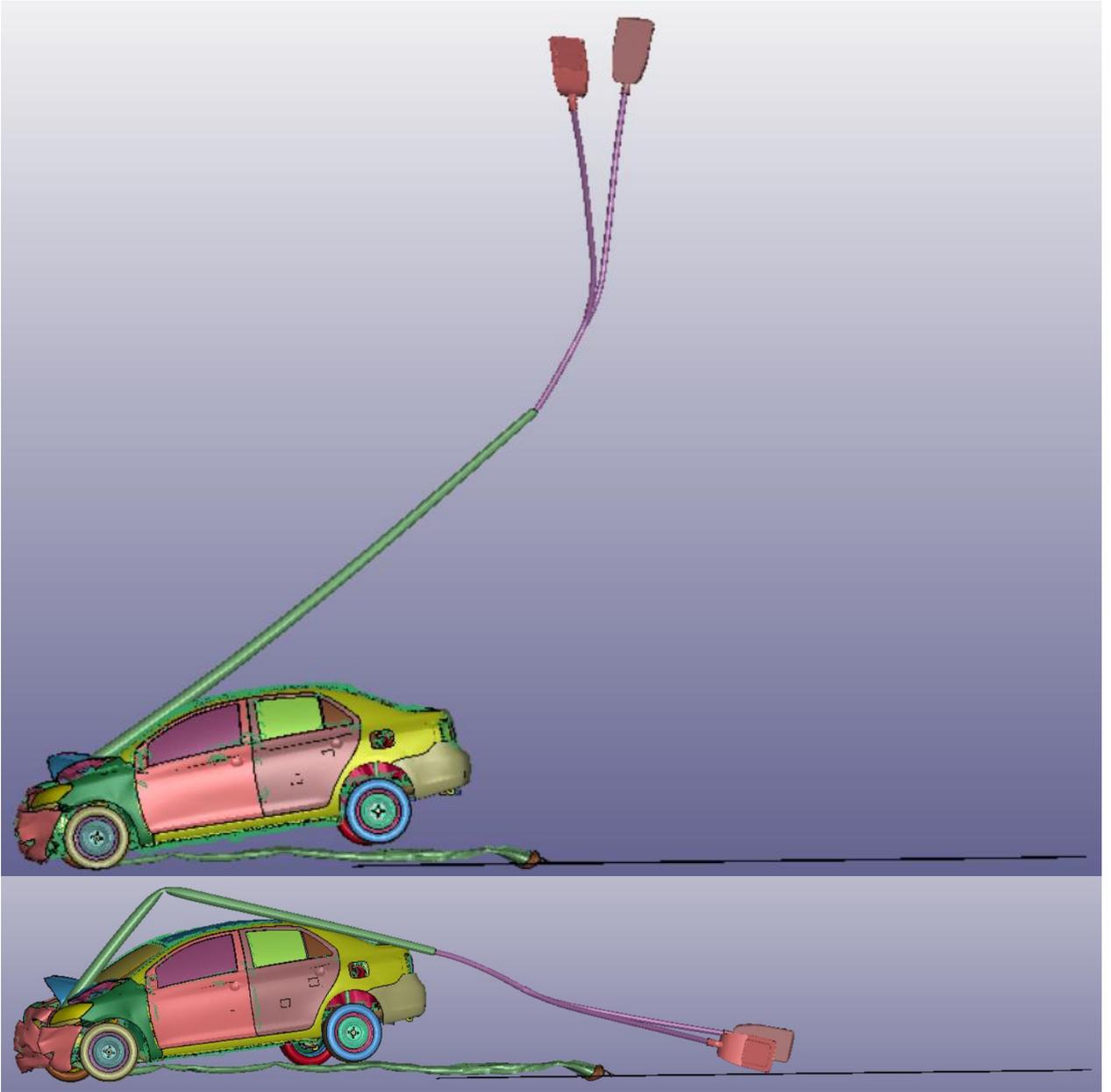


Рисунок 37. Результаты испытания на виде сбоку



Рисунок 38. Результаты испытания на виде спереди

По результатам испытания можно заметить, что мачта берет на себя большое количество энергии, создаваемой движением автомобиля, так как является опорой класса высокого энергопоглощения. Существенная часть деформаций приходится на переднюю часть автомобиля, где находится двигатель.

#### 4.6. Анализ результатов и критерии безопасности

По стандарту для проверки соответствия мачты определенному классу пассивной безопасности необходимо убедиться в том, что достигнута нужная конечная скорость автомобиля, а также проверить критерии безопасности ASI (индекс серьезности ускорений) и THIV (теоретическая скорость удара головой) [12].

График зависимости скорости от времени представлен на рисунке 39.

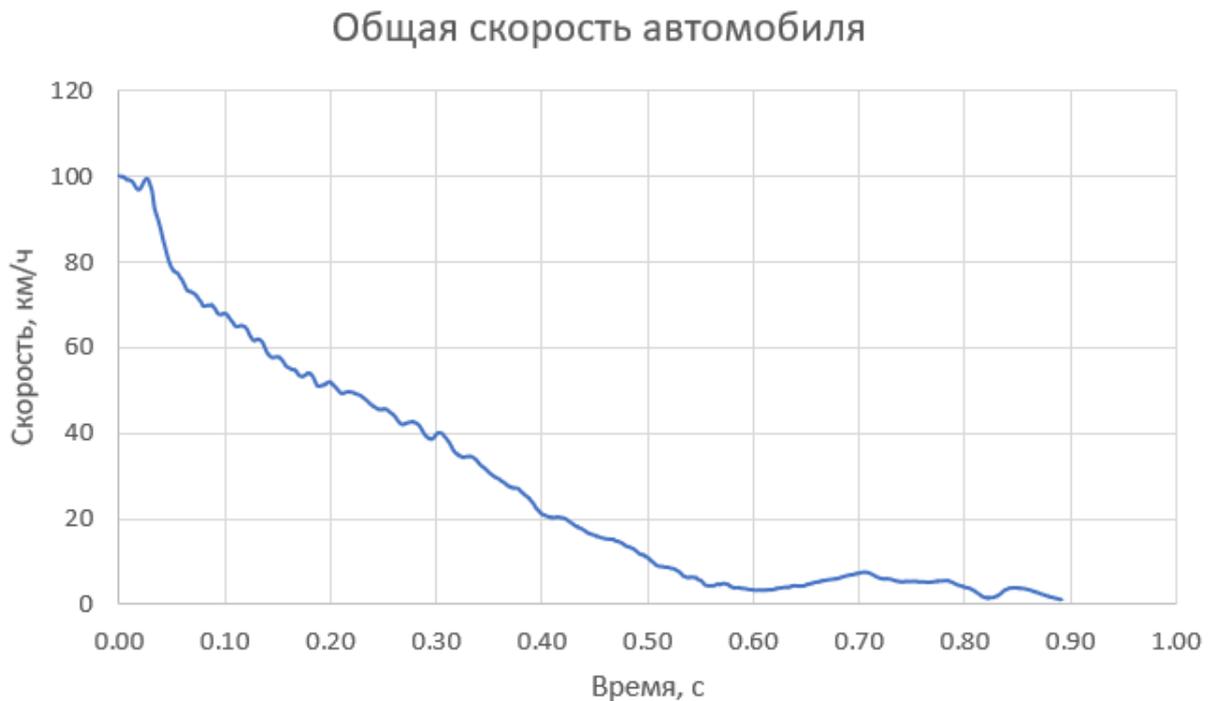


Рисунок 39. Зависимость скорости автомобиля от времени

По графику видно, что скорость со временем уменьшается. Исходя из стандарта, скорость на выходе должна быть  $0 \leq V_{\text{кон}} \leq 50$  км/ч. По результатам расчетов конечная скорость равна 3,6 км/ч. Значит, требование по конечной скорости выполнено.

Индекс тяжести ускорения ASI – это безразмерная мера замедления центра тяжести (ЦТ) транспортного средства. Он описывает интенсивность замедления, действующего на пассажира в момент столкновения с препятствием.

ASI определяется по формуле:  $ASI(t) = \sqrt{\left(\frac{a_x}{\hat{a}_x}\right)^2 + \left(\frac{a_y}{\hat{a}_y}\right)^2 + \left(\frac{a_z}{\hat{a}_z}\right)^2}$ ,  $\hat{a}_x=12g$ ,  $\hat{a}_y=9g$ ,  $\hat{a}_z=10g$ ,  $ASI = \max[ASI(t)]$ , где  $a_x, a_y, a_z$  – компоненты ускорения выбранной точки автомобиля из подвижного усредненного интервала времени 50 мс,  $\hat{a}_x, \hat{a}_y, \hat{a}_z$  – предельные ускорения для пассажиров, использующих ремни безопасности. Для скорости 100 км/ч и класса энергопоглощения HE значение коэффициента ASI не должно превышать 1,4.

Выведем из LS-Prepost [13] значения ускорений в зависимости от времени и построим график ASI (t), представленный на рисунке 40.

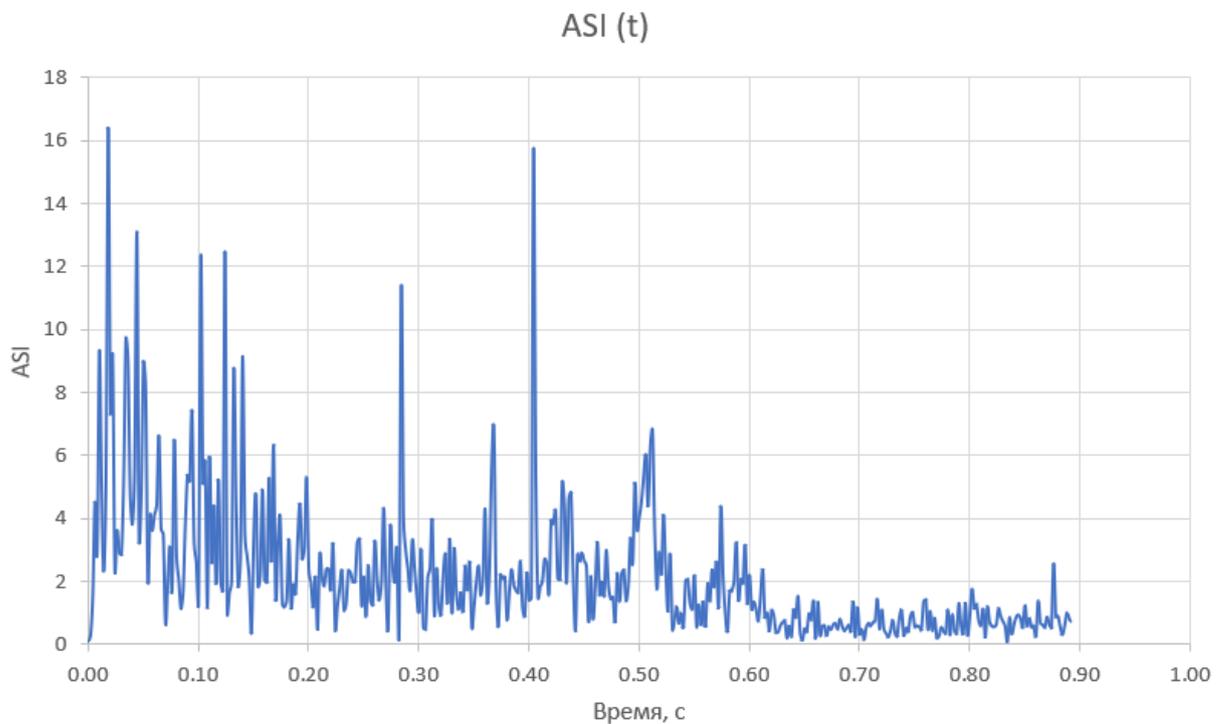


Рисунок 40. Зависимость ASI (t)

За интервал 0,05 с максимальное значение ASI равно 16,4, что кардинально отличается от допустимого значения по стандарту.

Также по графику можно заметить, что в окрестности времени 0,5 с наблюдается равномерное увеличение, а затем снижение показателя ASI. При оценке поведения автомобиля и мачты в интервале времени 0,48 – 0,53 с можно наблюдать (рисунки 41, 42), что мачта перестала контактировать с

верхней частью автомобиля и лобовым стеклом, а значит, автомобиль приобрел большее моментальное замедление, которое впоследствии за 30 мс резко упало, следовательно, этот фактор и повлиял на поведение ASI в окрестности времени 0,5 с.

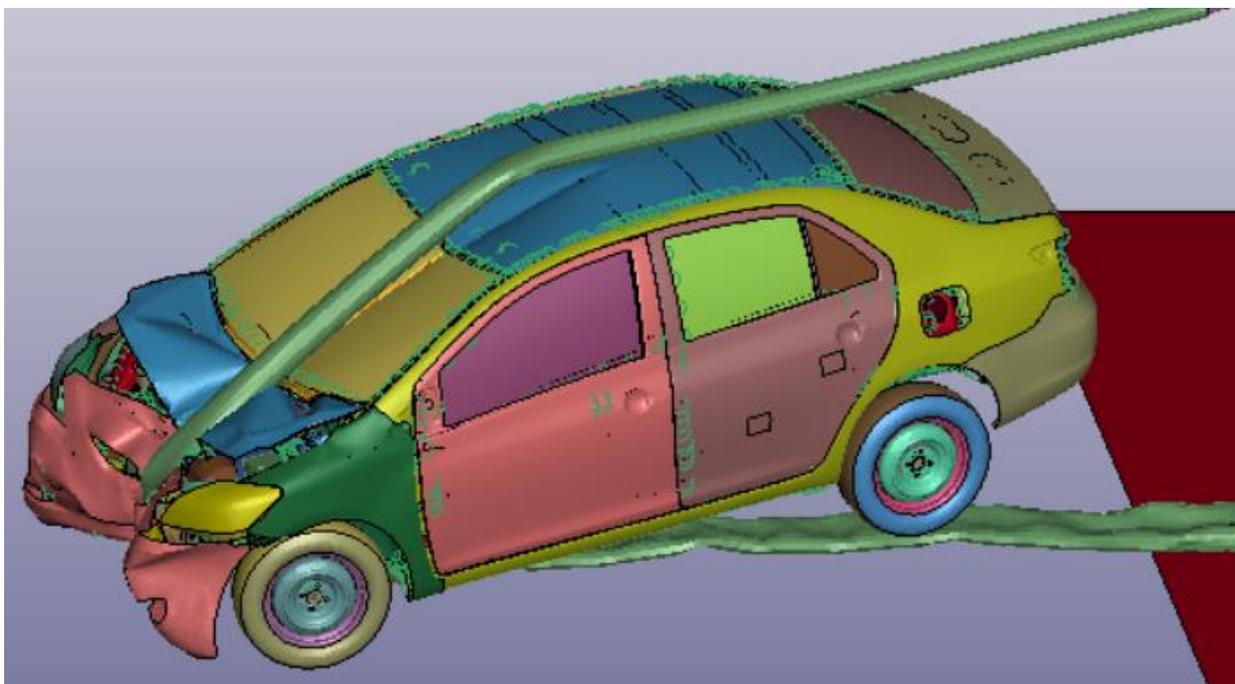


Рисунок 41. Взаимодействие верхней части автомобиля с мачтой в момент времени 0,48 с

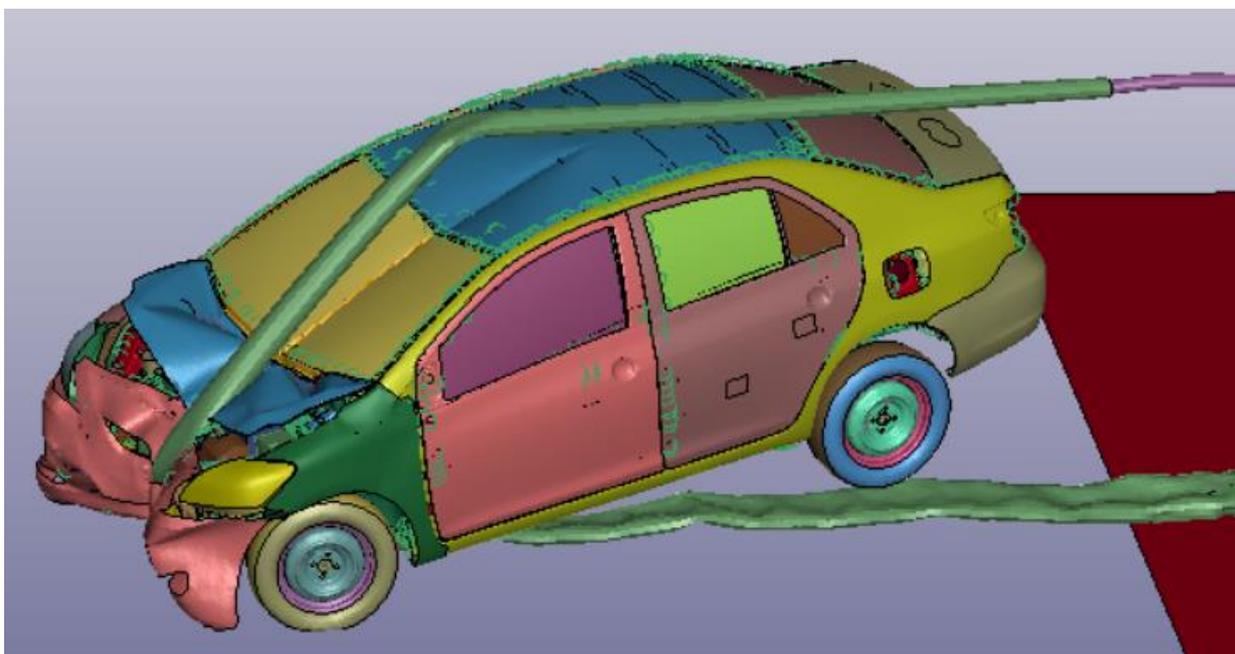


Рисунок 42. Взаимодействие верхней части автомобиля с мачтой в момент времени 0,53 с

Чтобы сделать окончательный вывод о тяжести вреда, необходимо рассчитать THIV.

Теоретическая скорость удара головы представляет собой скорость головы при ударе о поверхность внутри транспортного средства и определяется по зависимости:  $THIV = \sqrt{V_{head\ x}^2(T) + V_{head\ y}^2(T)}$ ,  $V_{head\ x}$  и  $V_{head\ y}$  – горизонтальная и вертикальная компоненты скорости головы в системе координат автомобиля  $C_{vehicle}$ ,  $T$  – время полета, соответствующее абсолютному значению теоретического смещения головы, равному 600 мм в направлении  $x$ . Для скорости 100 км/ч и класса энергопоглощения HE значение THIV не должно превышать 44 км/ч.

Чтобы получить значения  $V_{head\ x}$ ,  $V_{head\ y}$ , необходимо выполнить ряд преобразований. Сначала ускорение системы координат автомобиля должно быть рассчитано по уравнению:

$$\begin{cases} \ddot{X}_{vehicle} = a_{vehicle\ x} \cdot \cos \theta - a_{vehicle\ y} \cdot \sin \theta \\ \ddot{Y}_{vehicle} = -a_{vehicle\ x} \cdot \sin \theta + a_{vehicle\ y} \cdot \cos \theta \end{cases} \quad \theta - \text{угол рыскания};$$

Угол рыскания считается через вектора точек на автомобиле в начальный момент времени и в момент времени  $t$ .

Тогда смещение головы можно рассчитать по формуле:

$$\begin{cases} x_{head} = (x_0 - X_{vehicle}) \cdot \cos \theta - (y_0 - Y_{vehicle}) \cdot \sin \theta \\ y_{head} = -(x_0 - X_{vehicle}) \cdot \sin \theta + (y_0 - Y_{vehicle}) \cdot \cos \theta \end{cases}$$

$X_{vehicle}$ ,  $Y_{vehicle}$  – смещение системы координат автомобиля, полученное двойным интегрированием первого уравнения.

Затем значения компонент скорости головы рассчитываются как:

$$\begin{cases} V_{head\ x} = -\dot{X}_{vehicle} \cdot \cos \theta - \dot{Y}_{vehicle} \cdot \sin \theta + y_{head} \cdot \dot{\theta} \\ V_{head\ y} = -\dot{X}_{vehicle} \cdot \sin \theta - \dot{Y}_{vehicle} \cdot \cos \theta - x_{head} \cdot \dot{\theta} \end{cases}$$

Просчитав, проинтегрировав и продифференцировав все значения в Excel, можно получить графики зависимости компонент скорости головы от времени (рисунки 43, 44).



Рисунок 43. Зависимость  $V_{head\ x}$  от времени



Рисунок 44. Зависимость  $V_{head\ y}$  от времени

Время при смещении головы, равному 600 мм по оси x, равно 0.092 с. И тогда значение THIV за это время равно 11,41 м/с или 41,08 км/ч, что не превышает максимального значения по стандарту. Значит, можно сделать вывод, что голова человека не потерпит большого вреда от столкновения.

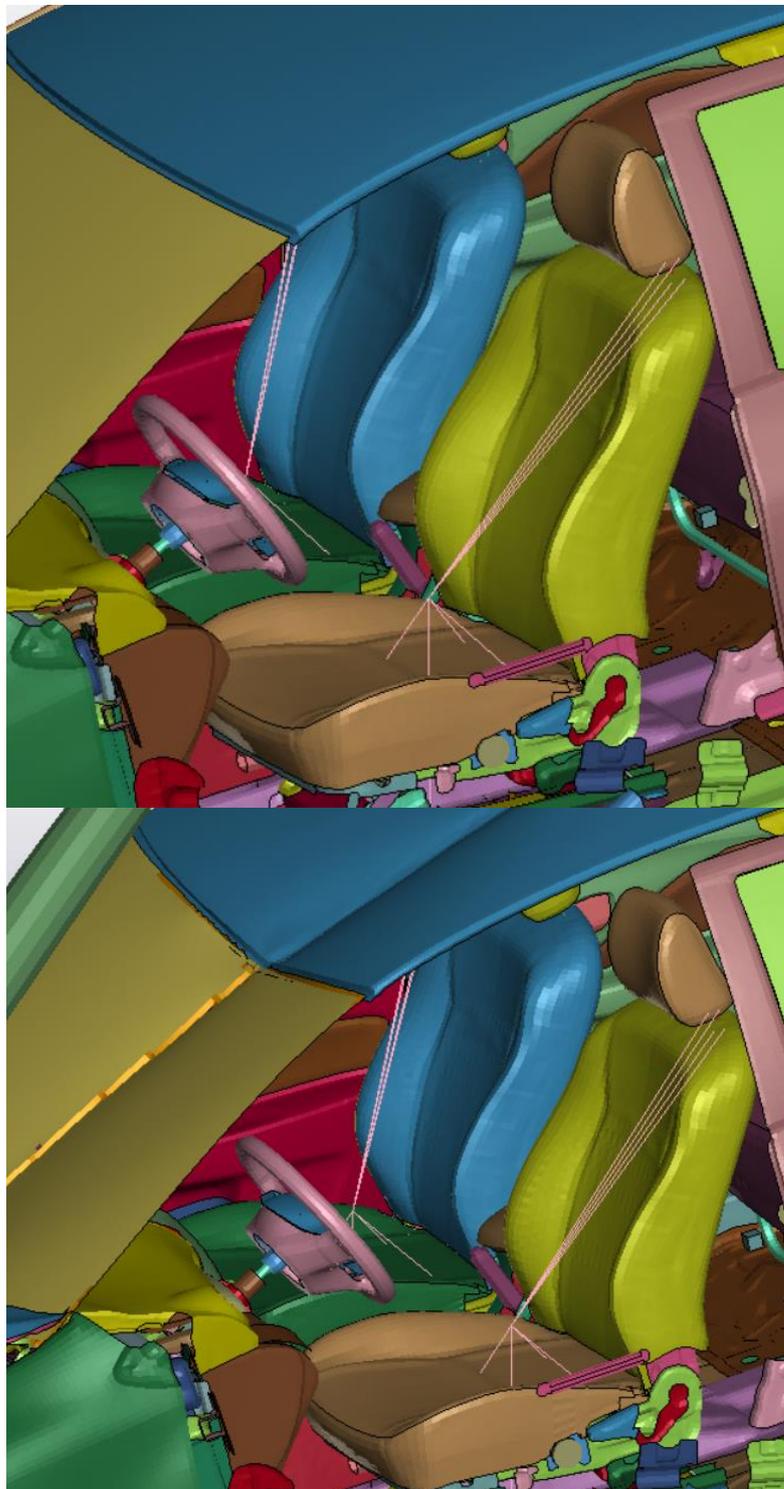


Рисунок 45. Отсутствие большого влияния столкновения на рулевую колонку и подголовник сидения.

По результату испытания (рисунок 45) можно видеть, что при столкновении рулевая колонка и подголовник водительского сидения не смещаются сильно вперед, значит, эти факторы не оказывают влияния на вред для головы водителя. Получившееся значение критерия THIV говорит о том, что человек ударяется головой о поверхность с допустимой скоростью, что снижает риск получения черепно-мозговых травм, несовместимых с жизнью. Слишком большое значение коэффициента ASI может говорить о том, что большой вред может оказываться на другие части тела водителя, например, на ноги, которые находятся на педалях в момент столкновения, которые ближе к капоту автомобиля, чем голова. Либо это может объясняться слишком высоким энергопоглощением мачты.

Таким образом, можно сказать, что мачта не соответствует классу пассивной безопасности 100NE1. Для дальнейшего улучшения конструкции можно изменять толщину, материалы осветительной мачты, чтобы добиться безопасного для людей результата.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках работы по международному стандарту проведены цифровые испытания стальной уличной осветительной мачты с двумя светильниками, расположенной в сельской местности. С помощью программного пакета ANSYS выполнены расчет напряженно-деформированного состояния конструкции, проверка ее на прочность, оптимизация конструкции путем уменьшения максимального напряжения, а также была проверена пассивная безопасность мачты путем испытания столкновения легкового автомобиля с ней.

Подводя итоги, можно сказать, что осветительная мачта выдерживает статические и ветровые нагрузки, путем оптимизации зоны отверстия для доступа к электрике напряжения стали еще меньше предела текучести, тем самым можно сказать, что опора выполняет условие прочности. Испытание на пассивную безопасность осветительная мачта прошла, но в итоге не соответствует нужным критериям безопасности, поэтому ее нельзя отнести к определенному классу пассивной безопасности. В дальнейшем конструкция осветительной мачты может быть доработана.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бруйка В. А., Фокин В. Г., Солдусова Е. А., Глазунова Н. А., Адеянов И. Е. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учебное пособие. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 271 с.: ил.
2. Зиновьев Д. Основы проектирования в SOLIDWORKS 2016. – 1-е изд. 2017., 277
3. Матвеев В. П. Вычислительная механика сплошных сред. – 2010. – Т. 3, № 3. – С. 46-57
4. Павлов П. А., Паршин Л. К., Мельников Б. Е., Шерстнев В. А. Сопротивление материалов: учебное пособие / Под ред. Б. Е. Мельникова. 2-е изд., испр и доп. – СПб.: Издательство «Лань», 2007 г. – 560 с.: ил. – (Учебники для вузов. Специальная литература).
5. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.:Наука, 1975. – 576 с.
6. EN 40-1:1992, Lighting columns - Part 1: Definitions and terms, BSI, 14 p.
7. EN 40-2:2004, Lighting columns - Part 2: General requirements and dimensions, BSI, 28 p.
8. EN 40-3-1:2000, Lighting columns - Part 3-1: Design and verification - Specification for characteristic loads, BSI, 20 p.
9. EN 40-5:2002, Lighting columns - Part 5: Requirements for steel lighting columns, BSI, 30 p.
10. EN 10219-2:2006, Cold formed welded structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels — Part 2: Tolerances, dimensions and sectional properties, BSI, 40 p.
11. EN 12767:2007, Passive safety of support structures for road equipment — Requirements, classification and test methods, BSI, 44 p.
12. Kaliskiego S. Determination of ASI and THIV parameters based on the results of experimental and numerical research in relation to EU standards, MATEC Web of Conferences 338, 01025, 2021, p. 34-45

13. Kanglight. Vega 3. <https://kanglight.com/ru/vega-3/> Электронный ресурс, дата обращения 24.10.2023.
14. Livermore Software Tehnology Corporation (LSTC). LS-Dyna Keyword User's Manual Volume I, 2021, 3826 p.
15. NHTSA. Crash Simulation Vehicle Models. <https://www.nhtsa.gov/crash-simulation-vehicle-models> Электронный ресурс, дата обращения 15.04.2024
16. Opisvet. Виды и технология установки мачт освещения. <https://www.opisvet.ru/blog/vidy-i-tekhnologiya-ustanovki-machty-osveshcheniya/> Электронный ресурс, дата обращения 02.05.2024.
17. Tehomet. HE12T120. <https://www.tehomet.com/en/products/product/he12t120/> Электронный ресурс, дата обращения 15.10.2023.