Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт прикладной математики и механики
Высшая школа теоретической механики

Работа допущена к защите

Директор в.ш.т.м, д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН

_____А.М. Кривцов

«___»_____2020 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

«МОДЕЛИРОВАНИЕ КРЕПЛЕНИЙ ДЛЯ МОНТАЖА КОНТЕЙНЕРА ЗАГЛУБЛЕННОГО ТИПА»

по направлению 01.04.03 Механика и цифровое математическое моделирование

профиль 01.04.03_03 Механика и цифровое производство

Выполнил
студент гр. 3640103/80301 В.С.Веремеев

Руководитель
к.ф.-м.н., доцент М.Б. Бабенков

Санкт-Петербург
2020

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

Институт прикладной математики и механики

Высшая школа теоретической механики

УТВЕРЖДАЮ

Директор высшей школы

А.М. Кривцов

« » 20 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

студенту Веремееву Владимиру Сергеевичу, гр. 3640103/80301

1. Тема работы: Моделирование креплений для монтажа контейнера заглубленного типа

2. Срок сдачи студентом законченной работы: 8 июня 2020 г.

3. Исходные данные по работе: существующее техническое решение для крепления контейнера, справочная литература, актуальные публикации по теме исследования

4. Содержание работы (перечень подлежащих разработке вопросов): Постановка задачи об упругой деформации кронштейна. волновых процессах в цилиндрической пластине. Создание модели кронштейна. Моделирование методом конечных элементов деформации кронштейна под нагрузкой. Предложить новый вариант кронштейна, отвечающий заявленным требованиям. Предложить при необходимости изменения в креплении кронштейна к контейнеру и основанию.

5. Перечень графического материала (с указанием обязательных чертежей): не предусмотрены

6. Консультанты по работе: не предусмотрены

7. Дата выдачи задания: 22 января 2020 г.

Руководитель ВКР М.Б. Бабенков

Задание принял к исполнению 22 января 2020 г.

Студент В.С. Веремеев

РЕФЕРАТ

На 45 с., 22 рисунка, 3 таблицы, 3 приложения.

УТИЛИЗАЦИЯ МУСОРА, ЗАГЛУБЛЕННЫЙ КОНТЕЙНЕР, СИЛА АРХИМЕДА, КРЕПЛЕНИЕ, РАСЧЕТ НАГРУЗКИ, МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В данной работе изложен способ модернизации существующего кронштейна для крепления заглубленного мусорного контейнера Luowia. На основе существующей конструкции были рассчитаны нагрузки на кронштейн крепления, возникающие при эксплуатации контейнера. В ходе исследования методом конечных элементов выявлено значительное превышение возможных нагрузок для существующего кронштейна крепления. Рассчитанная нагрузка для одного из четырех кронштейнов составили 8 кН.

Предложен вариант модернизации кронштейна. Новый кронштейн на 40% тяжелее предыдущего, его масса составляет 1.8 кг. Размеры 380 * 105 * 50 мм^3. Запас прочности позволяет выдерживать нагрузку 8 кН. Данный кронштейн имеет сварную конструкцию. Также предложен вариант литого кронштейна. При достаточной прочности он имеет существенно меньшую массу - 0.7 кг. Размеры такого кронштейна составляют 200 * 90 * 70 мм^3. Однако за счет литой конструкции он имеет большую стоимость производства и его применение оправдано при больших партиях.

THE ABSTRACT

45 pages, 22 pictures, 3 tables, 3 applications

GARBAGE DISPOSAL, BURIED CONTAINER, ARCHIMEDES FORCE, FASTENING, LOAD CALCULATION, FINITE ELEMENT METHOD

This paper describes a method for upgrading the existing bracket for fixing a Luowia buried dumpster. Based on the existing design, loads on the mounting bracket that occur during the operation of the container were calculated. The finite element method study revealed a significant excess of possible loads for the existing mounting bracket. The calculated load for one of the four brackets was 8 kN.

A variant of bracket modernization is proposed. The new bracket is 40% heavier than the previous one, its weight is 1.8 kg. Dimensions 380 * 105 * 50 mm^3. This a safety by a load to 8 kN. This bracket has a welded construction. A cast bracket option is also offered. With sufficient strength, it has a significantly smaller mass - 0.7 kg. The dimensions of this bracket are 200 * 90 * 70 mm^3. However, due to the cast construction, it has a high production cost and its use is justified in large batches.

Содержание

Введение 6
Глава 1. Строение полузаглубленного контейнера Luowia 8
Глава 2. Метод конечных элементов 13
Глава 3. Моделирование прочностных характеристик кронштейна. 27
Постановка задачи. Разбиение сетки. 27
Модель существующего кронштейна 28
Модернизация кронштейна для его усиления 31
Моделирование литого кронштейна 34
Заключение 40
Список используемых источников 42
Приложение 1. 44
Приложение 2. 45
Приложение 3. 46

Введение

Возросшие объемы производства мусора и отходов диктуют новых подходов в его утилизации. Основным современным направлением в утилизации отходов является раздельный сбор мусора. Понятно, что для такого раздельного сбора требуется больше количество контейнеров для сортировки мусора. Наиболее практичными с этой точки зрения являются полузаглубленные контейнеры [14], которые имеют несколько преимуществ: большой объем, малые занимаемые площади, удобство складирования мусора и т.п.

В процессе эксплуатации таких контейнеров выяснилась не очень приятная особенность: в процессе подтопления возникает значительная сила Архимеда, которая приводит к их деформации и снижению срока службы. Особенно часто это встречается в осенне-весенний период дождей и таяния снега. Эксплуатация показала, что главным образом страдают кронштейны крепления контейнера к основанию – железобетонной плите. Таким образом, недостаток в проектировании приводит к значительным эксплуатационным расходам.

Современные системы проектирования позволяют выполнять конструкционные расчеты и закладывать необходимые параметры в конечное изделие. На примере кронштейна для крепления заглубленного контейнера были выполнены необходимые расчеты. Методом конечно-элементного анализа в программе SolidWorks были выявлены недостатки существующего контейнера. Потом были внесены необходимые изменения в конструкцию кронштейна и снова проведено моделирование, подтверждающее правильность внесенных корректировок. Данная модернизация кронштейна позволит снизить эксплуатационные издержки и продлить срок службы изделия, что влечет за собой существенную экономическую выгоду.

В первой главе данной работы анализируются технические характеристики контейнера объемом 5 м^3. Во второй главе даны краткие сведения по методу конечных элементов, использованному в расчетах. В третей главе содержатся расчеты, произведенные в программе SolidWorks. Выводы представлены в разделе заключение. Необходимые чертежи для пояснения содержатся в приложении.

Глава 1. Строение полузаглубленного контейнера Luowia

Мусорные контейнеры Luowia Collection® серии DEEP — подземный сбор и хранение бытовых отходов – это великолепное решение для объектов с большим количеством административно-хозяйственных помещений, например: больниц, детских садов, домов престарелых, интернатов, учебных заведений, школ и университетов [14].

Табл.1. Технические характеристики контейнера Luowia

Модель	Общая высота	Высота от уровня земли	Диаметр	Размер люка	Типы отходов
5000	2800мм	1250мм	1690мм	600мм	Бытовые отходы, бумага, стекло, картон, металл
3000	2750мм	1220мм	1350мм	450мм	То же
1300	2650мм	1150мм	920мм	300мм	То же

Объем самого большого контейнера составляет 5000 литров (5 м^3). Заглубленная часть этого контейнера имеет объем: _____

литров (2.8 м^3). Таким образом, сила Архимеда, выталкивающего контейнер наружу составляет: кН, здесь

ρ – плотность жидкости или газа, кг/м^3;

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

V – объём части тела, погружённой в жидкость или газ, м^3.

Контейнер, согласно инструкции, крепится 4 кронштейнами к железобетонной плите основания. Монтажный чертеж контейнера представлен в приложении 1. Все кронштейны одинаковые, тогда нагрузка от силы Архимеда на один кронштейн составит: кН.

Это довольно большое усилие, которое соответствует 700 кг веса. Понятно, что для таких нагрузок необходимо применять соответствующие расчеты на прочность, что не было сделано в процессе проектирования контейнера.

На рис. 1 представлена фотография существующего кронштейна, его сборочный чертеж приведен в приложении 2.

Рис. 1. Кронштейн для крепления контейнера.

Кронштейн состоит из стандартного уголка низкоуглеродистой стали. Размер уголка 50х50х3 мм^3. Высота кронштейна составляет 380 мм. Крепление осуществляется: к контейнеру – болт М10 (Рис.2, Приложение 1), к бетонной плите основания – анкер диаметром 16 мм (Рис. 3, Приложение 1).

Рис. 2. Место для крепления контейнера к кронштейну.

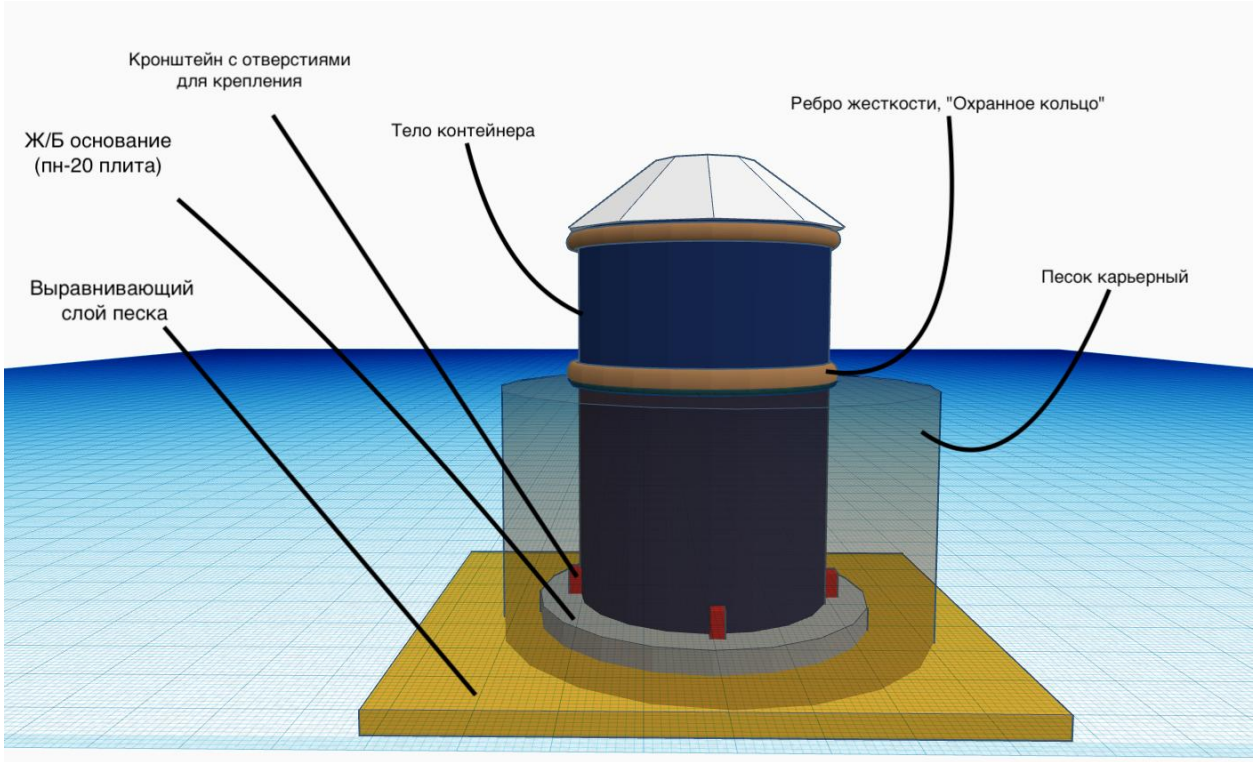


Рис. 3. Монтаж контейнера.

Для понимания сущности происходящих процессов проведем моделирование методом конечных элементов.

Глава 2. Метод конечных элементов

В настоящее время метод конечных элементов получил теоретическое обоснование и используются для решения широкого круга прикладных задач, такие как: распространение тепла; диффузия; распределение электрического поля; задачи теории поля; задачи гидромеханики; течение жидкости; задачи механики и прочности в широком спектре [9, 15, 16, 17]. Задачи могут быть самые разные, как статические, так и динамические. Идея метода конечных элементов (МКЭ) заключается в том, что что непрерывно величину можно заменить дискретной моделью, которая состоит из множества кусочно-непрерывных функций, определённых на конечном числе элементов или конечных элементов. Эти кусочно-непрерывные функции определяются с помощью непрерывной величины в конечном наборе точек необходимой области. При построении дискретной модели рассматриваемый области фиксируется конечное число точек. Это узлы или узловые точки. Значение величины в такой узловой точке считается переменной величиной. В каждой узловой точке она определена. Область определения разбивается на конечное число элементов или по-другому конечных элементов (КЭ). Эти элементы имеют общие узлы и аппроксимирует форму области. Функция аппроксимируется на каждом элементе полиномом или специальной функцией. Значения такого полинома или функции определены в узлах КЭ. Такие полиномы подбираются так, чтобы сохранялось непрерывной величина на границе элемента. По другому этот полином называют функцией элемента (ФЭ) [17]

Рассмотрим задачу конечных элементов на примере одномерной задачи о распределении тепла в стержне длины L. Нужно выполнить разбиение области на несколько отрезков фиксированной длины для получения распределения температуры T(x).

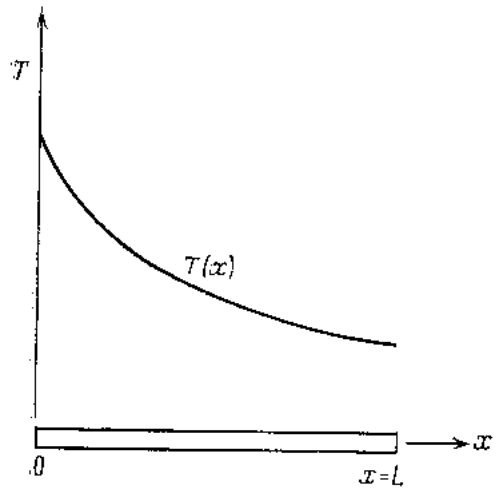


Рис. 4. Задача о распределении температуры в стержне

На оси OX определяются и фиксируются несколько точек, например, пять точек (рис. 5). Это узлы или узловые точки. Они не обязательно располагаются на равных расстояниях друг от друга.

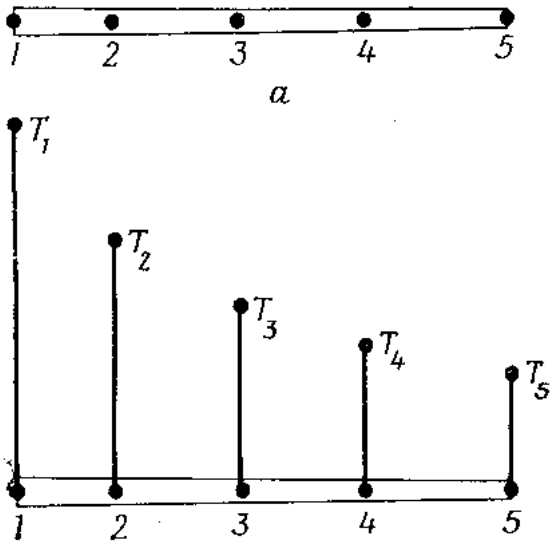


Рис. 5. Разбиение отрезка на конечные элементы

Разбивка области на конечные элементы может быть произведена несколькими способами, например: каждый элемент содержит две соседние узловые точки с образованием четырёх элементов (рис. 6а); разбиение области на два конечных элемента, которые содержат по три узла (рис. 6б).

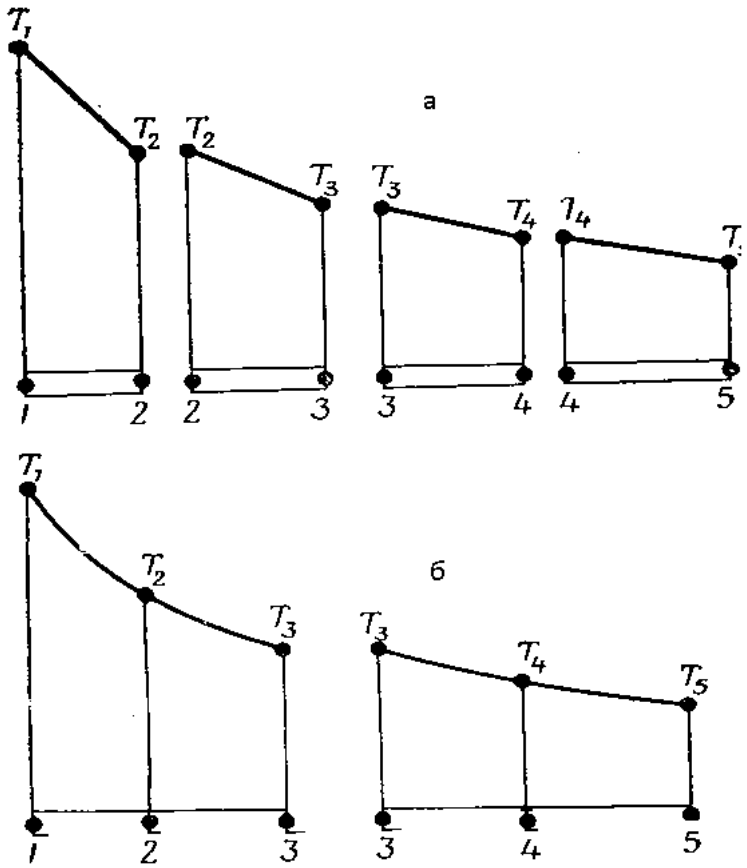


Рис. 6. Способы разбиения на конечные элементы: а) на 4 элемента с двумя узловыми точками б) на 2 элемента с тремя узловыми точками.

Возьмем в качестве функции элемента полином минимальной степени. Этот полином определяется для каждого КЭ по значениям T(x) в узлах элемента. В случае разбиения области на четыре элемента на каждый элемент приходится по два узла, соответственно функция элемента будет линейна по x, таким образом полином будет первого порядка. Результирующая аппроксимация T(x) будет состоять из четырёх кусочно-непрерывных функций, каждая из которых определена на отдельном КЭ (рис. 7а). Альтернативный способ разбиения области на два элемента с тремя узловыми точками приводит к представлению функции элемента в виде полинома второй степени. В этом случае результирующей аппроксимацией T(x) будет совокупность двух кусочно-непрерывных квадратичных функций

(рис. 7б.). Это приближение будет также кусочно-непрерывным, так как угол наклона обеих этих функций будет различным в третьей узловой точке.

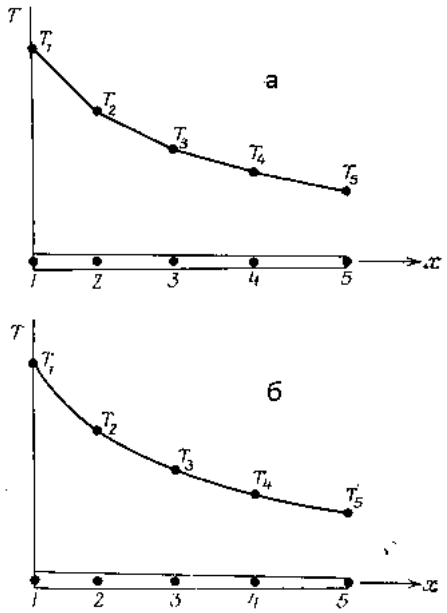


Рис. 7. Аппроксимация T(x) кусочно-непрерывной функцией первого а) и второго б) порядка

Аналогично происходит построение дискретной модели непрерывной величины, определённой в двух- или трёхмерной области. В двумерном случае элементы описываются функциями от двух аргументов (x, y). При этом чаще всего используются элементы в форме треугольника или четырёхугольника. Функции элементов изображаются теперь плоскими (рис. 8) или криволинейными (рис. 9) поверхностями, в зависимости от числа узлов в элементе.

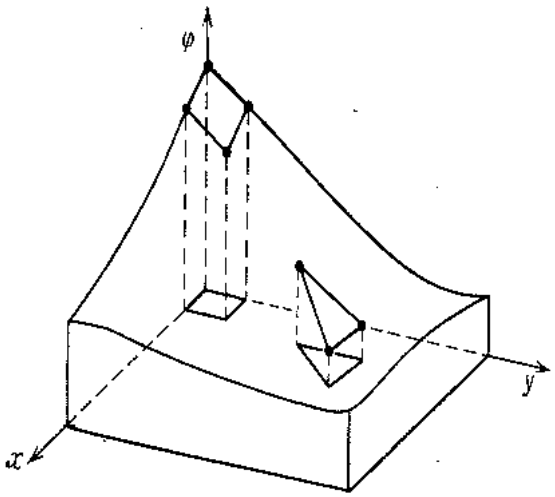


Рис. 8. Аппроксимация плоскими элементами.

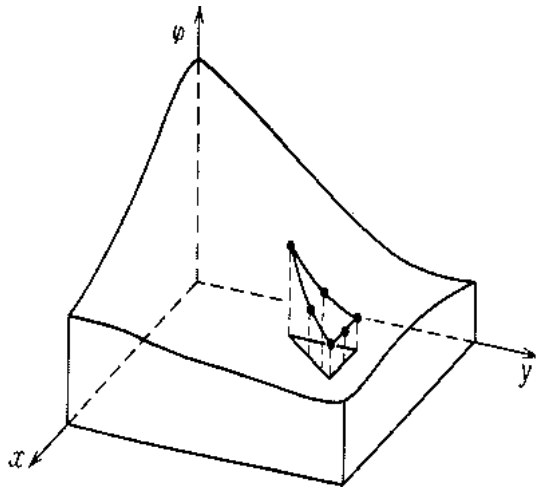


Рис. 9. Аппроксимация криволинейными элементами.

Функция элемента будет представляться плоскостью, если для данного элемента используется минимальное количество узловых точек. В случае треугольного элемента это число равняется трём, а для четырёхугольного равняется четырём. Если используемое число узловых точек больше минимального, то ФЭ будет соответствовать криволинейная поверхность. Избыточное число узлов позволяет использовать элементы с криволинейными границами. Результирующей аппроксимацией двумерной непрерывной величины T(x,y) будет служить набор кусочно-непрерывных поверхностей, каждая из которых будет определена на отдельном конечном элементе с помощью значений T(x,y) в соответствующих узловых точках.

Основная задача состоит в определении искомой функции (величины) в узловых точках. Она решается с использованием принципов вариационного исчисления (минимизации построенного функционала). Поэтому метод конечных элементов относят к вариационным методам. В нашем случае, это означает, что искомые узловые значения T(x) должны быть изменены таким образом, чтобы обеспечивалось «наилучшее» приближение к истинному распределению температуры.

Это «регулирование» осуществляется путём минимизации некоторой величины, связанной с физической сущностью задачи. Если рассматривается задача деформируемого тела, то минимизируется функционал, связанный с уравнением Гука:

$$\sigma_{ij} = \sum_{kl} C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl} \tag{1}$$

Где – тензор напряжений, – тензор деформаций, – тензор упругих постоянных. В случае изотропного твердого тела уравнения приобретают вид:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\mu}{E}\sigma_y - \frac{\mu}{E}\sigma_z$$
$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\mu}{E}\sigma_x - \frac{\mu}{E}\sigma_z$$
$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} - \frac{\mu}{E}\sigma_x - \frac{\mu}{E}\sigma_y$$
$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}$$
$$\gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}$$
$$\gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G}$$

Где E – модуль Юнга, μ – коэффициент Пуассона, ——— – модуль сдвига.

Процесс минимизации в конечном итоге сводится к решению систем линейных алгебраических уравнений относительно узловых значений функции.

Материалы в разных элементах при этом могут быть различными. Это позволяет решать задачи композитных материалов. Помимо этого, можно описывать криволинейные границы элементов, используя соответствующие криволинейные элементы. Размеры элементов могут быть различными. Это позволяет укрупнить или измельчить сеть разбиения области на элементы, в ряде случаев это позволяет также сократить время расчета при сохранении необходимой точности вычислений. В методе конечных элементов допустимо использовать сосредоточенную нагрузку, а также смешанные граничные условия задачи.

Разбиение расчётной области на конечные элементы (КЭ) – первый шаг в решении задачи. Он не имеет теоретического обоснования и основан на общих соображениях и опыте инженера, производящего расчет. Дискретизация области состоит из задания: числа КЭ, размеров КЭ, формы подобластей КЭ.

Здесь следует принимать во внимание два конкурирующих фактора: во-первых, элементы должны быть выбраны достаточно малыми, чтобы получалась хорошая сходимость результатов; а во-вторых, применение достаточно крупных элементов сокращает вычислительную работу. Компромиссным вариантом с этой стороны является неравномерная сетка разбиения КЭ.

В качестве функции элемента чаще всего применяется полином. Порядок полинома зависит от числа используемых в каждом узле элемента данных о непрерывной функции. Классификация конечных элементов может быть проведена в соответствии с порядком полиномиальных функций этих элементов. При этом рассматриваются три следующие группы элементов: - симплекс-элементы, - комплекс-элементы, - мультиплекс-элементы [1].

Симплекс-элементы отражают полиномы первого порядка. Они содержат только линейные члены. Число коэффициентов больше на единицу размерности пространства. Для 2-х мерного пространства симплексная функция имеет вид:

$$\varphi = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y$$

Для одномерного случая симплекс элемент представляет собой отрезок, для двухмерного случая это треугольник, а для трехмерного случая это тетраэдр.

Комплекс-элементам соответствуют полиномы более высокого порядка. Это обусловлено тем, что комплекс элементы имеют дополнительные узлы. При этом форма комплекс- и сипмлекс-элементов может совпадать.

Мультиплекс-элементы характеризуются тем, что имеют границы параллельные координатным осям. Они также используются полиномы высокого порядка. Применение таких элементов необходимо для выполнения условия непрерывности. Границы других элементов не имеют таких ограничений. Коэффициенты α_i могут быть определены из граничных условий в узловых точках:

$$, \textit{при } x = x_i$$

$$, \textit{при } x = x_j$$

Хотя теория МКЭ может быть представлена в различных ракурсах или акцентах, ее развитие для структурного анализа следует более традиционному подходу через принцип виртуальной работы или принцип минимальной суммарной потенциальной энергии. Подход к принципу виртуальной работы является более общим, поскольку он применим как к линейному, так и к нелинейному поведению материала. Метод виртуальной работы является выражением сохранения энергии: для консервативных

систем работа, добавленная к системе набором приложенных сил, равна энергии, накопленной в системе в виде энергии деформации компонентов структуры.

Принцип виртуальных перемещений для структурной системы выражает математическое тождество внешней и внутренней виртуальной работы:

(2)

Другими словами, суммирование работы, проделанной над системой множеством внешних сил, равно работе, накопленной в виде энергии деформации в элементах, составляющих систему.

Виртуальная внутренняя работа в правой части приведенного выше уравнения может быть найдена путем суммирования виртуальной работы, проделанной над отдельными элементами. Последнее требует использования функций силового смещения, описывающих отклик для каждого отдельного элемента. Следовательно, смещение структуры описывается откликом отдельных (дискретных) элементов в совокупности. Уравнения пишутся только для малой области отдельных элементов структуры, а не для одного уравнения, описывающего отклик системы в целом (континуума). Последнее привело бы к неразрешимой проблеме, отсюда и полезность метода конечных элементов. Уравнение (1) приводит к следующему управляющему уравнению равновесия для системы:

(3)

где

R – вектор узловых сил, представляющий собой внешние силы, приложенные к узлам системы.

K – матрица жесткости системы, представляющая собой коллективный эффект матриц жесткости отдельных элементов $\{\mathbf{k}^e\}$.

$\boldsymbol{r}$ – вектор узловых перемещений системы.

$\boldsymbol{R_o}$ – вектор эквивалентных узловых сил, представляющий все внешние эффекты, отличные от узловых сил, которые уже включены в предыдущий узловой вектор сил **R**. Эти внешние эффекты могут включать распределенные или сосредоточенные поверхностные силы, силы инерции, тепловые эффекты, начальные напряжения и деформации.

После учета ограничений опор узловые перемещения определяются путем решения системы линейных уравнений (2):

(4)

Впоследствии деформации и напряжения в отдельных элементах могут быть найдены следующим образом:

(5)

(6)

где

$\boldsymbol{q}$ – вектор узловых перемещений-подмножество вектора смещения системы $\boldsymbol{r}$, относящееся к рассматриваемым элементам.

B – матрица деформаций-смещений, преобразующая узловые смещения $\boldsymbol{q}$ в деформации в любой точке элемента.

E – матрица упругости, преобразующая эффективные деформации в напряжения в любой точке элемента.

$\boldsymbol{\varepsilon_o}$ – вектор начальных деформаций в элементах.

$\boldsymbol{\sigma_o}$ – вектор начальных напряжений в элементах.

При применении виртуальной работы уравнения (2) к системе, можно установить элемент матрицы **B**, $\mathbf{k}^e$, а также технику сборки системы матриц $\boldsymbol{R_o}$ и **K**. Другие матрицы, например $\boldsymbol{\varepsilon_o}$, $\boldsymbol{\sigma_o}$, **R** и E являются известными величинами и могут быть непосредственно рассчитаны из входных данных.

Пусть $\boldsymbol{q}$ – вектор узловых перемещений конечного элемента. Смещения в любой другой точке элемента могут быть найдены с помощью интерполяционных функций как:

(7)

где

$\boldsymbol{u}$ – вектор перемещений в любой точке (x,y,z) элемента.

N – матрица функций формы, выступающей в качестве функции интерполяции.

Уравнение (7) порождает другие уравнения, представляющие больший интерес:

Виртуальные перемещения, являющиеся функцией виртуальных узловых перемещений:

Деформации в элементах, возникающие в результате смещения узлов элемента:

где **D** – матрица дифференциальных операторов, преобразующих перемещения в деформации с использованием линейной теории упругости. Уравнение (7) показывает, что матрица **B** в (5) является

(8)

Виртуальные деформации, соответствующие виртуальным узловым смещениям элемента:

(9)

Для объема конечного элемента V^e внутренняя виртуальная работа за счет виртуальных перемещений получается путем подстановки (6) и (9) в (2):

(10)

Соответственно, матрица жесткости элементов:

(11)

Эквивалентный вектор нагрузки элемента:

(12)

Эти матрицы обычно вычисляются численно с использованием метода гаусса. Это упрощает (10) до следующего:

(13)

Поскольку вектор узловых перемещений $\boldsymbol{q}$ является подмножеством системы узловых перемещений $\boldsymbol{r}$ (для совместимости с соседними элементами), мы можем заменить $\boldsymbol{q}$ на $\boldsymbol{r}$, расширив размер матриц элементов новыми столбцами и строками нулей:

(14)

где для простоты мы используем те же символы для матриц элементов, которые теперь имеют расширенный размер, а также соответствующим образом переставленные строки и столбцы.

Суммирование внутренней виртуальной работы (14) для всех элементов дает правую часть (2):

(15)

Рассматривая теперь левую часть (2), система внешней виртуальной работы состоит из:

Работы, выполняемой узловыми силами **R**: (16)

Работы, выполняемой внешними силами $\mathbf{T_e}$ на площади элемента $\mathbf{S_e}$ (поверхностные силы), а также силами инерции $\mathbf{f_e}$ (объемные силы):

С учетом (7):

где мы ввели дополнительные матрицы элементов, определенные ниже:

Численное интегрирование удобно для их оценки. После замены $\boldsymbol{q}$ на $\boldsymbol{r}$ имеем:

(17)

С учетом (15), (16) и (17), уравнение (2) приобретает вид:

Поскольку виртуальные перемещения $\delta\boldsymbol{r}^T$ произвольны, предыдущее равенство сводится к следующему:

Сравнение с (3), показывает, что:

Матрица жесткости системы получается путем суммирования матриц жесткости элементов:

Вектор эквивалентных узловых сил получается суммированием векторов нагрузки элементов:

Глава 3. Моделирование прочностных характеристик кронштейна.

Постановка задачи. Разбиение сетки.

Для проведения статического анализа в среде моделирования Solidworks была создана геометрическая модель существующего крепления. Далее через вкладку Simulation и выбора Статического анализа можно перейти к моделированию нагрузок и реакций. Для статического анализа нам необходимо определить материал детали, крепление (фиксация модели), нагрузки и создать сетку.

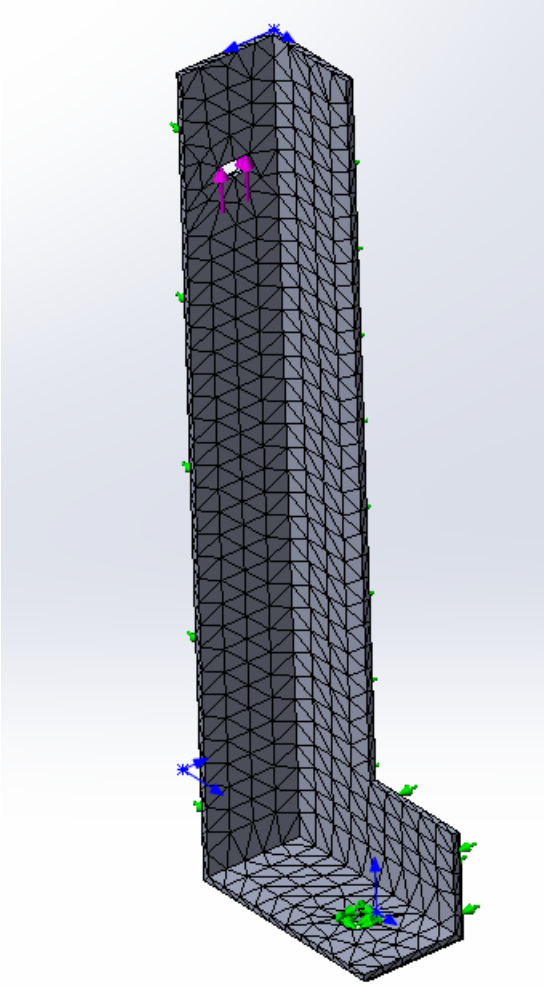


Рис. 10. Разбиение сетки для модели кронштейна.

При создании сетки происходит деление на более мелкие *конечные* элементы, соединенные в общих точках (узлах). Задача разбиения состоит в

том, чтобы сделать сетку достаточно мелкой для повышения точности, но достаточно крупной для убыстрения времени счета.

Модель существующего кронштейна

Возьмем нашу нагрузку, рассчитанную из силы Архимеда, с небольшим запасом – 8000 Ньютонов.

На модели крепления (Рис.11) красным указаны зоны, напряжения в которых достигают предела текучести, что является недопустимым при эксплуатации изделия.

Предел текучести – механическая характеристика материала, характеризующая напряжение, при котором деформации продолжают расти практически без увеличения нагрузки. С помощью данного параметра рассчитываются допустимые напряжения для металлов и других пластичных материалов.

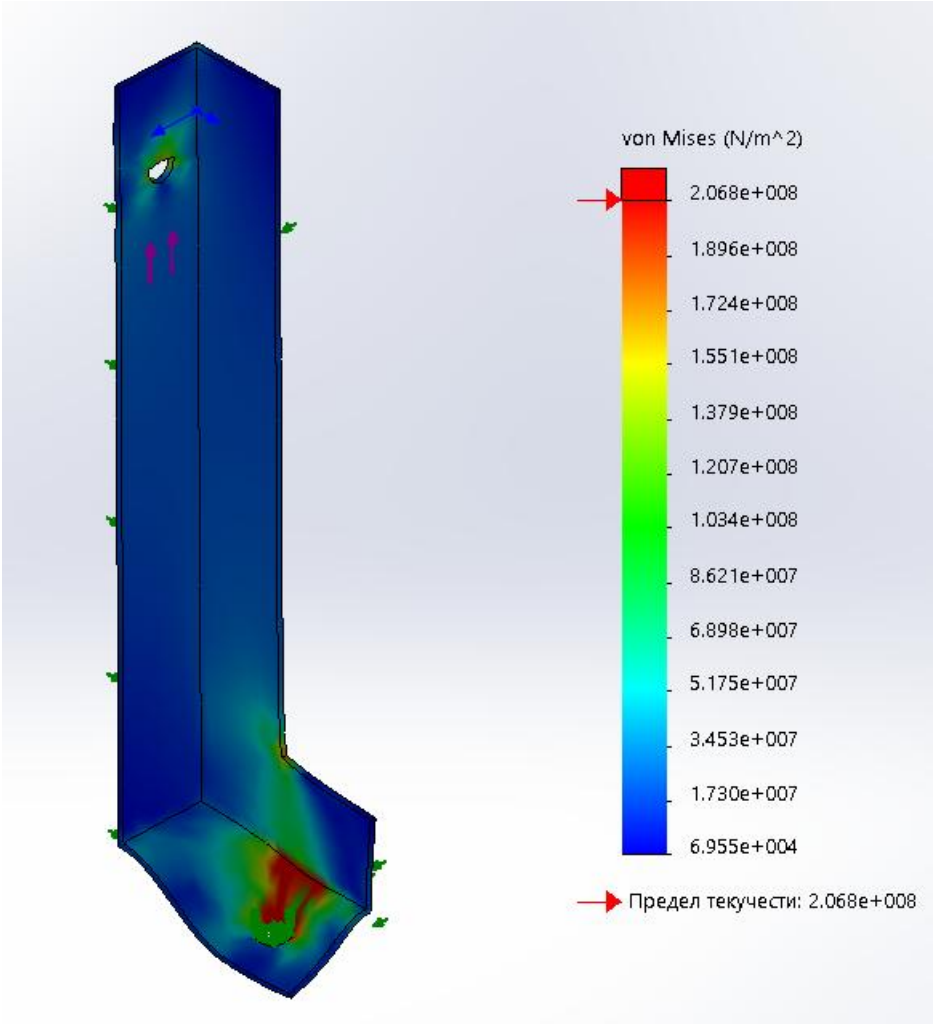


Рис. 11. Деформация кронштейна под воздействием нагрузки 8 кН.

Изменяя шкалу графика напряжений можно понять распределение нагрузки по телу крепления (Рис.12).

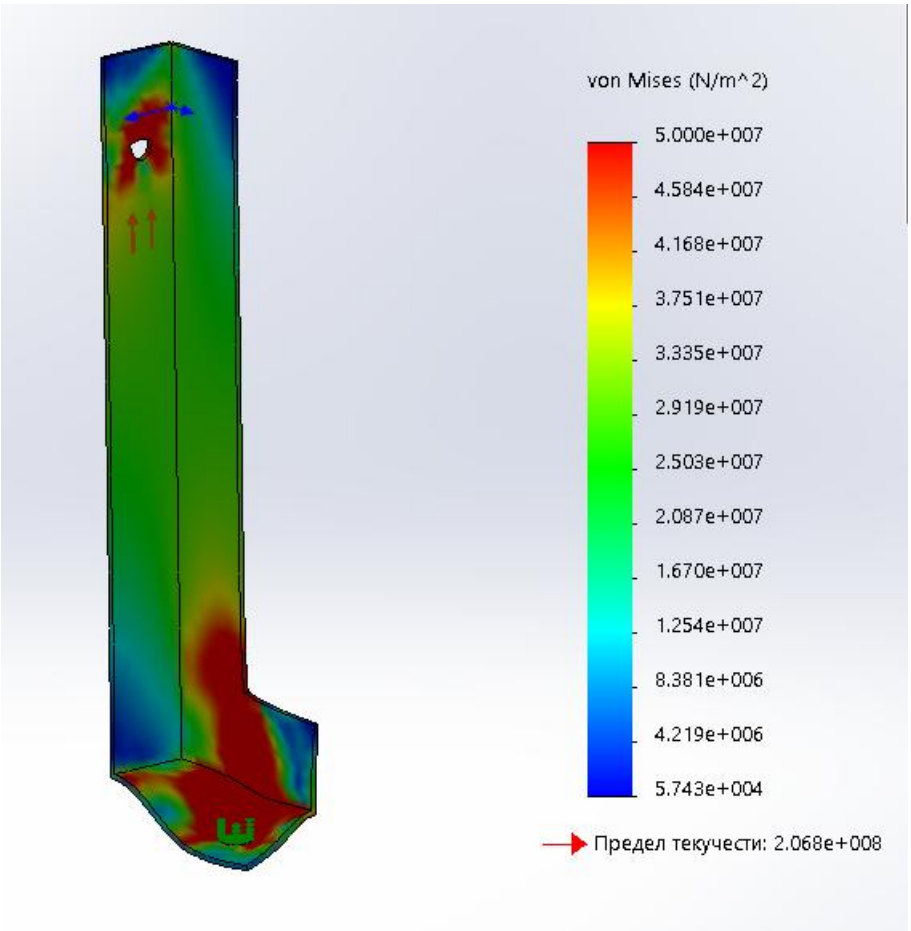


Рис. 12. Распределения напряжений под действием нагрузки 8 кН.

На Рис.13 указаны максимальные перемещения детали под нагрузкой. Из-за общего растяжения видно, что верх крепления смещается по оси Z больше всего.

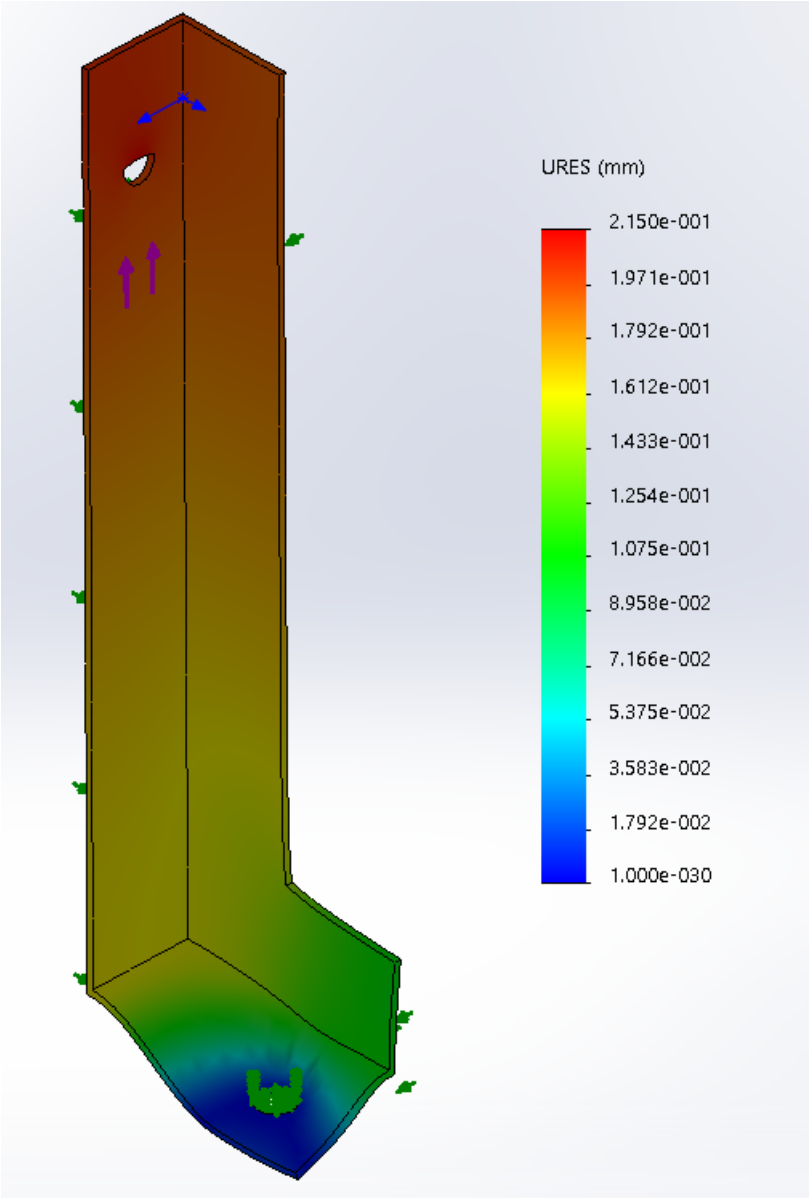


Рис. 13. Распределения деформаций под действием нагрузки 8 кН.

На Рис.14 указаны места с запасом прочности менее 1,5 (запас прочности берется с дополнительным коэффициентом, чтобы учесть нагрузки, которые могли быть не учтены при расчете), что явно указывает на неспособность конструкции выдерживать заявленные нагрузки. Так же указана точка с минимальным запасом прочности 0.21 у крепления дна модели.

Наличие запаса прочности должно обеспечить дополнительную надёжность конструкции. Это важно особенно для ответственных деталей конструкции и помогает избежать катастрофы в случае возможных ошибок.

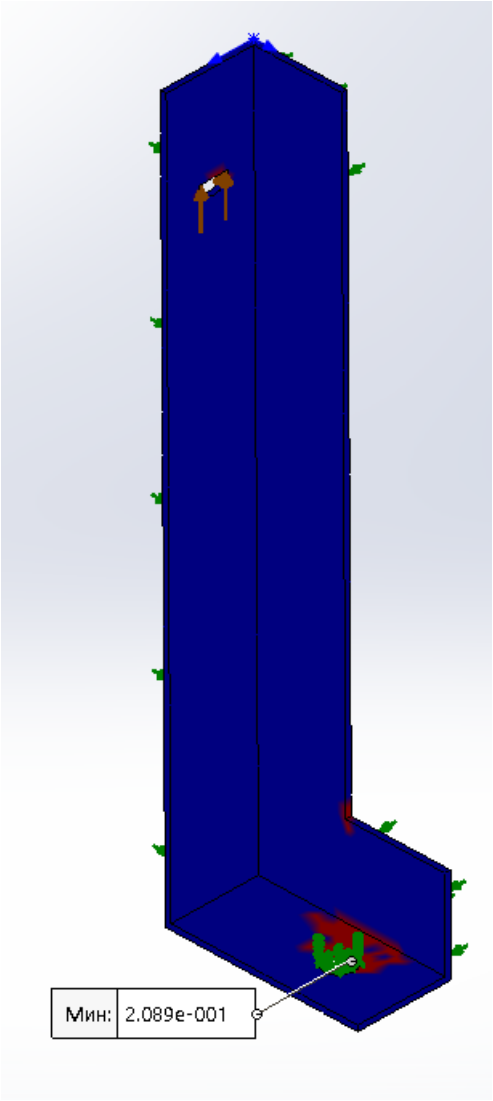


Рис. 14. Коэффициент запаса прочности под действием нагрузки 8 кН.

Модернизация кронштейна для его усиления

Простейшее усиление кронштейна можно провести, добавив снизу еще один такой же уголок (Рис. 15).

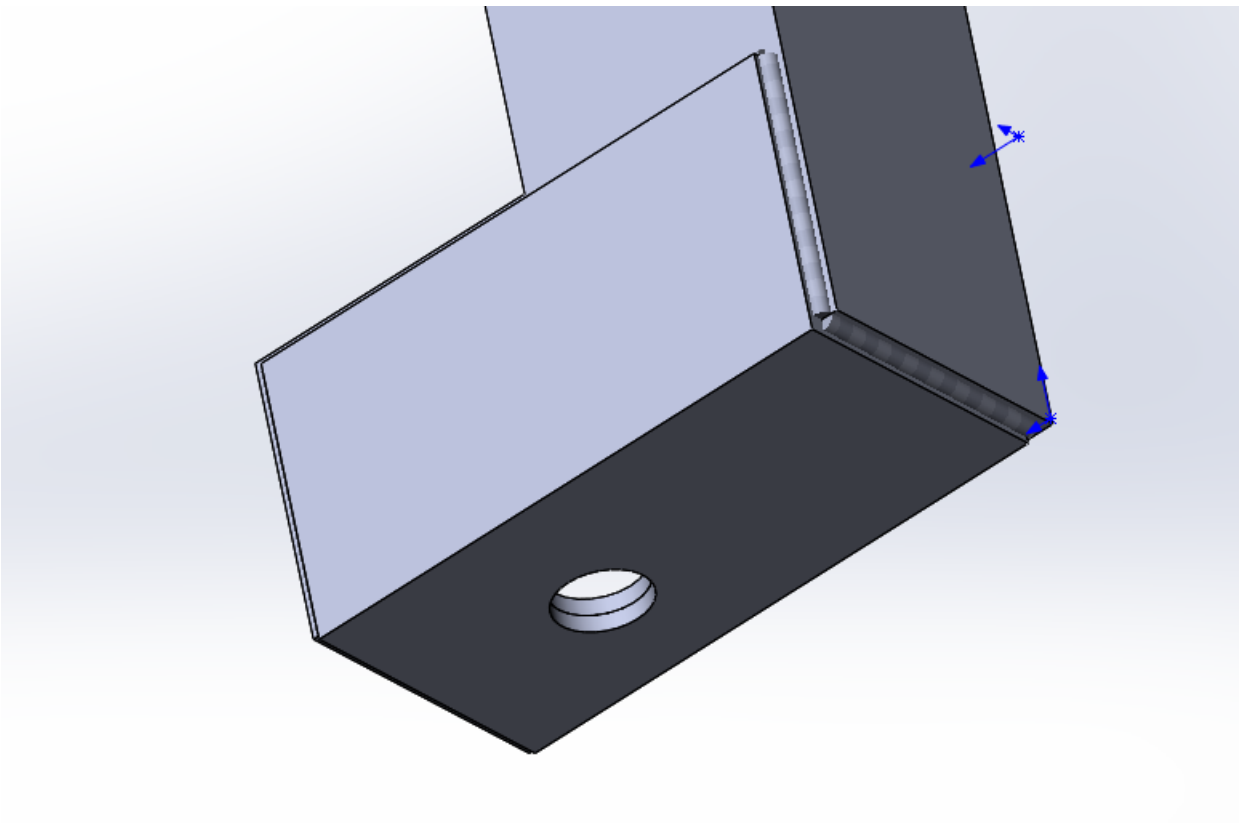


Рис. 15. Усиление кронштейна вторым уголком.

Моделирование напряженного состояния с новым уголком представлено на Рис. 16. Напряжения при этом значительно снизились. Коэффициент запаса прочности вырос и составляет в худшем случае 0.5 (Рис .17). Напряжения все еще выходят за пределы допустимых, а также есть проблемные места с запасом прочности менее 1. Минимальный запас прочности 0.5 указан выноской на модели (Рис.17).

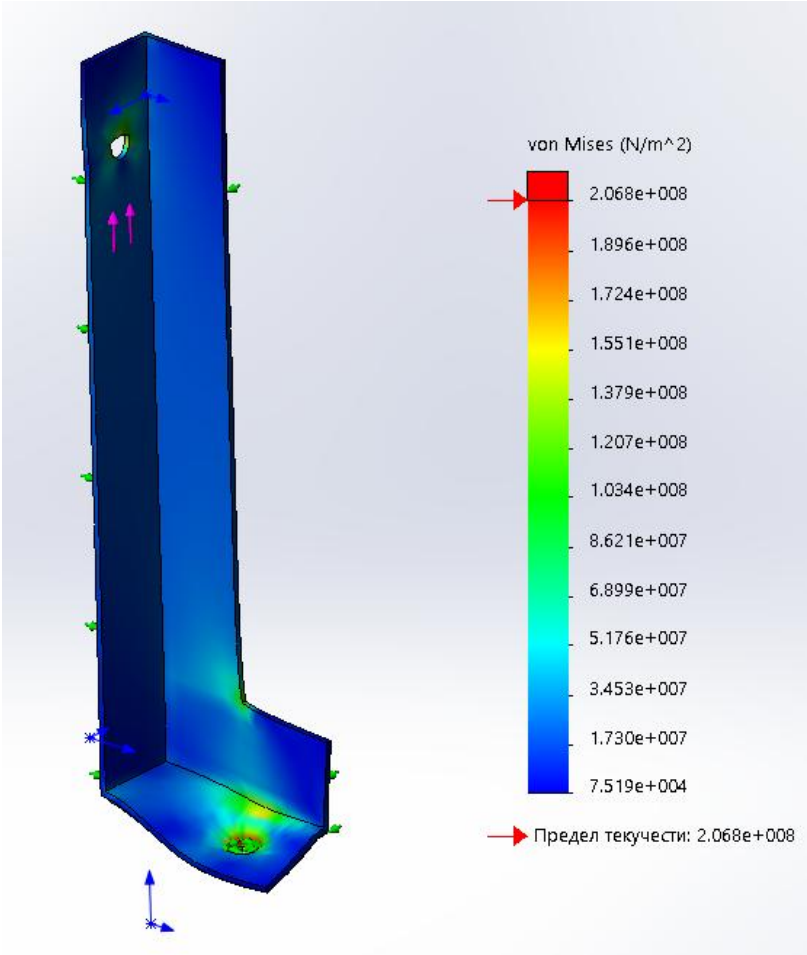


Рис. 16. Распределения напряжений под действием нагрузки 8 кН в усиленном кронштейне.

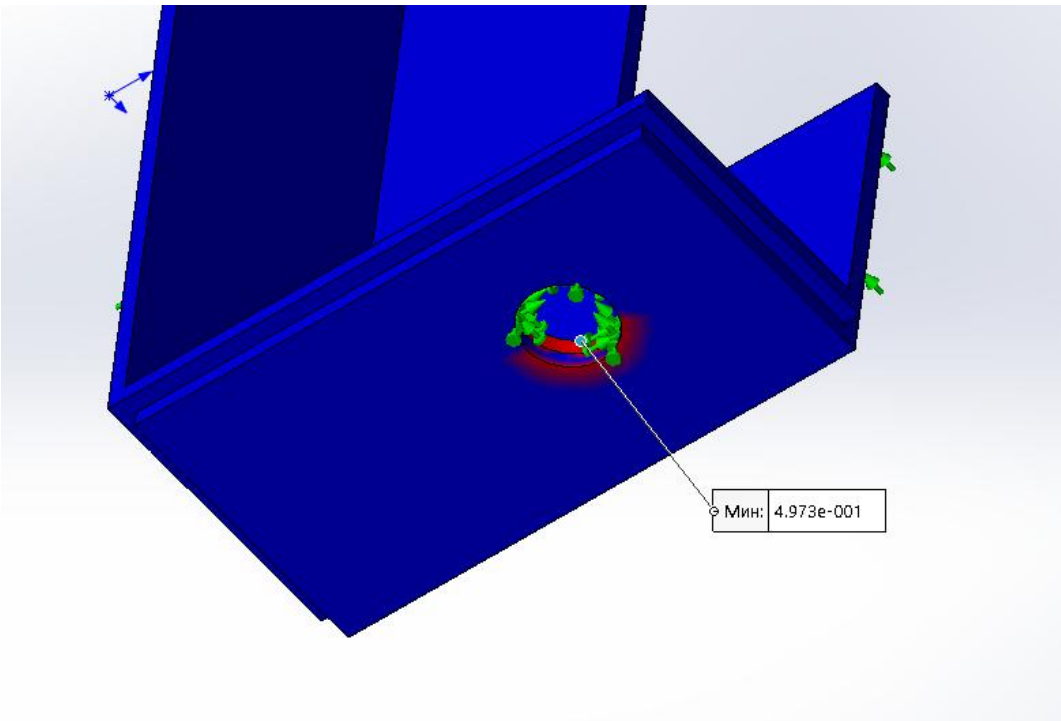


Рис. 17. Коэффициент запаса прочности под действием нагрузки 8 кН.

Дополнительное усиление конструкции можно получить, используя уголок другого профиля. Уголок 50x50x3 является довольно слабым, использование уголка 50x50x4 является более оправданным. Было произведено моделирование для кронштейна из уголка 50x50x4 с такими же размерами. Использовалось также 2 варианта: обычное дно (одинарный профиль) и усиленное (двойной профиль). Результаты приведены в Табл. 2.

Табл. 2. Параметры кронштейнов по нагрузкой 8 кН.

	Уголок 50x50x3		Уголок 50x50x4	
	Одинарное дно	Усиленное дно	Одинарное дно	Усиленное дно
Максимальное напряжение	990 МПа	405 МПа	510 МПа	220 МПа
Минимальный запас прочности	0,2	0,5	0,4	0,95
Масса изделия	1.1 кг	1.4 кг	1.5 кг	1.8 кг

Дополнительную поддержку можно получить с помощью разгрузки крепежного отверстия под анкер. Для этого необходимо использовать широкую и толстую шайбу под анкерную гайку. Размер шайбы: диаметр 32 мм, толщина 4 мм, сталь 3.

Моделирование литого кронштейна

Значительно лучшие эксплуатационные характеристики могут иметь литые кронштейны для крепления. В силу произвольности формы они могут более рационально использовать материал кронштейна. Были спроектированы два типа кронштейна, которые представлены на Рис. 18 и Рис.19.

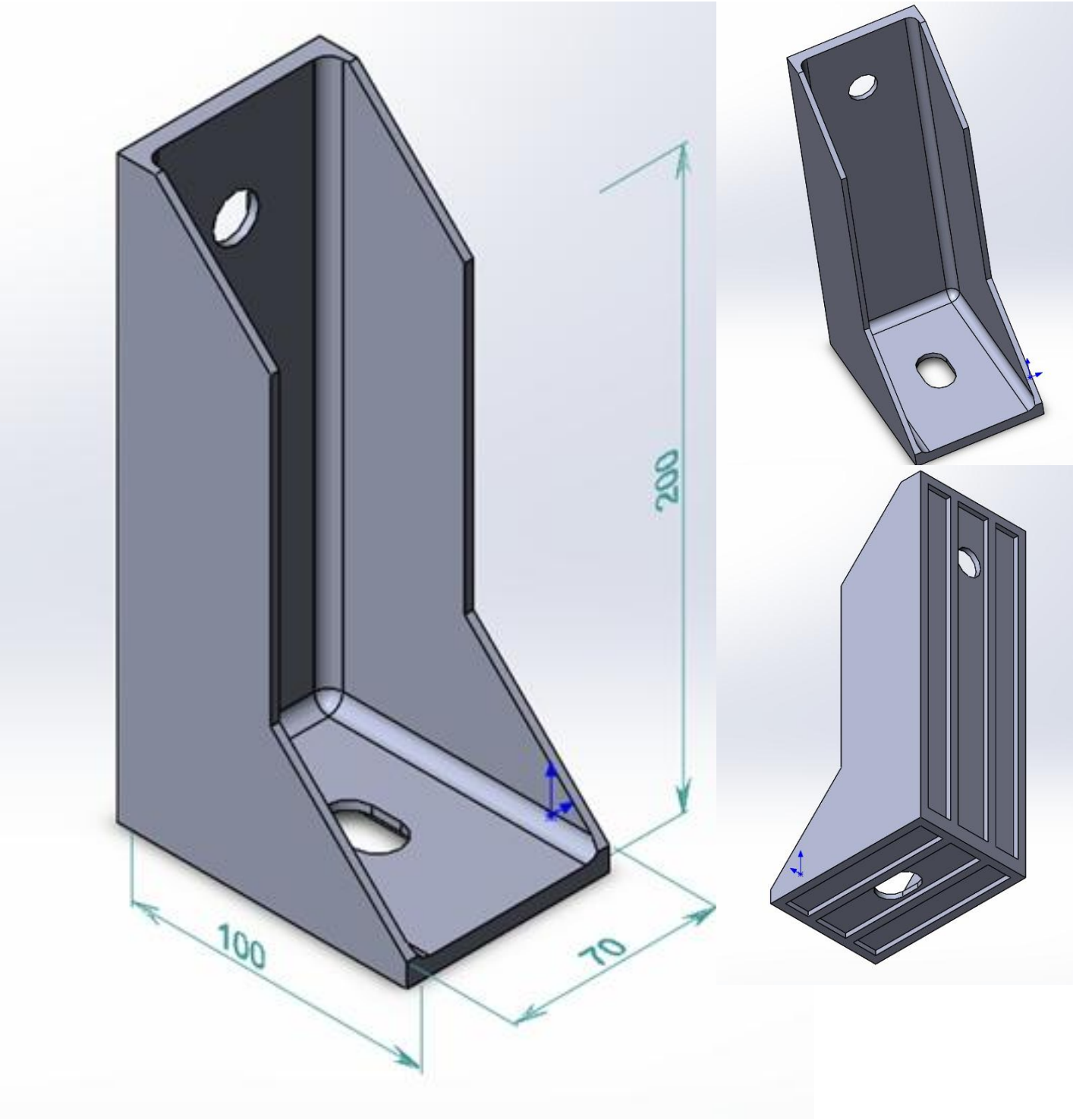


Рис. 18. Литой кронштейн.

Литая форма кронштейна позволяет добиться сложных форм, что может уменьшить вес (затраты материала) при тех же свойствах. Дополнительные ребра жесткости увеличат нагрузку, что может принимать уголок.

Литые детали более актуальны при больших партиях, когда изделия уже идут по конвейеру большими тиражами. Для литья деталь нужно разработать, оптимизировать, разработать матрицу, матрицу сделать, после отливать на заводе, но при сбое в поставках это тут же отразится на монтаже.

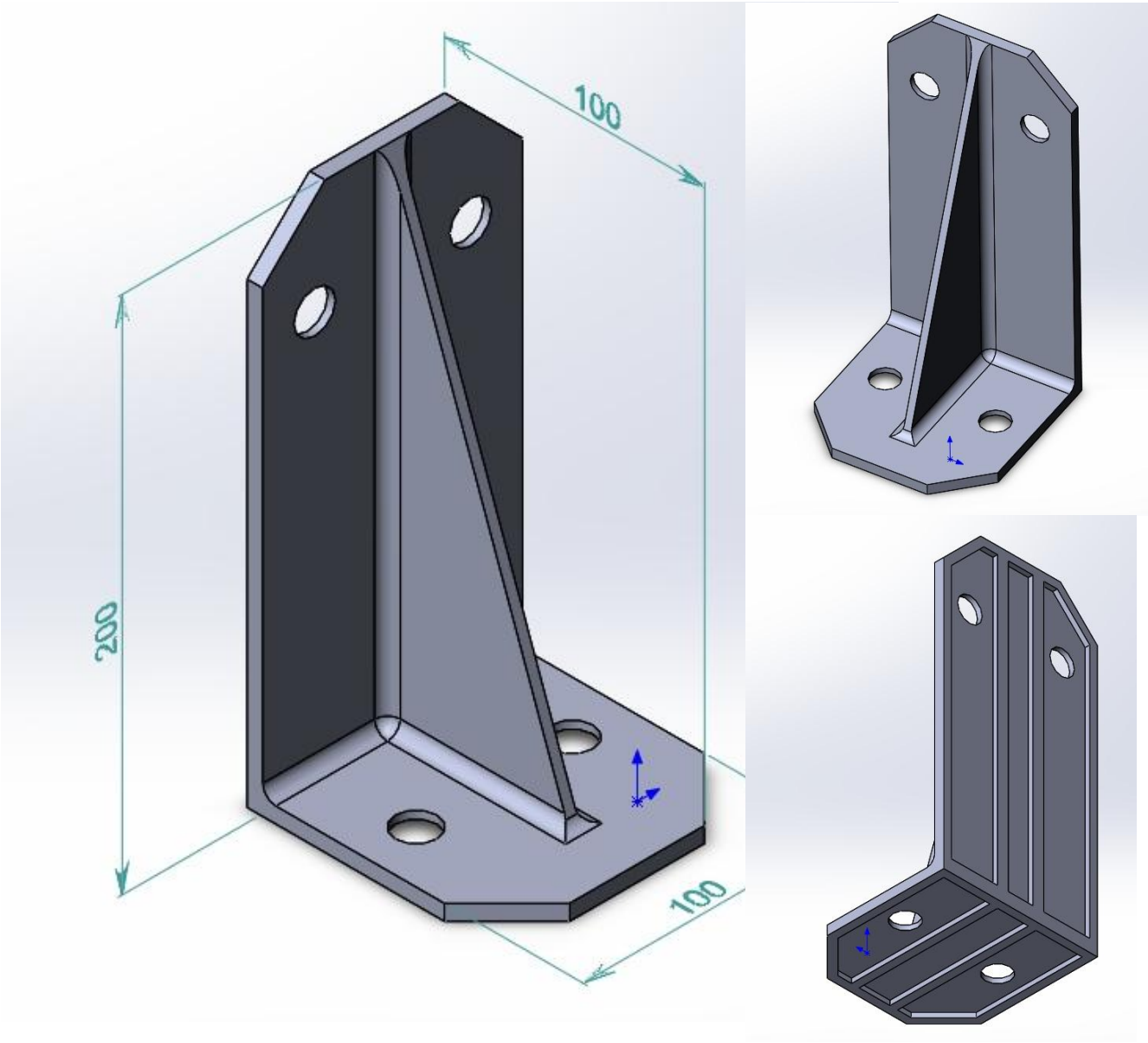


Рис. 19. Литой кронштейн с дополнительными отверстиями.

Дополнительные отверстия в кронштейне (Рис.18) позволяют разгрузить места крепления в баке и основании. Но это ведет к изменению конструкции бака. Поэтому на данном этапе этот вариант не рассматривается.

Моделирование литого кронштейна (Рис.20-22) позволяет выделить несколько особенностей.

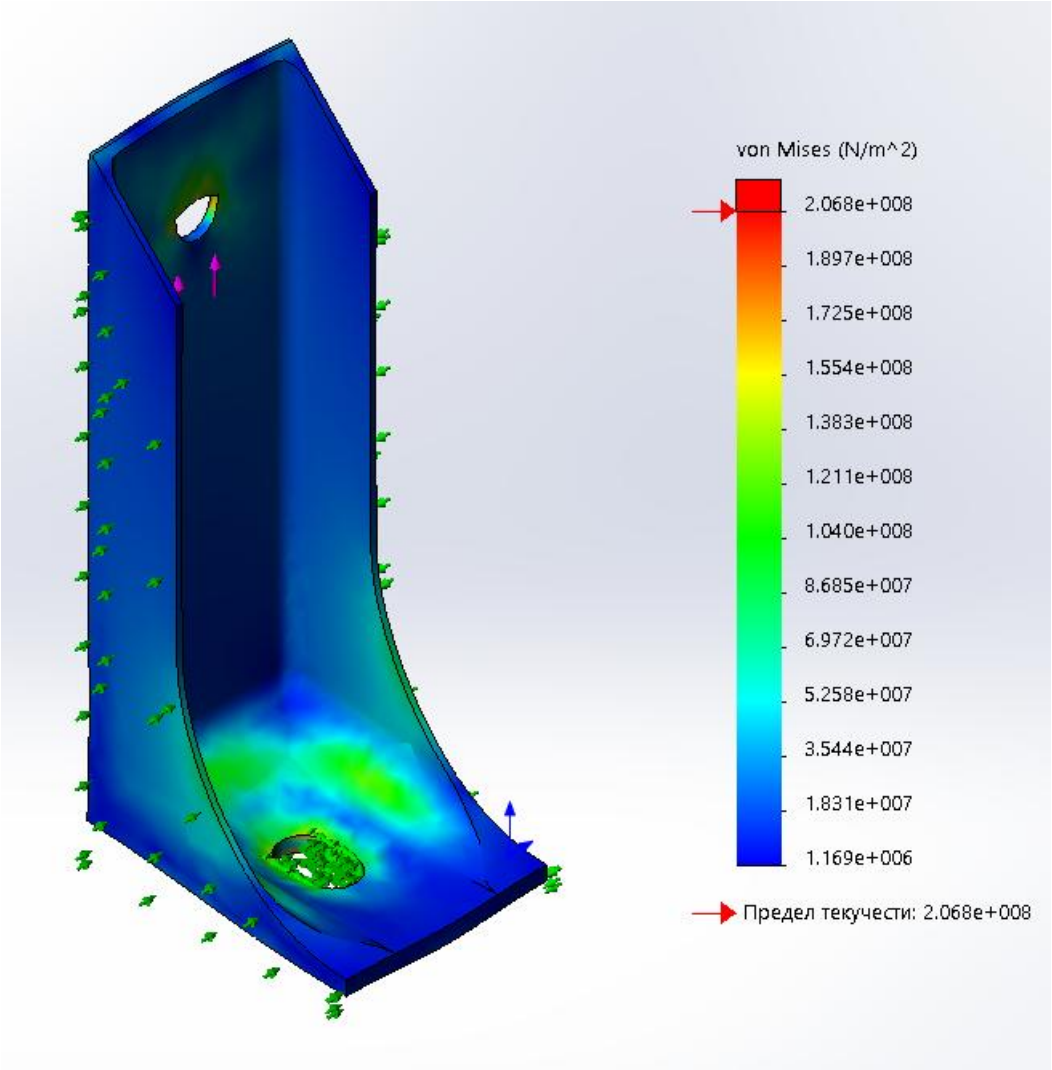


Рис. 20. Распределение напряжений в литом кронштейне под действием нагрузки 8 кН.

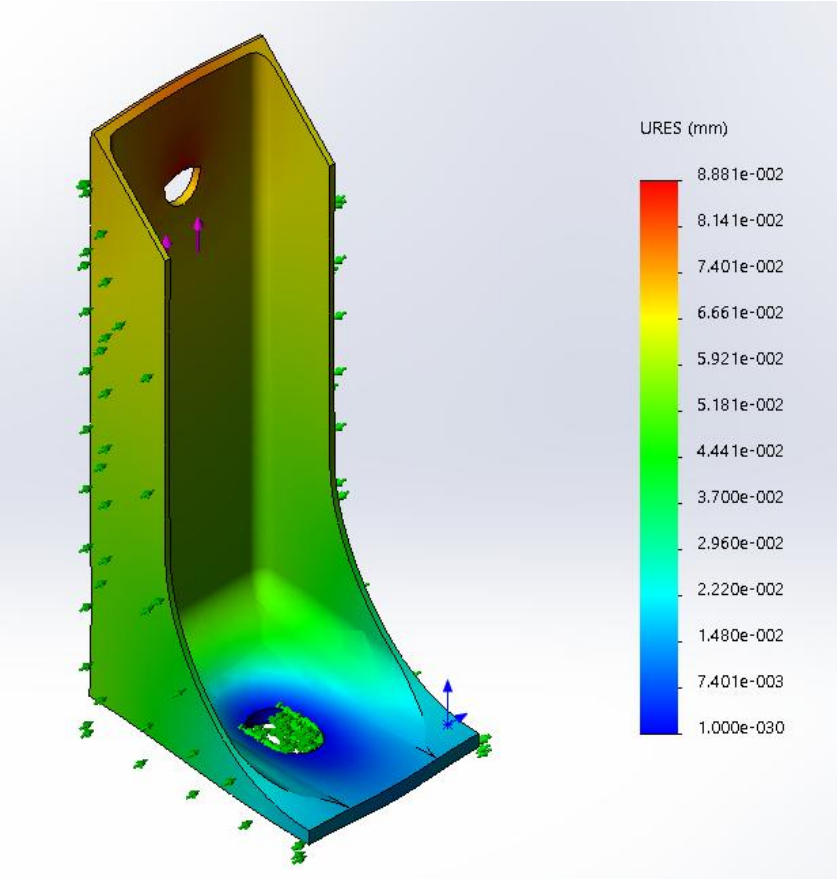


Рис. 21. Линейные перемещения в литом кронштейне под действием нагрузки 8 кН.

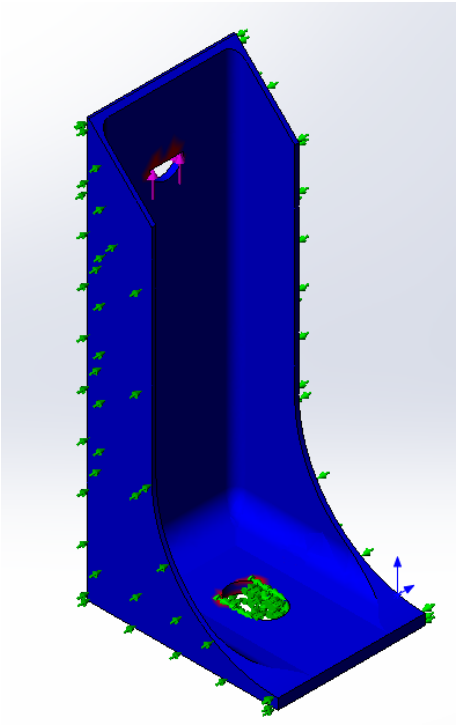


Рис. 22. Запас прочности более 1,5 в литом кронштейне под действием нагрузки 8 кН.

Распределение нагрузок в таком кронштейне более равномерное. Это позволяет значительно экономить материал кронштейна. Масса данного кронштейна получилась примерно 0,7 кг. Подробный чертеж представлен в Приложении 3.

Применение моделирования в случае кронштейнов сложной формы особенно продуктивно, так как показывает возможные просчеты в форме еще до физической реализации изделия. В случае изготовления литой формы затраты на производство довольно значительны и при не правильном выборе формы кронштейна получается значительный материальный ущерб. Производство литых кронштейнов оправдано только для достаточно больших партий изделия. Здесь можно получить выгоду за счет более экономного расходования материала. При небольших партиях и штучных изделиях рекомендовано производство кронштейна из стандартного профиля. Сравнение двух типов кронштейна приведено в таблице 3.

Табл. 3. Сравнение кронштейнов под нагрузкой 8 кН.

	Уголок 50x50x4	Литой кронштейн
Максимальное напряжение	220 МПа	210 МПа
Максимальное удлинение	0,2 мм	0,09 мм
Минимальный запас прочности	0,95	0,98
Масса изделия	1.8 кг	0.7 кг

Заключение

Процесс эксплуатации сложного инженерного сооружения сопряжен с определенными рисками. Задача инженера – эти риски предвидеть и принять меры к их минимизации. Помощь в этом случае может оказать опыт эксплуатации этого сооружения и обратная связь со стороны заказчика (покупателя) изделия.

На примере подземного накопителя видно, что недостаточно продуманная система креплений приводит к снижению срока службы изделия и дополнительным финансовым затратам. Естественно предположить, что более продуманная система креплений позволит снизить эксплуатационные издержки при практически такой же себестоимости изделия. Также очевидно, что гораздо проще провести моделирование поведения конструкции, чем использовать практический опыт проб и ошибок. В этом случае помогают системы автоматического проектирования и метод конечных элементов на примере программы SolidWorks.

В процессе выполнения работы было проведено моделирование существующего кронштейна. Выяснилось, что он не отвечает необходимым требованиям. Коэффициент запаса прочности для данного кронштейна всего 0,2 для расчетной нагрузки 8 кН. Было предложено использовать кронштейн с усиленным дном (двойной профиль) и более толстый уголок сечением 50x50x4 мм^3. Данный уголок тяжелее существующего всего на 60%, но при этом отвечает требованиям по прочности. Запас прочности при этом составляет 0,95. Дополнительное усиление можно получить с помощью разгрузки крепежного отверстия под анкер. Для этого необходимо использовать широкую и толстую шайбу под анкерную гайку. Также можно использовать больше 4 кронштейнов для крепления контейнера, но этот способ предполагает изменение конструкционных особенностей контейнера, что влечет за собой изменение производственного процесса.

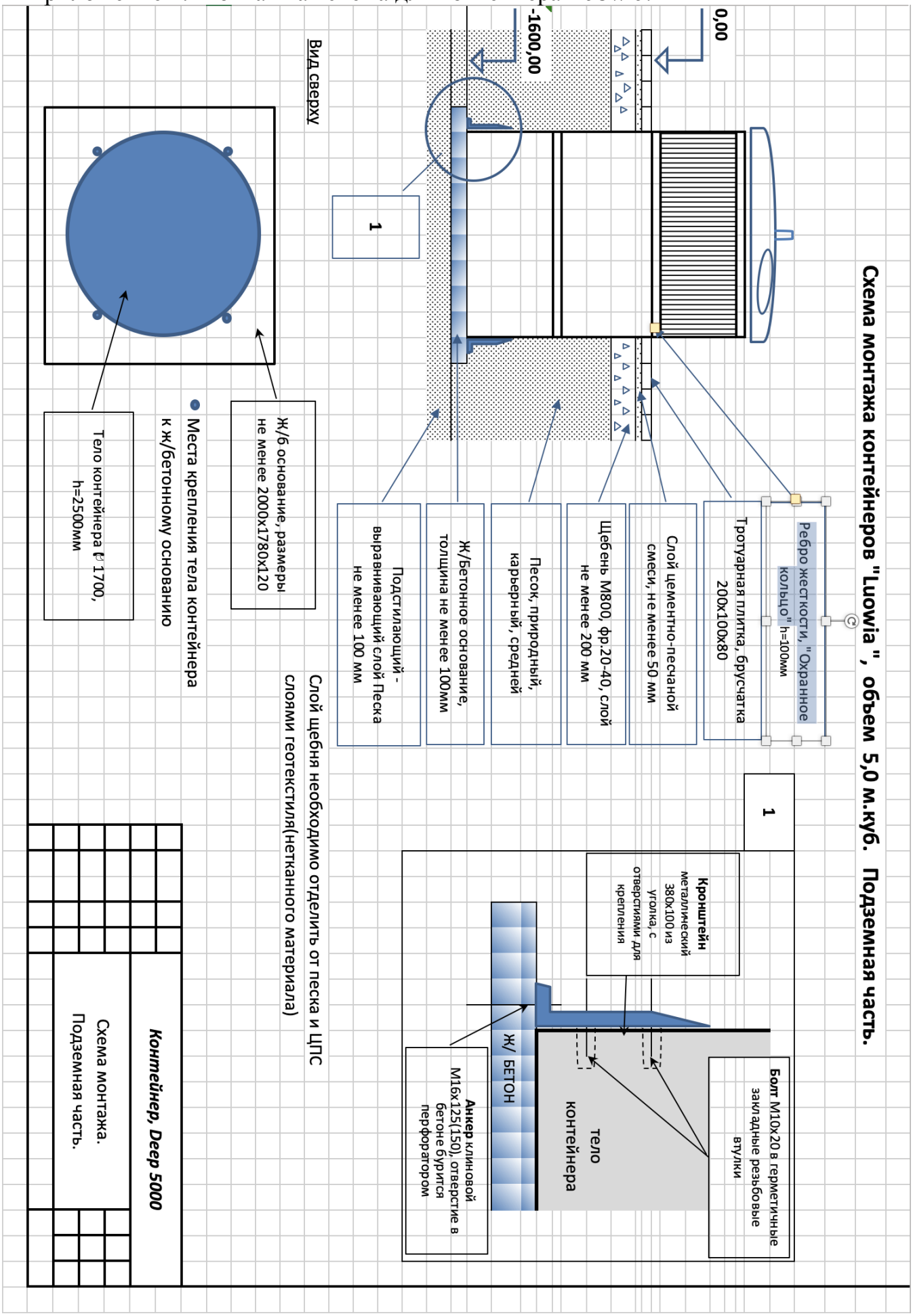
В случае изготовления больших партий рекомендуется изготовление литого кронштейна. За счет экономии материала такой кронштейн получается примерно в 2 раза легче по сравнению с усиленным кронштейном из уголка. Прочностные характеристики у них при этом практически одинаковые. Более жестким является литой кронштейн за счет наличия двух несущих боковых граней.

Список используемых источников

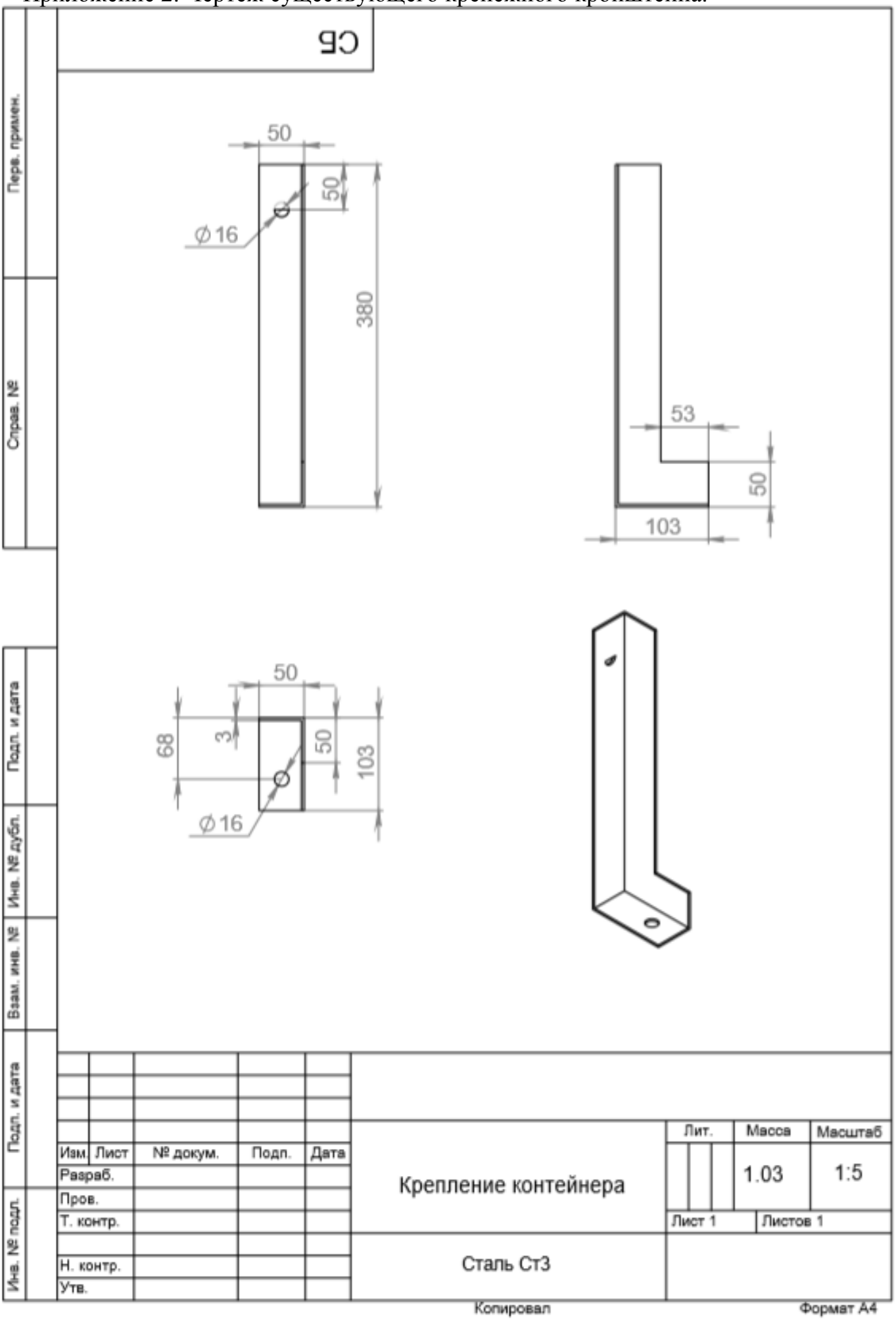
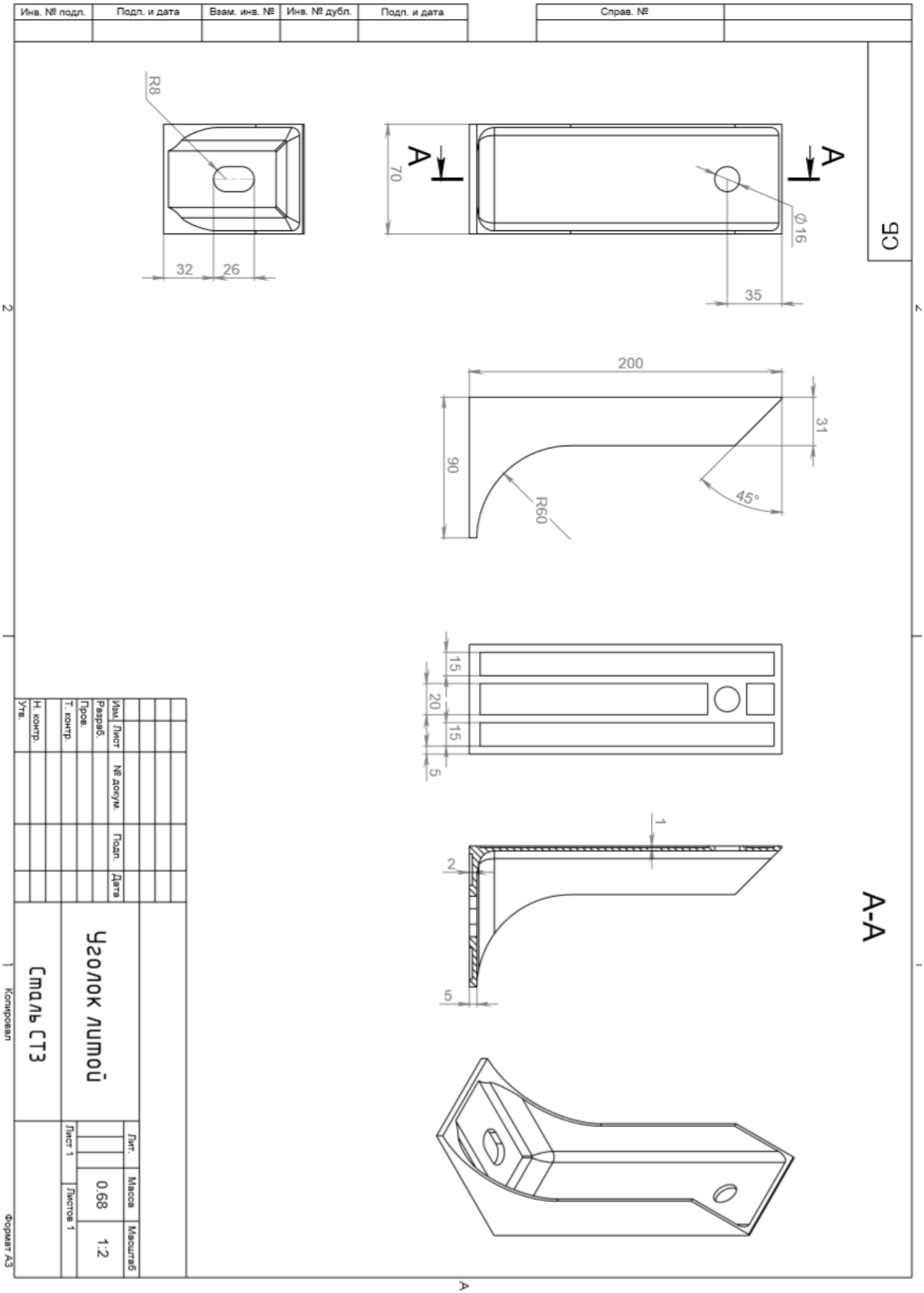
1. Алямовский, А.А. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов, А. И. Харитонович, Н. Б. Пономарев. – БХВ-Петербург, 2008. – 1042 с.
2. Алямовский, А.А. SolidWorks / COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов / А.А. Алямовский. – М.: ДМК-Пресс, 2004. – 432 с.
3. Антонова В.С., Осовская И.И. Аддитивные технологии: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2017.-30 с.
4. Бенерджи П., Баттерфилд Р. Метод граничных элементов в прикладных науках: Пер. с англ.- М.: Мир, 1984.- 494 с.
5. Водопьянов, В. И. Курс сопротивления материалов с примерами и задачами : учеб. пособие / В. И. Водопьянов, А. Н. Савкин, О. В. Кондратьев ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – 136 с.
6. ГОСТ 8509-93 Уголки стальные горячекатаные равнополочные. Сортамент.
7. Зленко М. А., Нагайцев М. В., Довбыш В. М. Аддитивные технологии в машиностроении. М. : ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220 с.
8. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975.- 541 с.
9. Иванов Б.С. Вычислительная механика [Электронный ресурс]: конспект лекций / СПб., 2008. URL:http://elib.spbstu.ru/dl/1642.ppt
10. Лазарев С.О., Полонский В.Л. Вычислительная механика: Учеб. Пособие. СПб: Изд-во СПбГПУ, 2002. - 87 с.
11. Левин В.А., Калинин В.В., Зингерман К.М., Вершинин А.В. Развитие дефектов при конечных деформациях. Компьютерное и физическое моделирование. М.: Физматлит, 2007. 392 с.

12. Методические указания к выполнению расчетно-графических работ для студентов механических специальностей. / Сост.: О.Л. Власенко, А.И. Громовик.– Омск: Изд-во СибАДИ, 2008. – 28 с.
13. Норри Д., де Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов: Пер. с англ.- М.: Мир, 1981.- 304 с.
14. Подземные накопители LUOWIA http://pwmk.ru/?page_id=254
15. Сагдеева Ю. А., Копысов С. П., Новиков А. К. Введение в метод конечных элементов. Ижевск : Изд-во «Удмуртский университет», 2011. 44 с.
16. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. – 392 с.
17. Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов. М.: Мир, 1977. – 349 с.

Приложение 1. Монтажная схема для контейнера Luowia.



Приложение 2. Чертеж существующего крепежного кронштейна.



Приложение 3. Сборочный чертеж литого кронштейна