

ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ «ШАГ В БУДУЩЕЕ»

НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ СОРЕВНОВАНИЕ «ШАГ В БУДУЩЕЕ, МОСКВА»

42194

регистрационный номер

Головной учебно-исследовательский и методический центр
профессиональной реабилитации лиц с ограниченными возможностями
здоровья (инвалидов)

название факультета

Реабилитации инвалидов

название кафедры

«Разработка конструкции медицинской трости на основе биомиметической модели скелета морской губки»

название работы

Автор:

Родиков Роман Михайлович
ОГБОУ «Лицей № 9 г. Белгорода», 11«А»

Научные руководители:

к.т.н., доцент, доцент кафедры СМИиК
БГТУ им. В.Г. Шухова
Елистраткин М.Ю.

к.т.н., учитель физики ОГБОУ «Лицей № 9»
Поленова Ю.Е

Введение

Актуальность исследования определяется потребностями людей с ограниченными возможностями здоровья, необходимостью улучшения их качества жизни при ограниченных финансовых возможностях.

По данным Пенсионного фонда¹ в России 11,7 млн граждан с разной степенью инвалидности. 1,6 млн человек обращаются за обеспечением техническими средствами реабилитации. ФОМС РФ направляет 35 млрд рублей ежегодно на поддержку инвалидов (это покрывает 90% от потребности).

Средний размер пенсии инвалидов не превышает 13 тыс. рублей. 1,1 тыс. рублей – стоит самая дешевая трость. Ее покупка может стать для нуждающихся не простой задачей.

На рынке товаров таких изделий представлено достаточно большое количество тростей различного назначения и ценовых категорий. Пользователями отмечается низкое качество наиболее доступных моделей (большая масса, неудобство ручки) и недостаточная приспособленность к индивидуальным потребностям инвалидов.

Наше исследование – это попытка найти техническое решение по улучшению эргономических характеристик трости посредством доработки существующих конструкций.

Целью данной работы является разработка конструкции медицинской трости на основе биомиметической модели скелета морской губки и исследование ее механических свойств.

В рамках работы планируется решить следующие **задачи**:

- 1) изучить структуру скелета морской губки;
- 2) предложить структуру несущей конструкции медицинской трости, подобрать материал и технологию ее производства;

¹ Отчетные данные Пенсионного фонда Российской Федерации за 2020 год.

3) получить экспериментальные образцы, используя аддитивные технологии, исследовать их механическую прочность и оценить перспективы применения биомиметической модели;

4) построить и теоретически испытать 3D модель медицинской трости.

1. Теоретическая часть

(обзор источников, аналогов, прототипов и т.д.)

В современных прикладных науках довольно популярен **биомиметический подход** – поиск аналогов готовых решений в живой природе. Так исследователи из Гарвардского университета [1] выяснили, что структурные особенности строения морских губок могут послужить вдохновением для более прочных и высоких небоскребов, более длинных мостов и сверхлегких космических кораблей. В публикации ученых кратко изложена работа по исследованию физических свойств структуры, выполненной на подобии скелета морской губки.

Исследователи и биоинженеры были вдохновлены скелетами морских губок и предложили технологию строительства следующего поколения длинных мостов, а также небоскрёбов и лёгких космических аппаратов. Копирование структуры глубоководных организмов позволяет сделать конструкции более прочными и лёгкими. В Гарвардской школе инженерных и прикладных наук изучали морскую губку *Euplectella aspergillum*. Она распространена в восточной акватории Индийского океана и западной Тихого; обычно обитает на глубоководных равнинах шельфов материков и островов. В ходе экспериментов и анализа было открыто, что структура губок (рисунок 1) имеет более высокое соотношение прочности и веса, чем традиционные решётчатые конструкции, которые веками использовались при строительстве зданий и мостов. Исследователи рассказали, что геометрия морских особей, сформированная в ходе тысячелетней эволюции, вдохновила их на проекты и создание инновационных конструкций самого широкого спектра применений. Для поддержания оптимальной формы своего трубчатого тела, морская губка использует наборы параллельных диагональных скелетных трубочек, которые пересекаются с квадратной сеткой и образуют прочный шахматный узор. Это такая структура, которая превосходит все ныне

действующие конструкции с диагональным решётчатым дизайном: в таком типе конструкции используются много небольших, близко расположенных диагональных перегородок, которые позволяют равномерно распределить приложенные нагрузки. Биоинженеры доказали, что копирование структуры *Euplectella aspergillum* улучшило бы общую прочность строительных конструкций на 20-23% без необходимости добавления дополнительного материала.

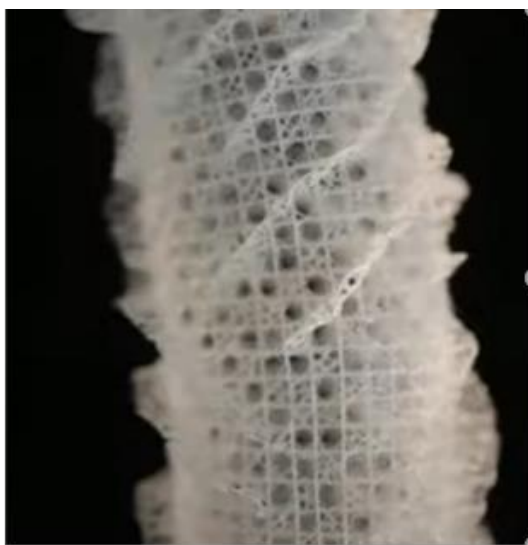


Рисунок 1.

Нами позаимствована идея применения биомиметической модели морской губки в качестве несущей конструкции медицинской трости и общие закономерности геометрических размеров модели. Таким образом, целью нашего исследования стала разработка конструкции медицинской трости на основе биомиметической модели скелета морской губки и исследование ее механических свойств.

Второй существенной частью теоретического исследования было определение возможных технологий производства выбранной конструкции медицинской трости. Для нас было очевидным, что реализация предложенной конструкции возможна посредством применения аддитивных технологий. Аддитивные технологии (Additive Manufacturing) – метод создания трехмерных объектов, деталей или вещей путем послойного добавления материала: пластика, металла, бетона. Такие трехмерные или

3D-объекты создаются с помощью 3D принтеров. Название технологий произошло от английского слова add – добавлять. Технологии получили широкое применение в различных сферах человеческой деятельности. 3D принтеры доступны для исследователя, однако выбор подходящего варианта также потребовал исследовательских усилий.

Мартыненко А. [2] рассматривает запущенный в коммерческое производство 3D принтер непрерывной печати (конвейерный). Разворот рабочей плоскости принтера и установка конвейера в качестве подложки позволяет осуществить печать очень длинных изделий, что необходимо при производстве тростей. Материал статьи позволяет выбрать способ производства готового изделия – печать на конвейерном 3D принтере.

Третьей существенной частью теоретического исследования стало исследование вариантов и обоснование выбора пластика для 3D печати медицинской трости.

А. Kausar [3] довольно подробно рассматривает полиамидные армированные (композитные) термопластики, их физические свойства и методы производства. Практически, на основе лабораторных испытаний, доказывається их превосходство над обычными термопластиками (ABS, PETG и т.д.). Согласно этой статье можно в качестве основного конструкционного материала выбрать один из композитных термопластиков.

В источнике [4] приводятся некоторые значения физических свойств термопластиков (модуль Юнга, предел текучести и т. д.), необходимые для теоретических расчётов.

На ресурсе [5] представлена существующая на рынке марка композитного пластика UltraX и его физические свойства. На основании данных, представленных на сайте, в качестве основного конструкционного материала был выбран этот термопластик. Данные из паспорта продукции были использованы для сравнительного анализа.

На ресурсе [6] и ресурсе [7] представлены физические свойства термопластика ABS, и термопластика PETG, которые использованы для

сравнительного анализа. Нами также изучены размещенные в свободном доступе патенты на трости медицинские (костыли).

Патент А61Н3/02 [8], выдан Смирнову Г.В., Вешуткину В.Д., Буйловой Т.В. Трость содержит ручку с трубкой и силовой элемент. Силовой элемент выполнен в виде трубки с цилиндрическими утолщениями на концах, на одном конце которой имеется втулка с винтами по периметру, а на другом конце закреплен защищенный трубчатым корпусом упругий элемент с тензодатчиками, соединенными в мостовую измерительную схему и подсоединенными с помощью кабеля к измерительной аппаратуре. Технический результат – повышение точности регистрации нагрузки на ортопедическую трость.

Патент 2601702 [9], выдан Цыганов Э.П. Опорная трость для определения степени несостоятельности больных суставов и мышц нижних конечностей, содержащая опорную стойку, выполненную из двух вставленных один в другой с возможностью продольного перемещения наружного и внутреннего цилиндров, один из которых имеет рукоятку и соединен с имеющим устройство отсчета деформации деформирующимся элементом, опирающимся на другой цилиндр, образуя вместе с ним электронный или пружинный динамометр, фиксирующий пиковые значения деформации за счет силовой нагрузки на демпфирующий элемент, вызывающий образование электросигнала или изменение длины пружины.

Предложены также другие различные устройства, позволяющие расширить потребительские свойства опорной трости для инвалидов, например, удобство пользования, эксплуатационные возможности (патенты: № 2007156 (1990), А45В 3/00; № 1694096 (1991), А45В 7/00; № 2060710 (1996), А45В 3/00; № 234108 (2008), А45В 3/00; № 2473324 (2013), А45В 3/00).

Размещенные в свободном доступе патенты не содержат аналогов предлагаемой нами конструкции медицинской трости.

2. Исследовательская часть




(эксперименты, опросы, методика исследования и пр.)

В ходе исследования был проанализирован интернет – рынок медицинских тростей различных ценовых категорий. Были выявлены основные проблемы, требующие решения.

В ходе анализа выбраны и изучены три самые популярные модели трости. В таблице 1 представлены основные характеристики и недостатки, отмеченные покупателями.

Таблица 1

Анализ рыночных предложений изделий «трость медицинская» и отзывов покупателей

№ п/п	Фото	Цена, рублей	Масса, кг	Мах. нагрузка, кг	Недостатки и
Образец 1		1 399	1,0	90	Низкая прочность изделия
Образец 2		1 989	2,0	110	Высокая масса
Образец 3		3 759	1,2	120	Высокая цена

Таким образом, можно сделать вывод о том, что основные недостатки, требующие устранения – высокая масса и низкая прочность. Для их устранения можно изменить материал и технологию изготовления, использовать новую структуру несущей конструкции трости. При этом изделие должно оставаться доступным для обычного покупателя – иметь низкую цену.

3. Практическая часть

(подробное описание реализации проекта с фотографиями / картинками / графиками и т.д. – конкретные результаты вашего труда)

3.1. Структура скелета морской губки и его механические свойства

Важный этап исследования – поиск новых решений по улучшению конструкции трости с целью сокращения массы, при сохранении прочностных характеристик. Одним из самых популярных решения, применяемых для сокращения массы изделий – использование полых и ячеистых структур.

В ходе анализа различных структур и их применений, были найдены статьи в которых рассматривалась структура, моделирующая скелет морской губки рода *Euplectella aspergillum* и превосходство такого типа структур над аналогичными ячеистыми конструкциями.

Морские губки относятся к типу водных, преимущественно морских, многоклеточных животных, ведущих прикрепленный образ жизни (рисунок 2, приложение 1).

Минерализованная скелетная система губки вида *Euplectella aspergillum* (цветочная корзинка Венеры) образована стекловидными элементами (спикулами) состоящими из центрального белкового ядра, окруженного чередующимися концентрическими слоями консолидированных наночастиц кремнезема (диоксид кремния, SiO_2) и тонкими органическими прослойками (рисунок 3, приложение 1). Спикулы организованы таким образом, чтобы формировать квадратную сетку, усиленную двумя пересекающимися наборами парных диагональных распорок, создавая подобный шахматной доске узор чередующихся открытых и закрытых ячеек.

Сетчатые решетки с открытыми ячейками, такие как те, что встречаются в скелетной системе губки, обычно используются в инженерном контексте из-за их меньшего веса, высокого поглощения

энергии и способности контролировать распространение акустических и тепловых волн. Как правило, свойства и функциональность таких геометрических фигур зависят от типа и характеристик связи их узлов.

Влияние многослойной архитектуры спикул на замедление распространения трещин и на увеличение прочности на изгиб и сжатие уже подвергались рассмотрению в научной литературе, но потенциал механических преимуществ двухдиагональной квадратной решетки, состоящей из спикул, не нашел пока широкого применения. Именно такая структура показалась нам наиболее подходящей для несущей конструкции медицинской трости.

3.2. Выбор материала и структуры несущей конструкции медицинской трости

На следующем этапе исследования, была выбрана технология и материал для производства трости.

Предполагая изготовление медицинской трости с использованием аддитивных технологий печати конвейерным 3D принтером (рисунок 4, приложение 1), в качестве основного конструкционного материала мы выбрали термопластик. Именно этот материал соответствует требованиям, которым должно отвечать готовое изделие: устойчивость к погодным условиям (влага, ультрафиолет, высокие и низкие температуры), износостойкость и легкость.

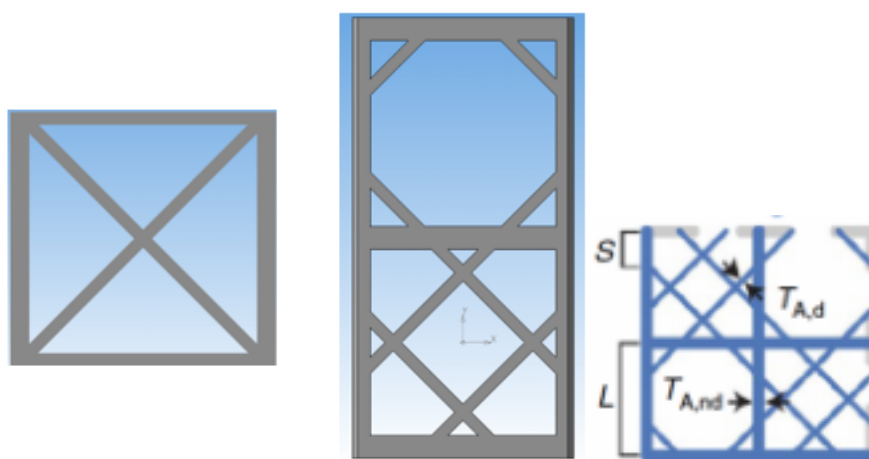
Выбор термопластиков пригодных для 3D печати достаточно большой (таблица 2, приложение 1). Анализ имеющихся данных позволяет утверждать, что PLA и ABS термопластики не подходят для решения поставленных нами задач из-за малой устойчивости к влияниям внешней среды. Выбор между ASA, PETG, FormaX, UltraX пластика был сделан на основе расчёта отношения стоимости одного грамма материала, к 1 МПа выдерживаемых напряжений (таблица 3, приложение 1). По этому показателю безусловным лидером является PETG пластик. UltraX пластик,

не смотря на более высокую стоимость, привлекает значительной прочностью и износостойкостью.

Для проведения испытаний были выбраны контрольный образец в виде полый трубки (далее образец 1) и две наиболее перспективные структуры несущей конструкции медицинской трости, реализация которых возможна с применением 3D печати: решетка с квадратными двухдиагональными ячейками (образец 2) и решетка, моделирующая упрощенную структуру губки (образец 3) (рисунок 5, приложение 1). Их элементарные ячейки представлены на рисунок 2.

Моделирование экспериментальных образцов выполнено в Системе КОМПАС-3D V14 (САПР КОМПАС-3D). Образцы предполагают одинаковый расход материала, имеют одинаковую высоту и площадь поперечного сечения.

Размеры моделей рассчитывались с учетом возможностей 3D принтера и оборудования, для измерения механической прочности, которые были использованы для проведения реального эксперимента.



$$T_{And} = 0.1 L; T_{Ad} = 0.05 L; S = L / (\sqrt{2} + 2)$$

Рисунок 2. Элементарные ячейки исследуемых структур.

Проведя симуляционные испытания, мы измерили механическое напряжение, возникающее в образцах с различными структурами под действием силы 500 Н. Результаты испытаний представлены в таблице 3 и на рисунок 6-15 (приложение 1).

Зависимость механического напряжения от вектора нагрузки

Угол между вектором нагрузки и перпендикуляром к оси образца, °	Максимальное механическое напряжение при векторе нагрузки 500 Н, МПа		
	образец 1	образец 2	образец 3
90	17	95	61
45	261	297	160
30	313	338	167
0	354	353	193

Анализ результатов симуляции выявил значительные отличия в деформациях образцов. При осевой нагрузке минимальное механическое напряжение возникло в контрольном образце – 17 МПа, 61 МПа у образца 3 и 95 МПа у образца 2. Однако значение поперечных напряжений при одинаковой ориентации вектора нагрузки в 1,5 и 2 раза меньше у биомиметической модели.

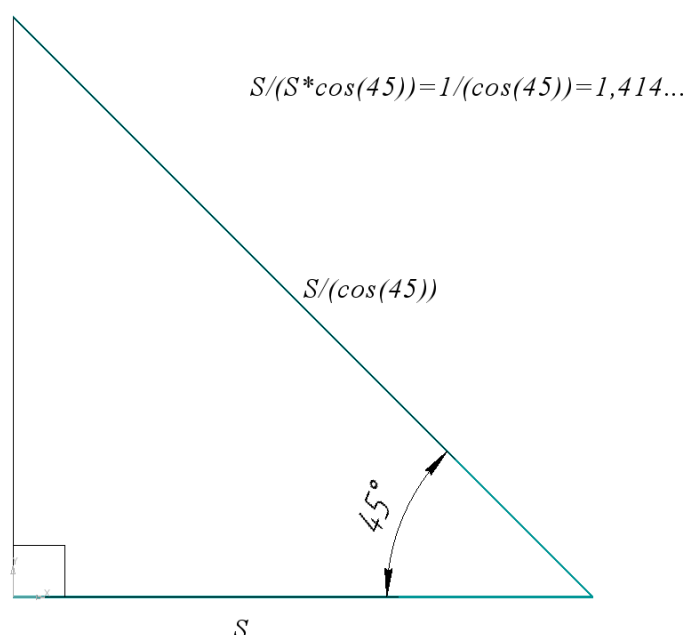
3.2. Выбор технологии производства медицинской трости

Так как несущая конструкции трости – сложная ячеистая структура, изготовление традиционными методами (литье, прокат, механическая обработка и сварка изделия по частям) значительно затруднено или вообще невозможна, был подобран относительно новый и развивающийся метод производства – а именно 3D печать на конвейерном FDM принтере. Такой процесс позволяет создавать недоступные для традиционных методов конструкции, по сути являясь единственным возможным вариантом для производства изделия, выполненного на основе выбранной структуры.

Среди всех возможных типов 3D принтеров был выбран конвейерный 3D принтер по нескольким причинам:

- конвейерный принтер позволяет печатать всё изделие целиком, тем самым устраняя необходимость сборки отдельных частей и уязвимости, связанные с не монолитностью структуры.

- печать слоев под углом в 45° позволяет увеличить общую площадь контакта между слоями (в 1,414 раза), тем самым повышая итоговую прочность изделия:



За выбором технологии производства последовал выбор материала изготовления. Материал трости должен отвечать следующим требованиям:

- устойчивость к погодным условиям (ультрафиолетовое излучение, вода, перепады температур);
- устойчивость к органическим загрязнителям;
- совместимость с 3D FDM технологией печати.

Все материалы, отвечающие трём представленным критериям можно подразделить на две группы: металлы и термопластики. Металлы, хоть и обладают повышенной устойчивостью к физическим устройствам, значительно удорожают процесс 3d печати и не подходят для устранения выявленных недостатков. Поэтому дальнейший сравнительный анализ производился только среди термопластиков, представленных в таблице 4.

Таблица 4

Сравнительный анализ термопластиков

Пластик	Стоимость, руб./г.	Плотность, г./см ³	МАХ напряжение на сжатие / изгиб, МПа	Температурный диапазон, °С	Стоимость 1 МПа прочности на сжатие, руб	Стоимость 1 МПа прочности на изгиб, руб	Сумма, руб.
PLA	≈ 1,7	1,25	77,4 / 94,2	-20/+40	-	-	-
ABS	≈ 1,6	1,05	49,3 / 65,4	-40/+90	-	-	-
ASA	≈ 2,5	1,08	56,5 / 69,5	-40/+80	0,044	0,036	0,08
PETG	≈ 1,2	1,30	51,7 / 76,1	-40/+70	0,023	0,016	0,039
FormaX	≈ 7,3	1,00	108,8 / 74,8	-60/+105	0,067	0,098	0,165
UltraX	≈ 10,0	1,10	240 / 300	-60°C / +150	0,034	0,06	0,096

Сравнительный анализ свойств некоторых известных термопластиков, позволяет утверждать, что PLA и ABS не подходят для решения поставленных нами задач из-за малой устойчивости к влиянию внешней среды.

Выбор между ASA, PETG, FormaX, UltraX пластиками был сделан на основе расчета отношения стоимости одного грамма материала, к 1 МПа выдерживаемых напряжений. По этому показателю безусловным лидером является PETG пластик. Однако UltraX пластик, не смотря на более высокую стоимость, привлекает значительной прочностью и износостойкостью.

3.4. Исследование механической прочности образцов

Для оценки механической прочности исследуемых структур, по разработанным ранее моделям, были напечатаны 10 образцов из PETG

пластика по 5 каждой структуры (рисунок 16, приложение 1). Испытания простой трубки не проводились.

Измерение предела прочности образцов при сжатии производилось с использованием гидравлического пресса ПГМ 50 МГ4 с максимальной нагрузкой до 5 тонн, в лаборатории кафедры СМИК БГТУ им. В.Г. Шухова.



Рисунок 3. Измерения на гидравлическом прессе.

Полученные результаты представлены в таблицах 5 и 6.

Таблица 5

Биомиметическая модель решетки

Измеряемая величина № образца	Разрушающая осевая нагрузка, кН	Предельная деформация, мм
1	0,885	1,06
2	0,830	1,02
3	0,840	1,12
4	0,850	1,04
5	0,835	1,06
Среднее	0,852	1,07

Таблица 6

Решетка с квадратными двухдиагональными ячейками

Измеряемая величина № образца	Разрушающая осевая нагрузка, кН	Предельная деформация, мм
1	0,230	0,41
2	0,225	0,33
3	0,220	0,44
4	0,230	0,38
5	0,215	0,52
Среднее	0,223	0,42

Анализ полученных результатов показывает, что образцы на основе структуры синцития морской губки демонстрируют сравнительно высокую устойчивость к осевым нагрузкам и упругость. Их разрушающая осевая нагрузка на 280%, а предельная деформация на 150 % превышает такие же показатели образцов с двухдиагональными решетками.

Комплекс симуляционных испытаний и лабораторных позволил нам сделать обоснованный выбор структуры несущей конструкции разрабатываемого медицинского изделия. Биомиметическая модель

продемонстрировала свойства, перспективные для решения задач дальнейшей разработки медицинской трости.

3.4. Построение 3D модели медицинской трости и симуляция исследования ее механических свойств

Построение модели готовой медицинской трости включало разработку удобной для хвата всей рукой ручки трости (длина широкой поверхности ручки – 11 см) и упора – переходника (рисунок 17, приложение 1). Затем обе детали были совмещены с несущей конструкцией (рисунок 4).

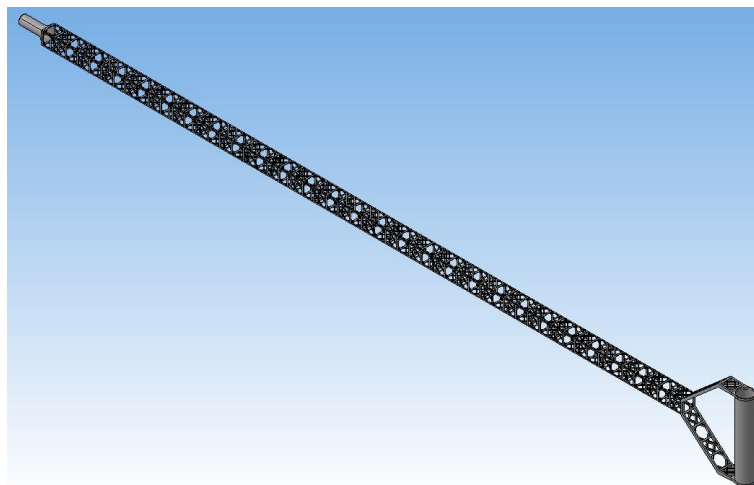


Рисунок 4. Внешний вид модели готового изделия.

При эксплуатации медицинской трости вектор нагрузки может быть сориентирован практически вдоль оси, однако не полная площадь контакта упора с поверхностью может вызывать значительные напряжения изгиба. Поэтому симуляционные испытания разработанной модели средствами САПР КОМПАС-3D были проведены для двух вариантов упора частичного (рисунок 5) и полного. Конструкционный материал – термопластик UltraX. Визуализация испытаний представлена на рисунках 18-19 (приложение 1), а результаты прочностного анализа модели в таблице 7.

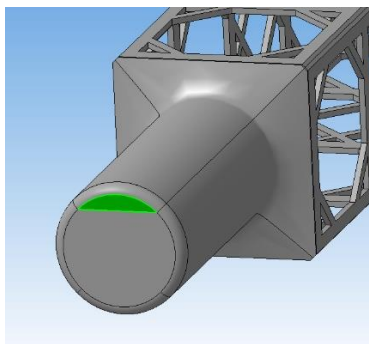


Рисунок 5. Область контакта с поверхностью при частичном упоре (зеленая зона).

Таблица 7

Результаты прочностного анализа модели медицинской трости

Тип упора	MAX напряжение изгиба, МПа	MAX напряжение сжатия, МПа
Полный	220	142
Частичный	284	193

Из таблицы видно, что максимальные напряжения во время испытаний не превысили пороговых для пластика UltraX (240/300 – изгиб сжатие соответственно). Поэтому, можно предположить эксплуатационную пригодность изделия, выполненного на основе разработанной модели.

4. Выводы и перспективы дальнейших исследований

В ходе выполнения работы мы разработали конструкцию медицинской трости на основе биомиметической модели скелета морской губки. Проведя симуляционные и лабораторные испытания, показали перспективность применения сетчатых конструкций такого рода для решения различных инженерных задач. Для изготовления медицинской трости по разработанной модели, были подобраны материалы и технология производства, обеспечивающая адаптацию трости под конкретного пользователя ещё на стадии проектирования. Проведенные симуляционные исследования механических свойств изделия продемонстрировали пригодность его к эксплуатации.

Несмотря на то, что все поставленные задачи были решены, возможно дальнейшее развитие проекта. Так, изучение распределения напряжений в элементах конструкции и ее доработка, может позволить сократить расход материала при сохранении прочности. В перспективе предполагается осуществить печать готового изделия, провести физические испытания и получить патент на изобретение.

Производство тростей медицинских, адаптированных под конкретного пользователя на стадии производства без использования специальных механизмов регулировки, может стать успешным стартапом.

5. Список использованных источников

1. Dmytro, K. Морская губка как вдохновение для будущих небоскребов, мостов и космических кораблей [Электронный ресурс] / K. Dmytro // Хабр. — 2020. - <https://habr.com/ru/company/ua-hosting/blog/520464/>.
2. Александр Мартыненко. Создан 3D-принтер для непрерывной печати конвейерным методом [Электронный ресурс] / М. Александр // НОВОСТИ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ. — 2017. <https://www.techcult.ru/technology/4317-3d-pechat-konvejernym-metodom>.
3. A. Kausar, ADVANCES IN CARBON FIBER REINFORCED POLYAMIDE-BASED COMPOSITE MATERIALS [Электронный ресурс] // ADVANCES IN MATERIALS SCIENCE, Vol. 19, No. — 2019. — Vol. 4, № 62. — P. 16. — <https://sciendo.com/pdf/10.2478/adms-2019-0023>.
4. Compressive Strength Testing of Plastics [Электронный ресурс]//MatWeb. — 2019.- <https://www.matweb.com/reference/compressivestrength.aspx>.
5. UltraX - параметры печати, характеристики и свойства материала [Электронный ресурс] / ООО «РЭК» ИНН: 5047143853 // Описание материалов. — 2021. — Т. Материалы X-Line. <https://rec3d.ru/rec-wiki/ultrax/>.
6. ABS-пластик: характеристики, преимущества и параметры печати [Электронный ресурс] / ООО «РЭК» ИНН: 5047143853 // Описание материалов. — 2021. - <https://rec3d.ru/rec-wiki/abs-plastik/>.
7. PETG пластик для 3D принтера [Электронный ресурс] / Вольтик // Всё о 3D печати. — 2021. - <https://voltiq.ru/petg-plastic-for-3d-printing/>.
8. <https://www.freepatent.ru/patents/2132669>
9. <https://patentdb.ru/patent/2601702>

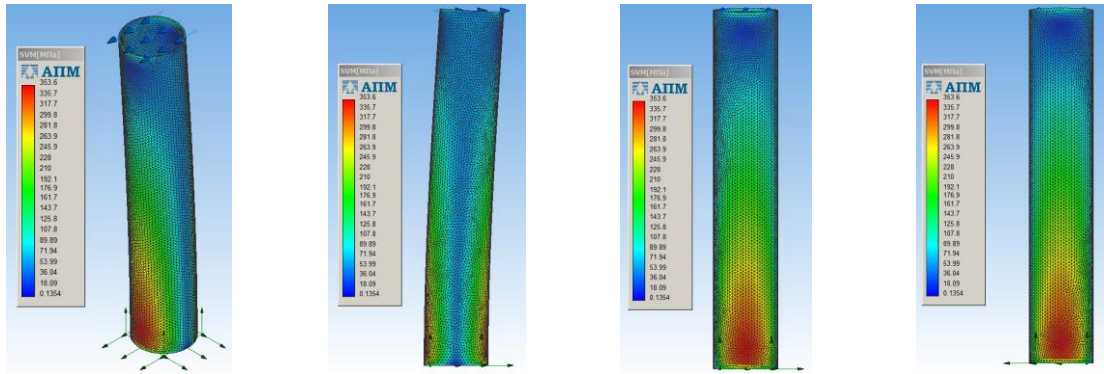


Рисунок 1. Визуализация испытания в САПР КОМПАС-3D 3d модели конструкции «труба» под углом 0°

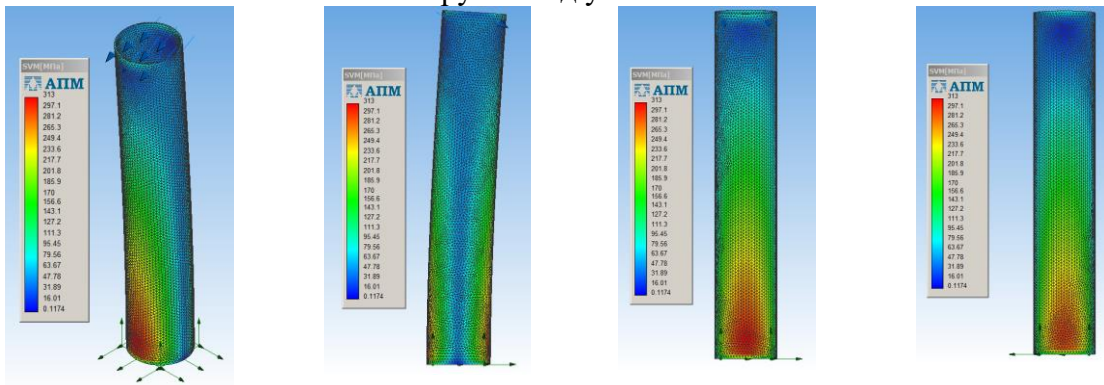


Рисунок 2. Визуализация испытания в САПР КОМПАС-3D 3d модели конструкции «труба» под углом 30°

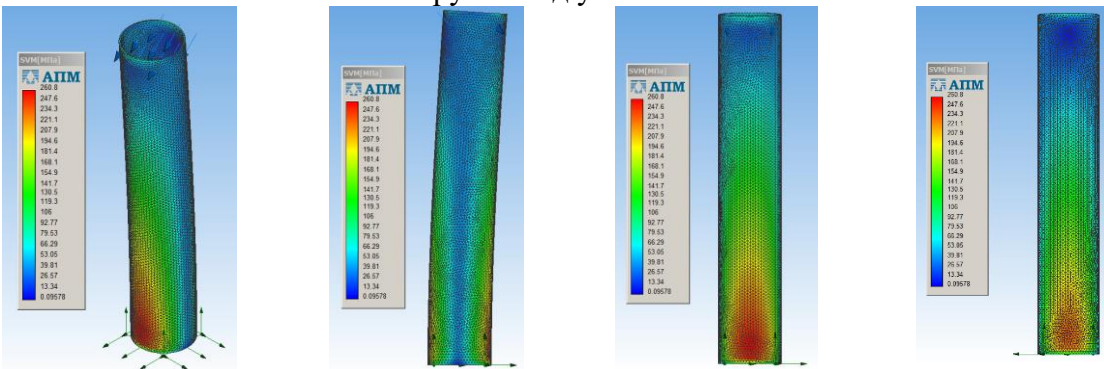


Рисунок 3. Визуализация испытания в САПР КОМПАС-3D 3d модели конструкции «труба» под углом 45°

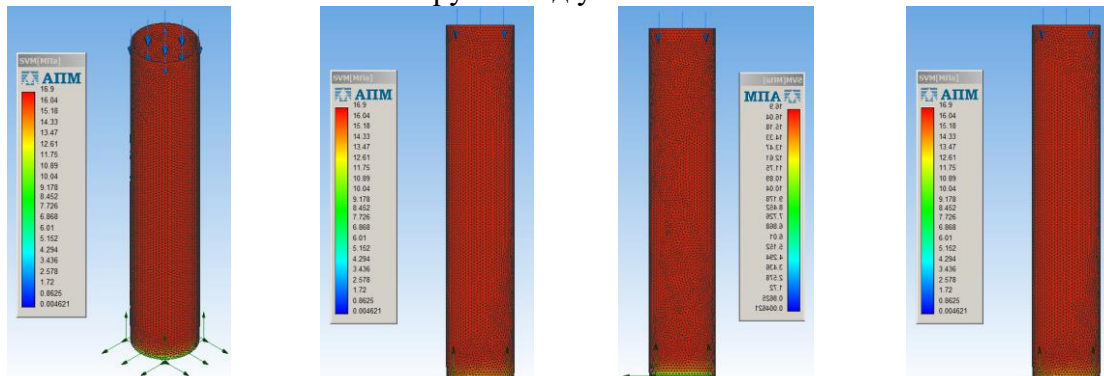


Рисунок 4. Визуализация испытания в САПР КОМПАС-3D 3d модели конструкции «труба» под углом 90°

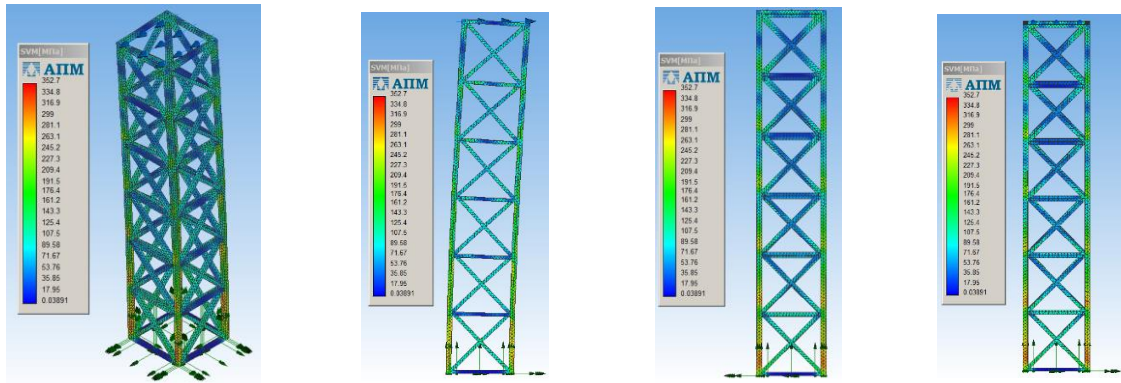


Рисунок 5. Визуализация испытания в САПР КОМПАС-3D 3d модели конструкции «квадратные балки с перекрещенными диагоналями» под углом 0°

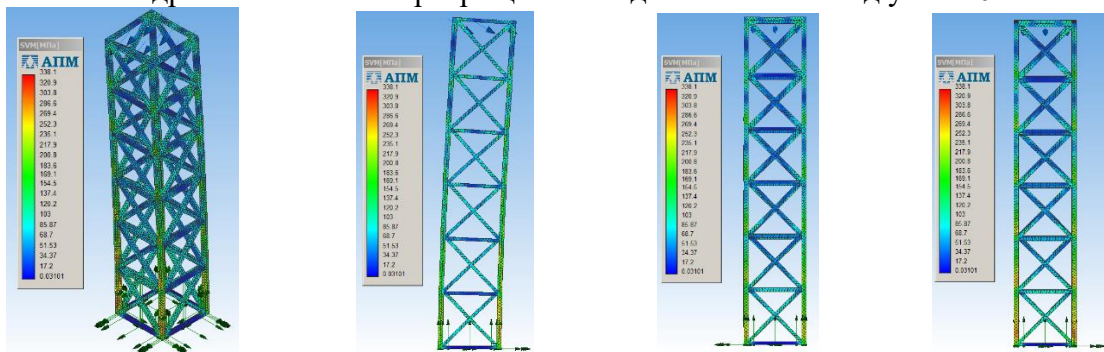


Рисунок 6. Визуализация испытания в САПР КОМПАС-3D 3d модели конструкции «квадратные балки с перекрещенными диагоналями» под углом 30°

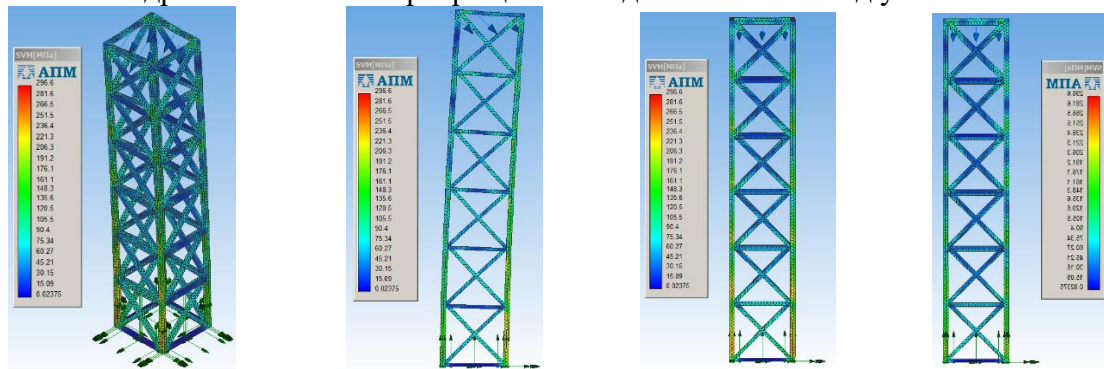


Рисунок 7. Визуализация испытания в САПР КОМПАС-3D 3d модели конструкции «квадратные балки с перекрещенными диагоналями» под углом 45°

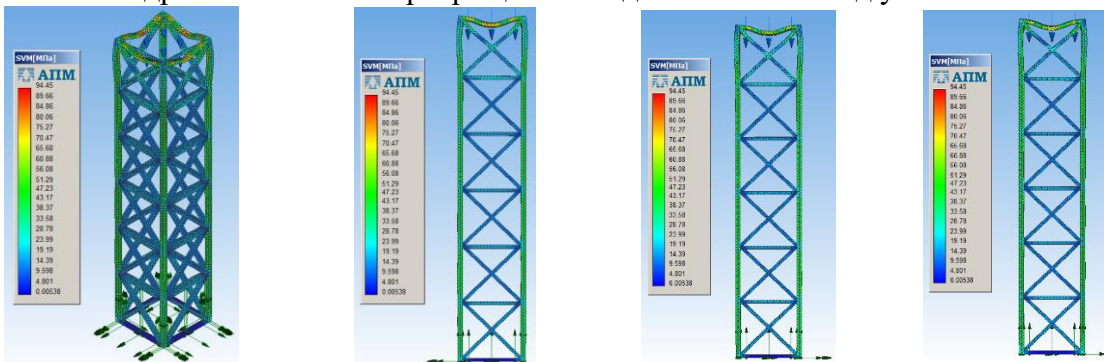


Рисунок 8. Визуализация испытания в САПР КОМПАС-3D 3d модели конструкции «квадратные балки с перекрещенными диагоналями» под углом 90°

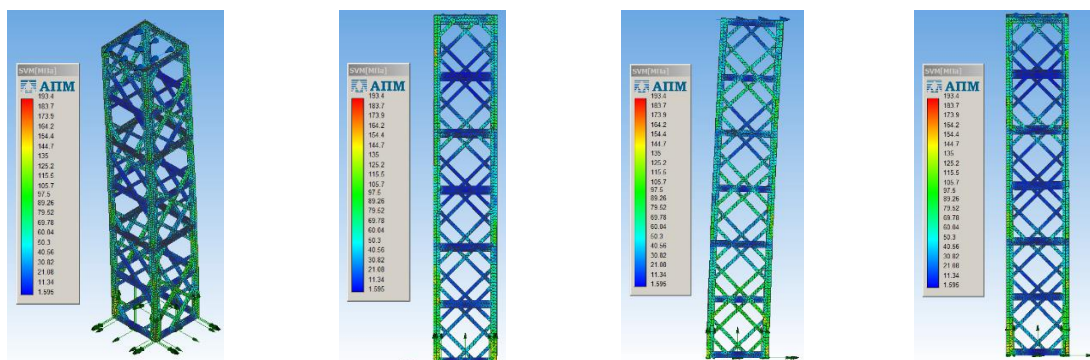


Рисунок 9. Визуализация испытания в САПР КОМПАС-3D 3d модели конструкции на основе строения синцития морской губки рода «Hexactinellida», вида «Euplectella aspergillum» под углом 0°

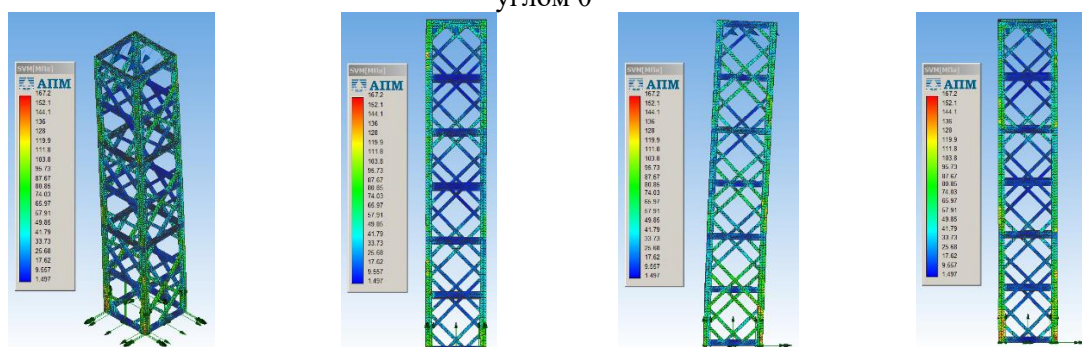


Рисунок 10. Визуализация испытания в САПР КОМПАС-3D 3d модели конструкции на основе строения синцития морской губки рода «Hexactinellida», вида «Euplectella aspergillum» под углом 30°

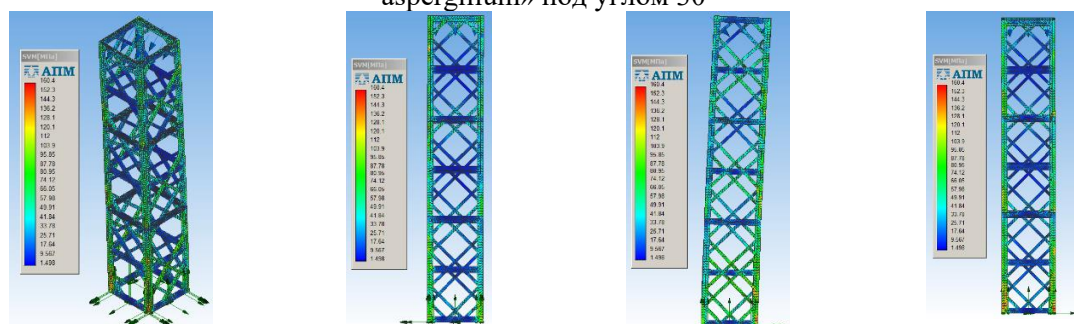


Рисунок 11. Визуализация испытания в САПР КОМПАС-3D 3d модели конструкции на основе строения синцития морской губки рода «Hexactinellida», вида «Euplectella aspergillum» под углом 45°

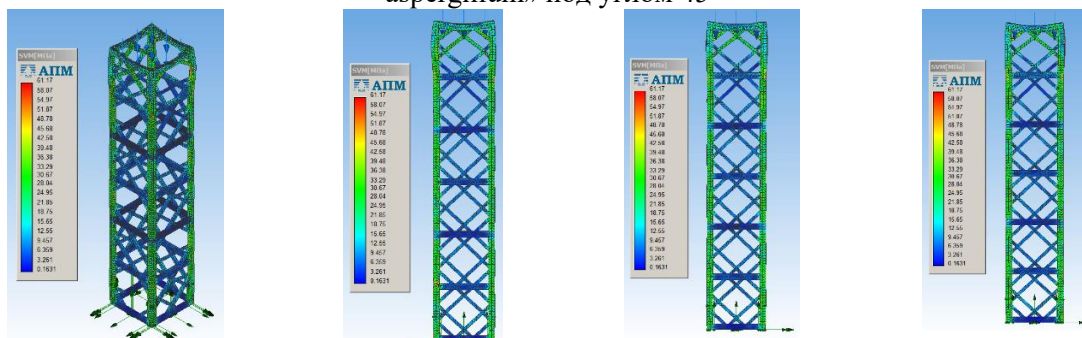


Рисунок 12. Визуализация испытания в САПР КОМПАС-3D 3d модели конструкции на основе строения синцития морской губки рода «Hexactinellida», вида «Euplectella aspergillum» под углом 90°

Отдельные характеристики термопластиков PLA, ABS, ASA, FormaX, FormaX

ТП	Стоимость, руб/г	Плотность, г/см ³	МАХ напряжение на сжатие/изгиб, МПа	Температура эксплуатации, °С	Особенности материала
PLA	≈ 1,7	1,25	77,4/94,2	от -20 до +40	Биоразлагаем, неустойчив к ультрафиолету
ABS	≈ 1,6	1,05	49,3/65,4	от -40 до +90	Неустойчив к ультрафиолету, имеет большое значение термоусадки
ASA	≈ 2,5	1,08	56,5/69,5	от -40 до +80	Имеет устойчивость к условиям внешней среды, большая термоусадка при печати
PETG	≈ 1,2	1,3	51,7/76,1	от -40 до +70	Стойкость к условиям внешней среды, большая термоусадка при печати
FormaX	≈ 7,3	1,11	108,8/74,8	от -60 до +105	Очень высокая прочность и жёсткость материала, практически отсутствующая термоусадка, устойчивость к условиям внешней среды
UltraX	≈ 10,2	1,11	240/300	от -60°С до +150	Высочайшая стойкость к физическим нагрузкам (среди ТП), истиранию, ультрафиолету, практически отсутствующая термоусадка, стоек ко многим химикатам

Проведение теоретических испытаний 3D модели медицинской трости

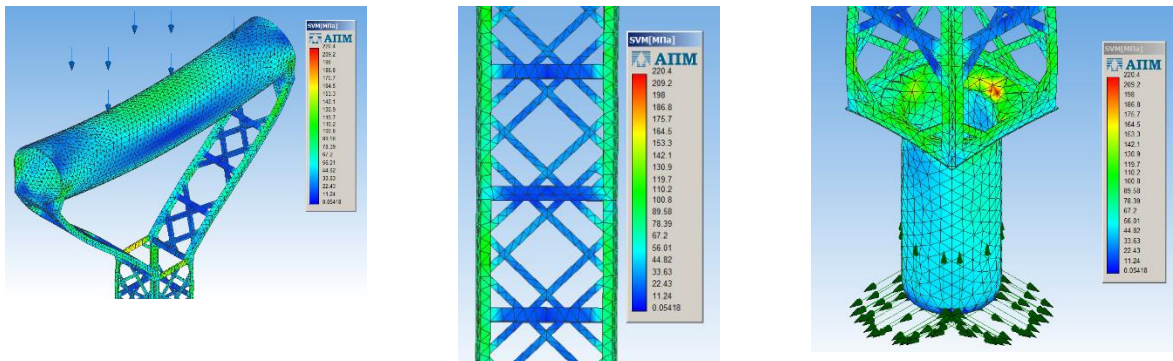


Рисунок 13. Визуализация испытания в САПР КОМПАС-3D 3d модели конструкции с упором на всю площадь

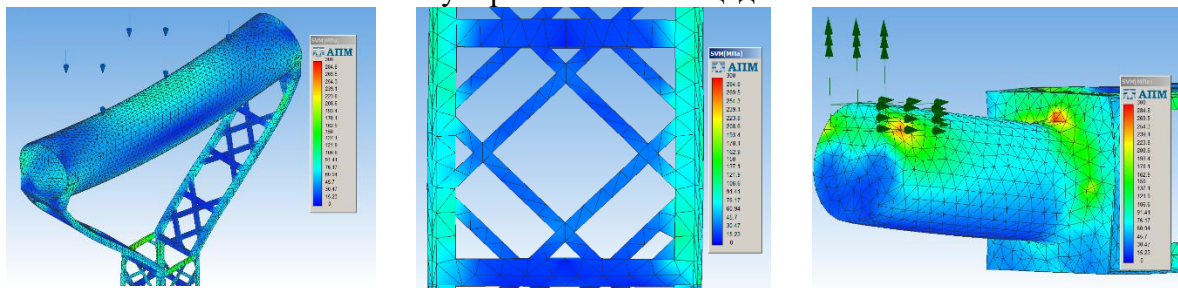


Рисунок 14. Визуализация испытания в САПР КОМПАС-3D 3d модели конструкции с упором на часть площади