

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет  
имени К.И.Сатпаева

Институт промышленной инженерии им. А.Буркитбаева

Кафедра «Станкостроение, материаловедение и технология  
машиностроительного производства»

Шамши Аскар Муханұлы

«Сквозное CAD/CAE проектирование пневмо цилиндра прессы»

## **ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

Специальность 5В071200 – Машиностроение

Алматы 2019

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет  
имени К.И.Сатпаева

Институт промышленной инженерии им. А. Буркитбаева

Кафедра «Станкостроение, материаловедение и технологии  
машиностроительного производства»



ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ  
Заведующий кафедрой  
СМИ ТМПИ, PhD

Арымбеков Б.С.

« 22 » апрель 2019г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: «Сквозное CAD/CAE проектирование пневматического  
цилиндра пресса » по специальности: 5B071200 - Машиностроение

Выполнил

Рецензент  
д-ф PhD  
Старший преподаватель КазНАУ  
Удербаета А.Е.

А.Е.

« 22 » апрель 2019г.



Шамши А.М.

Научный руководитель  
канд. техн. наук, сеньор  
лектор Исаметова М.Е.

М.Е.

« 22 » апрель 2019г.

Алматы 2019

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет  
имени К.И.Сатпаева

Институт промышленной инженерии им. А.Буркитбаева

Кафедра «Станкостроение, материаловедение и технология машиностроитель-  
ного производства»

5В071200 – Машиностроение



**УТВЕРЖДАЮ**

Заведующий кафедрой

СМйТМП, PhD, ассоц.проф.

*Арымбеков Б.С.*

«*19*» *ноября* 2018г.

**ЗАДАНИЕ**

на выполнение дипломной работы

Обучающемуся: Шамши Аскар Муханұлы

Тема: Сквозное CAD/CAE проектирование пневмо цилиндра прессы

приказом Ректора Университета № 1252-п от «06» ноября 2018г.

Срок сдачи законченной работы

«2» мая 2019г.

Исходные данные к дипломной работе: система подачи смазочно-охлаждающей  
жидкости (СОЖ)

Краткое содержание дипломной работы:

а) Автоматизированное проектирование - CAD/CAE

б) Метод конечных элементов в расчетах конструкций

в) Типы и характеристики пневматического цилиндров

г) Расчет корпуса пневматического цилиндра и штока на прочность и устойчи-  
вость в программе APM

Рекомендуемая основная литература: из 3 наименований

а) Донской А.С. Математическое моделирование процессов в пневматиче-  
ских приводах. Учебное пособие. 2008. – 126 с.

б) Донской А.С. Обобщенные математические модели элементов пневмо-  
систем. – СПб.: СПГУТД, 2001. – 215 с.

в) Донской А.С. Моделирование переходных процессов в пневматических  
системах. – СПб.: СПГУТД, 1998. – 204 с.



# ГРАФИК

## подготовки дипломной работы

| Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов | Сроки представления руководителю | Примечание |
|----------------------------------------------------------|----------------------------------|------------|
| Поиск информации<br>Обзор литературы<br>Общая часть      | 08.01.19 - 11.02.19              | выполнено  |
| Автоматизированное проектирование - CAD/CAE              | 11.02.19-12.02.19                | выполнено  |
| Метод конечных элементов в расчетах конструкций          | 13.02.19-15.02.19                | выполнено  |
| Типы и характеристики пневматического цилиндров          | 15.02.19-19.02.19                | выполнено  |
| Расчётная часть<br>Графическая часть                     | 22.04.19 – 23.04.19              | выполнено  |

### Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу  
с указанием относящихся к ним разделов работы

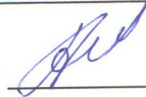
| Наименование разделов | Консультанты,<br>И.О.Ф.<br>(уч. степень, звание) | Дата подписания | Подпись                                                                               |
|-----------------------|--------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Нормоконтролер        | Карпеков Р.К.,<br>лектор                         | 30.04.2019      |  |

Научный руководитель \_\_\_\_\_



Исаметова М.Е.

Задание принял к исполнению обучающийся \_\_\_\_\_



Шамши А. М.

Дата

"6" ноября 2018 г.



## АННОТАЦИЯ

В данной дипломной работе рассмотрены вопросы проектирования пневматического цилиндра пресса с использованием систем CAD/CAE.

В процессе выполнения работы были изучены общие сведения о пневмоцилиндре, прессе, а также его конструктивные особенности.

Каждая деталь пневмоцилиндра была спроектирована по отдельности, затем с этих деталей была собрана сборочная модель. 3D-модель пневмоцилиндра был выполнен в программе Solidworks.

После создания трехмерной модели пневмоцилиндра пресса, был произведён статический анализ цилиндра в программе APM Win Machine. В последствии чего были найдены значения напряжения, перемещения, а также деформации, возникающие в цилиндре в процессе работы пресса.

Также было найдено значение коэффициента запаса прочности штока, который соответствует допустимому значению по общепринятым нормам.

Был напечатан 3D-модель пневмоцилиндра на 3D Принтере. Каждая деталь пневмоцилиндра была напечатана по отдельности.

После полученных результатов процесс проектирования пневматического цилиндра был значительно упрощен за счет систем автоматизированного производства, что в будущем позволит ускорить процесс проектирования деталей, при этом уменьшив экономические затраты на их производство.

## АНДАТПА

Бұл дипломдық жұмыста пневматикалық цилиндр құралын және оның компоненттерін CAD / CAE системасы арқылы жобалау қарастырылады.

Жұмысты орындау барысында, пневматикалық цилиндр туралы жалпы ақпарат, пресс, сондай-ақ оның құрылымдық ерекшеліктері зерттелді.

Пневматикалық цилиндрдің әрбір бөлігі бөлек жобаланған, содан кейін осы бөліктерден құрастыру үлгісі құрастырылған. Пневматикалық цилиндрдің 3D моделі Solidworks бағдарламасында жасалды.

Пресстің пневматикалық цилиндрінің моделін жасағаннан кейін, APM Win Machine бағдарламасында цилиндрдің статикалық талдау жүргізілді. Содан кейін пресс жұмысының барысында цилиндрде пайда болатын кернеулердің, ығысудың, деформацияның мәндері табылды.

Сондай-ақ, штоктың қауіпсіздік коэффициентінің мәні анықталды, бұл жалпы қабылданған стандарттарға сәйкес рұқсат етілген нормаға сәйкес келеді.

3D принтерде пневматикалық цилиндрдің 3D моделі басылды. Пневматикалық цилиндрдің әрбір бөлшектері жеке-жеке басылды.

Осы алынған нәтижелерден кейін пневматикалық цилиндрдің дизайны автоматтандырылған өндіріс жүйелерінің арқасында айтарлықтай жеңілдетілді, ол болашақта оларды өндірудің экономикалық шығындарын азайта отырып, бөлшектерді жобалау үдерісін жылдамдатады.

## ANNOTATION

In this diploma work reviewed the questions about the design of a pneumatic cylinder press using CAD / CAE systems.

In the process of performing the work, there were studied the general information about the pneumatic cylinder, press, as well as its design features.

Each detail of the pneumatic cylinder was designed separately, and then an assembly model was collected from these parts.

3D-model of the pneumatic cylinder was completed in the Solidworks program.

After creating a three-dimensional model of a pneumatic cylinder press, a static analysis of the cylinder was performed in the APM Win Machine program. Subsequently, the values of stress, displacement, as well as deformations that occur in the cylinder during the press operation were found.

There was also found the value of the coefficient of safety margin of the stock, which corresponds to the permissible value according to generally accepted standards

A 3D model of a pneumatic cylinder was printed on a 3D printer. Each detail of the pneumatic cylinder was printed separately.

After the results obtained, the process of designing a pneumatic cylinder was significantly simplified due to automated production, in order to allow in the future to speed up the process of designing details , while reducing the economic costs of their production.



## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение.....                                                                                         | 9  |
| 1 Автоматизированное проектирование - CAD/CAE.....                                                    | 10 |
| 1.1 Обзор САПР .....                                                                                  | 10 |
| 1.2 Автоматизированное проектирование (computer – aided design) .....                                 | 12 |
| 1.3 Автоматическое конструирование (computer – aided engineering)...                                  | 12 |
| 2 Метод конечных элементов в расчетах конструкций .....                                               | 14 |
| 3 Типы и характеристики пневматического цилиндров. ....                                               | 21 |
| 3.1 Принцип действия пневматических цилиндров.....                                                    | 21 |
| 3.2 Классификация и виды пневматических цилиндров.....                                                | 22 |
| 3.3 Пневматические цилиндры – назначение, использование и<br>особенности конструкции. ....            | 25 |
| 4 Расчет корпуса пневматического цилиндра и штока на прочность и<br>устойчивость в программе АРМ..... | 28 |
| 4.1 Расчет корпуса пневматического цилиндра на прочность.....                                         | 28 |
| 4.2 Расчет штока на устойчивость.....                                                                 | 32 |
| Заключение .....                                                                                      | 35 |
| Список использованной литературы.....                                                                 | 36 |

## **ВВЕДЕНИЕ**

Пневматический привод – это механическое устройство, в гильзе которого сила сжатого воздуха через поршень преобразуется в возвратно-поступательное движение и заставляет работать механизм.

Типовые приводы в зависимости от типа приводов, содержащихся в них, делятся на односторонние и двусторонние.

Одностороннее пневматическое устройство - это устройство, в одной полости которого во время работы течет (или из которого течет) сжатый воздух, а вторая полость соединяется с полостью постоянного давления.

Двухстороннее пневматическое устройство представляет собой устройство, в котором обе полости поочередно подаются сжатому воздуху, в результате чего рабочий орган совершает возвратно-поступательное движение. Как односторонние, так и двухсторонние устройства делятся на устройства с начальным перепадом давления воздуха на поршне и без него.

Целью данной дипломной работы является спроектировать пневмоцилиндр пресса с использованием системы автоматического проектирования в инженерно-конструкторских работах.

## **1 Автоматизированное проектирование - CAD/CAE**

Компьютерные технологии не ограничиваются приложениями, они также применяются на этапе производства. Применение материалов, программирование станков с ЧПУ, планирование производства, проектирование и закупка новых инструментов, контроль качества происходит на этапе производства. Компьютерные системы, используемые в этих операциях, классифицируются как автоматические производственные системы. Самодействующих автоматических систем технологической подготовки не существует. Причина в том, что изготовление препарата сложно автоматизировать. Но есть неплохие программные пакеты, которые генерируют код для станков с числовым программным управлением. Машины этого класса получают часть требуемой формы в соответствии с данными, хранящимися в компьютере. Они похожи на машины быстрого прототипирования.

### **1.1 Обзор САПР**

Современные предприятия не смогут стать конкурентоспособными, если не будут производить продукцию хорошего качества и по низким ценам. Непосредственно к этому они пытаются использовать возможности компьютеров, их скорость и память. Применение возможностей компьютеров снижает время и стоимость продукта. Для этого применяются технологии компьютерного проектирования, автоматизированного производства и автоматизированного проектирования или конструирования. Все эти задачи называются жизненным циклом продукта.

Операции, которые относятся к процессу разработки, можно поделить на аналитические и синтетические. Как показано на рис. 1, основные мероприятия по разработке включают сбор важной информации, технико-экономическое обоснование, определение необходимости разработки и формулирование технических требований. Результатом процесса синтеза является концептуальный план предполагаемого продукта в виде эскиза или топологического чертежа, отражающего соединение различных компонентов продукта. Основные финансовые вложения осуществляются в этой части цикла. Например, как необходимые идеи для реализации продукта, а также определяет производительность продукта. Основная информация, полученная и обработанная в рамках процесса синтеза, считается высококачественной. А это значит, что неэффективно для компьютерной обработки.

Несмотря на прогресс, используемый в проектировании компьютеров, мы не скоро сможем отказаться от использования аналитической модели. Аналитическая модель получается, в случае если из проекта удаляются мелкие детали, учитывается существующая симметрия и уменьшение размера.

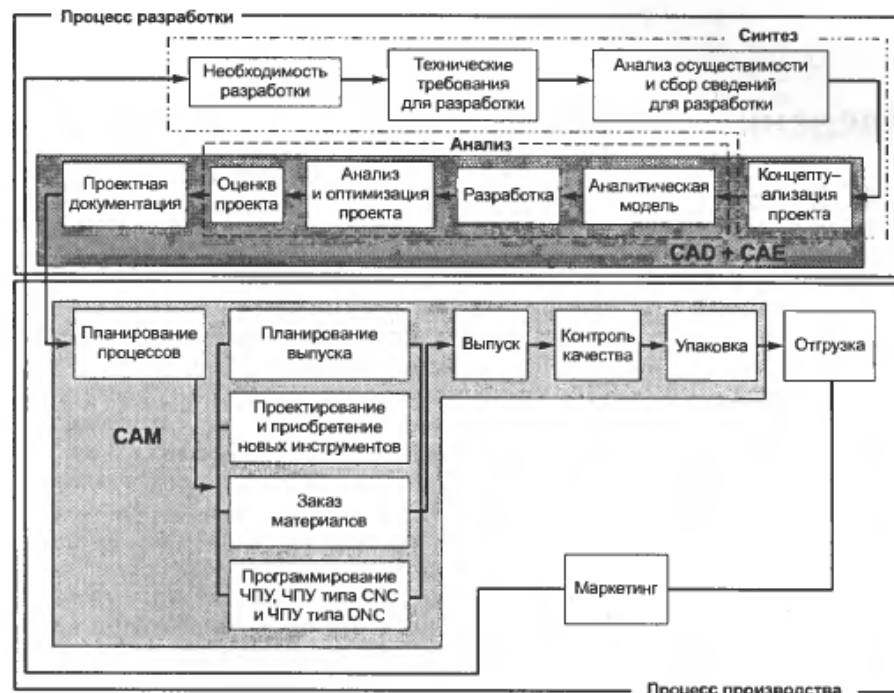


Рисунок 1 - Жизненный цикл продукта

Примеры обычного анализа: контроль столкновений, который позволяет определять вероятность столкновений движущихся частей, анализ напряжений, который позволяет определить прочность конструкции, а также кинематический анализ, который показывает, что разработанное устройство будет выполнять ожидаемое движение. Качество выбранной аналитической модели связано с качеством результата, который может быть получен в результате анализа.



Рисунок 2 - Роль компьютерной модели изделия

После завершения выбора подходящих характеристик и дизайна наступает период оценки проекта. Макеты сделаны именно для этой цели.

Подготовка проектной документации является последним этапом процесса разработки. На этом этапе использование систем подготовки чертежа очень эффективно. Возможность подобных систем позволяет работать с файлами, классифицировать сбережения и гарантировать удобство поиска документов.

## **1.2 Автоматизированное проектирование (CAD)**

Автоматизированное проектирование - это технология, которая состоит в использовании компьютерных систем для упрощения анализа и улучшения планов. Программы, используемые в инженерных вычислениях, являются системами автоматизированного проектирования. Между этими крайностями существуют программы для анализа допусков, расчета масс инерционных качеств, моделирования методом конечных элементов и визуализации результатов анализа. Определение геометрии структуры является наиболее важной функцией САПР, поскольку геометрия определяет все дальнейшие этапы жизненного цикла продукта. Для этого, как правило, применяются системы разработки рабочих чертежей и геометрического моделирования. Вот почему эти системы обычно рассматриваются как системы автоматизированного проектирования. Кроме того, геометрия, определенная в этих системах, может использоваться в качестве основы для последующих операций в системах CAE и CAM. Это одно из наиболее значительных преимуществ САПР, позволяющее сэкономить время и уменьшить количество ошибок, связанных с необходимостью определять геометрию системы с нуля каждый раз, когда это требуется в расчетах. Поэтому можно утверждать, что системы для автоматизированной разработки рабочих чертежей и системы для геометрического моделирования считаются более актуальными компонентами автоматизированного проектирования.

## **1.3 Автоматическое конструирование (CAE)**

Автоматическое конструирование – это технология, которая состоит из использования компьютерных систем для анализа геометрии САПР, моделирования и изучения поведения продукта для улучшения дизайна. Инструменты CAE могут выполнять большое количество различных видов анализа. Программы для кинематических расчетов, например, готовы заранее определять траектории движения и скорости звеньев в механизмах. Программы динамического анализа с большими смещениями могут использоваться для определения нагрузок и смещений в сложных составных устройствах, таких как автомобили. Программы верификации и логического анализа и синхронизации имитируют работу сложных электрических цепей.

Огромным преимуществом методов анализа и оптимизации структурных систем является то, что они дают возможность увидеть действия готового



продукта, обнаружить любые ошибки перед формированием и протестировать реальные модели без определенной стоимости. Поскольку стоимость проектирования на заключительных этапах разработки и изготовления продукта увеличивается, преждевременная оптимизация и улучшение окупаются значительным сокращением времени и затрат на разработку.

Таким образом, технологии CAD и CAE заключаются в автоматизации и повышении производительности определенных этапов жизненного цикла продукта. Чтобы решить эту проблему, была предложена новая разработка под названием компьютеризированное интегрированное производство (компьютерно-интегрированное производство). CIM включает в себя внедрение компьютерной базы данных для более эффективного управления всем предприятием, в частности, бухгалтерским учетом, планированием, доставкой и другими задачами, а не только проектированием и производством, которые охватываются системами CAD, CAM и CAE.

## 2 Метод конечных элементов в расчетах конструкций

Самым популярным способом решения математических задач является метод конечных элементов. Это связано с многофункциональностью метода, в котором сочетаются лучшие качества разностных методов. Его основными преимуществами являются элементарность, единообразие методов построения схем высокого порядка точности в областях сложной формы и возможность использования различных сеток.

Метод конечных элементов используется для расчета деформации и анализа прочности. Метод конечных элементов также решает инженерные задачи: динамика, статика, механика жидкости.

Конструктор, использующий метод конечных элементов, может решить проблему вычисления сложных частей, разбив их на маленькие элементы.

Для 2d областей элементы имеют форму треугольника и четырехугольника. Но элементы по-прежнему имеют как прямые, так и криволинейные границы, что напрямую позволяет точно аппроксимировать границы любой формы. В форме тетраэдра и параллелепипеда элементы используются для трехмерных областей. Они также могут иметь прямые и изогнутые границы.

Основными преимуществами метода конечных элементов, благодаря которому он широко используется, являются следующие:

- 1) Качество материалов не должно быть одинаковыми
- 2) С помощью прямолинейных конечных элементов можно вывести криволинейную область
- 3) Размер элементов изменчив. Изменяемый размер позволяет увеличивать или уменьшать сетку разбиения области на элементы.

Основная идея метода конечных элементов может быть объяснена на примере. Проанализируем непрерывное значение  $T(x)$ , область которого представляет собой отрезок вдоль оси  $X$ . Пять точек зафиксированы и пронумерованы по оси  $X$ .

Точки размещаются на любом расстоянии друг от друга. Значение  $T(x)$  в этом случае известно в каждой узловой точке. Эти фиксированные значения представлены графически на фигуре и обозначены  $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5$  в соответствии с номерами узловых точек.

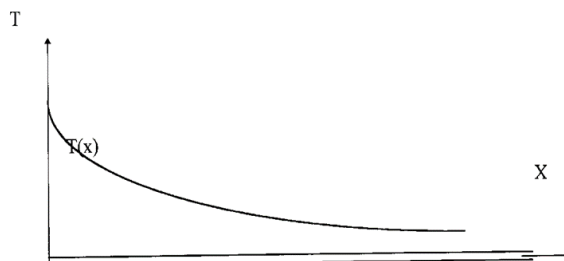


Рисунок 3 – Область определения

Можно сделать это двумя способами. Можно ограничить каждый элемент двумя соседними точками узла, образуя четыре элемента, или разделить область на два элемента, каждый из которых содержит три узла. Элементы определяются значениями  $T(x)$  в узловых точках.

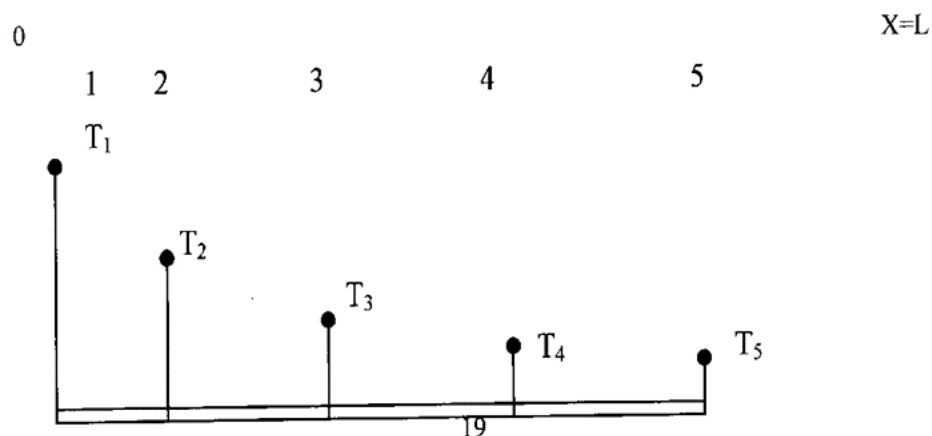


Рисунок 4 – Разбиение области на элементы

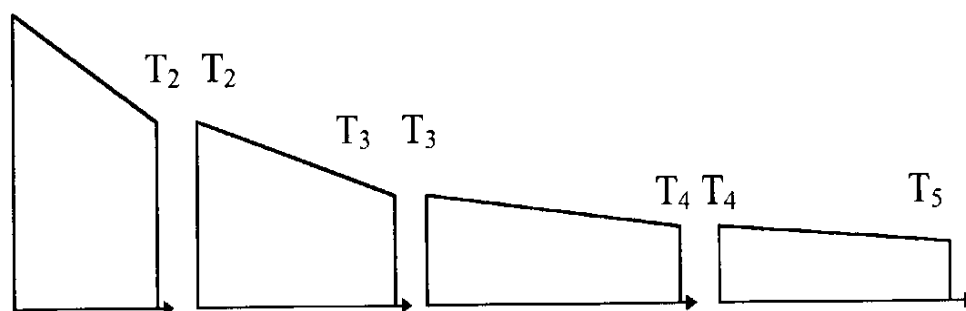


Рисунок 5 - Разбиение области на два элемента

Одномерных конечных элементов недостаточно для описания модели дизайна. Для этого используются двумерные конечные элементы. Стороны линейных элементов имеют прямые линии. Квадратичные или кубические элементы имеют прямые и изогнутые стороны.

При расчете характеристик структур, независимо от их профиля, для выборки модели используются основные элементы, треугольные и четырехугольные, поскольку они дают возможность описать структуры полки.

Для расчета недостаточно только двумерных и одномерных элементов. Это связано с тем, что в ракетно-авиационной технике используются конструкции определенной толщины, которыми нельзя пренебрегать. Простейшим трехмерным элементом является тетраэдр.

Рассмотрим плоскую раму каркаса промышленного здания, стойки которой жестко зажаты в фундаментах, а балки жестко прикреплены к стойкам.

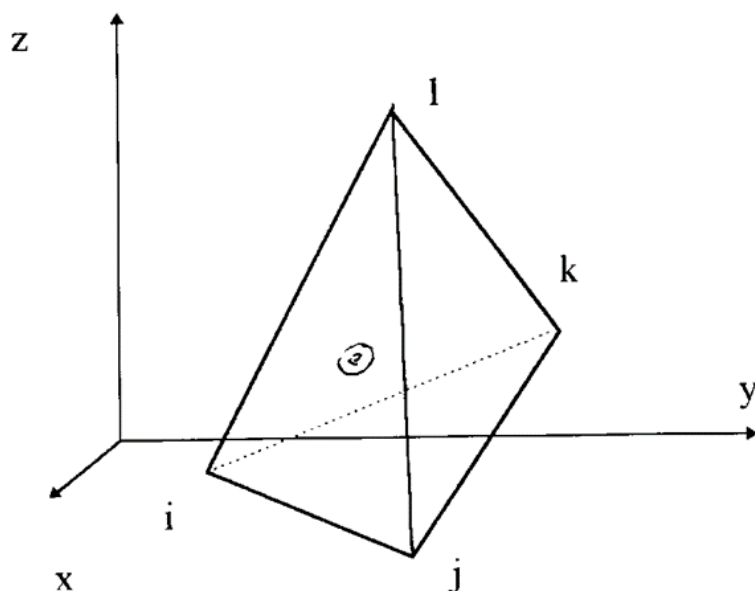


Рисунок 6 - Трехмерный симплекс-элемент

Введем вектор  $\{F_i\}$  обобщенных сил, действующих на раму в узле  $i$

$$\{F_i\} = \begin{Bmatrix} F_x^i \\ F_y^i \\ M^i \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Комбинация внешних воздействий на всю раму будет характеризоваться вектором  $\{F\}$ :

$$\{F\} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ F^N \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Где  $N$ -число узлов рамы. Размерность вектора  $3 \times N$ . Под действием внешних сил  $\{F\}$  стержни рамы получают деформации, а узлы будут двигаться. Смещение  $\{\delta_i\}$  каждого узла характеризуется тремя числами – смещениями  $\delta x_i$ ,  $\delta y_i$  и углом поворота  $\varphi_i$ , которые являются компонентами вектора обобщенных смещений узла  $\delta_i$ :

$$\{\delta_i\} = \begin{Bmatrix} \delta_x^i \\ \delta_y^i \\ \varphi^i \end{Bmatrix} \quad (3)$$

А перемещения всей рамы с вектором:

$$\{\delta\} = \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \delta^N \end{Bmatrix} \quad (4)$$

Здесь, как и выше, условия крепления опор каркаса и узлов не принимаются во внимание.

$$\{f_m^{c'}\} = \begin{Bmatrix} N^{c'} \\ Q^{c'} \\ M^{c'} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

И вектор силы  $\{f_m\}$ , характеризует сечение напряжения стержня  $m$  через векторы силы в его концевых стержнях  $q$  и  $r$ .

$$\{f_m'\} = \begin{Bmatrix} f_m^{q'} \\ f_m^{r'} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

Вектор  $\{f_m'\}$  полностью характеризует деформированное состояние стержня, если внешние воздействия не воздействуют на его внутренние точки, и жесткие характеристики стержня известны.

Напряженно-деформированное состояние того же стержня также характеризуется вектором обобщенных смещений концов стержня  $q$  и  $r$ , который построен из соответствующих компонент вектора:

$$\{\delta_m\} = \begin{Bmatrix} \delta^q \\ \delta^r \end{Bmatrix} \quad (7)$$

Например, если конец  $q$  болта был шарнирно прикреплен к стойке, то сила  $M$  в сечении  $q$  будет равна нулю независимо от значений компонентов  $\{\delta_m\}$ .

Компоненты вектора  $\{f_m'\}$  указываются в локальной системе отсчета, а компоненты вектора  $\{\delta_m\}$  – в глобальной. Чтобы установить связь векторов  $\{f_m'\}$  и  $\{\delta_m\}$  в простейшей форме, мы запишем компоненты  $\{\delta_m\}$  тоже

в локальной системе отсчета, связанной с рассматриваемым стержнем. Обозначим матрицу преобразования координат через  $[L]$ :

$$[L] = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Тогда, например, компоненты  $\{\delta_m^{q'}\}$  вектора  $\{\delta_m^q\}$  в локальной системе координат записываются как

$$\{\delta_m^{q'}\} = [L] \cdot \{\delta_m^q\} \quad (9)$$

Точно так же компоненты вектора  $\{f_m^c\}$  в глобальной фрейме связаны с компонентами  $f_m^c$ ,

$$\{f_m^{c'}\} = [L] \cdot \{f_m^c\} \quad (10)$$

Векторы обобщенных сил и смещений для стержня, выраженные в локальной и глобальной системах отсчета, связаны

$$\{f_m'\} = [\Lambda] \cdot \{f_m\}, \quad \{\delta_m'\} = [\Lambda] \cdot \{\delta_m\} \quad (11)$$

где матрица  $[\Lambda]$  имеет вид

$$[\Lambda] = \begin{bmatrix} [L] & 0 \\ 0 & [L] \end{bmatrix} \quad (12)$$

Вводим матрицу жесткости стержня  $[km']$ , который характеризует связь между векторами  $\{f_m'\}$  и  $\{\delta_m'\}$

$$\{f_m'\} = [K_m'] \cdot \{\delta_m'\} \quad (13)$$

Далее предполагается, что матрица  $[km']$  известна. Для стержня, оба конца которого жестко прикреплены к узлам, это выглядит так:

$$[K'_m] = \begin{bmatrix} K^{qq} & K^{qr} \\ K^{rq} & K^{rr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ES/\ell & 0 & 0 & ES/\ell & 0 & 0 \\ 0 & 12i/\ell^2 & -6i/\ell & 0 & 12i/\ell^2 & -6i/\ell \\ 0 & -6i/\ell & 4i & 0 & 6i/\ell & 2i \\ ES/\ell & 0 & 0 & ES/\ell & 0 & 0 \\ 0 & 12i/\ell^2 & 6i/\ell & 0 & 12i/\ell^2 & 6i/\ell \\ 0 & -6i/\ell & 2i & 0 & 6i/\ell & 4i \end{bmatrix} \quad (14)$$

Е-модуль упругости материала стержня, Па;

S-площадь поперечного сечения, мм<sup>2</sup>;

J-момент инерции сечения, кг м<sup>2</sup>;

$I=EJ/l$ ; l-длина стержня.

Основное соотношение позволяет нам выразить усилия в концевых участках каждого стержня через смещения его концов - узлов системы.

Пишем систему баланса узлов. Для узла u нас есть система трех уравнений равновесия:

$$\{F^i\} - \sum_m \{f_m^c\} = 0 \quad (15)$$

Число этих уравнений равно числу неизвестных смещений узла. значения  $\{f_m^c\}$  зависят не только от движений указанного узла, а также от движений соседних узлов, с которыми узел i связан хотя бы одним стержнем, уравнение для узла i перемещается и смежных узлов. Чтобы постоянно работать в глобальной системе координат, мы выражаем отношение в глобальной системе координат, используя отношения:

$$[\Lambda]\{f_m\} = [K'_m] \cdot [\Lambda] \cdot \{\delta_m\} \quad (16)$$

Умножим равенство слева на  $[\Lambda]^{-1}$  и учтем, что из-за ортогональности  $[\Lambda]$ , равенство

$$[\Lambda]^{-1} = [\Lambda]^T \quad (17)$$

Тогда

$$\{f_m\} = [\Lambda]^T \cdot [K'_m] \cdot [\Lambda] \cdot \{\delta_m\} = [K_m] \{\delta_m\} \quad (18)$$

Выражение определяет матрицу  $[K_m]$  в глобальной системе координат.



Перепишем используя обозначения блоков матрицы

$$\{F^i\} - \sum_q [K^{iq}] \{\delta^q\} = 0 \quad (19)$$

Полная система уравнений равновесия для базовой системы с N узлами в матричной форме примет вид

$$\begin{Bmatrix} F^1 \\ F^2 \\ \vdots \\ F^N \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [K^{11}] & [K^{12}] & \cdots & [K^{1N}] \\ [K^{21}] & [K^{22}] & \cdots & [K^{2N}] \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ [K^{N1}] & [K^{N2}] & \cdots & [K^{NN}] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \delta^1 \\ \delta^2 \\ \vdots \\ \delta^N \end{Bmatrix} \quad (20)$$

Если какой-либо узел P оп связан с одним стержнем с узлом r, то блок  $[K_{pr}]$  в матрице будет тождественно равен нулю. Таким образом, имея возможность вычислять блоки  $[K_{qq}]$  и  $[K_{qr}]$  для отдельных стержней, основываясь на информации о системе в целом, можно построить систему уравнений равновесия для желаемых смещений.

Соответствующие компоненты должны быть исключены из требуемого вектора  $\{\delta\}$ , а также столбцы с одинаковыми номерами. Уравнения равновесия для фиксированных узлов не составлены, что эквивалентно уменьшению количества уравнений системы.

После этого система может быть решена для  $\{\delta\}$ . Обычно для решения используются прямые методы, такие как метод последовательного устранения Гаусса. Найдя  $\{\delta\}$ , используя формулы или можно определить силы во всех основных элементах системы, включая стержни, прилегающие к опорным узлам. На этом завершается этап статического расчета структуры стержневой конструкции.

### **3 Типы и характеристики пневматического цилиндров**

Пневматический привод предназначен для передачи энергии привода рабочим органам машин, а также для выполнения других вспомогательных операций. В пневматических цилиндрах энергия сжатого воздуха превращается в энергию движения того или иного звена.

Пневматические приводы широко используются в различных отраслях промышленности, по сути, благодаря высочайшей надежности пневматических систем, простоте эксплуатации, пожару и взрывобезопасности, и низкой стоимости. Воздух может использоваться в качестве бесконтактного инструмента в технологических операциях, а также в контрольно-измерительных операциях.

#### **3.1 Принцип действия пневматических цилиндров**

Основным преимуществом является низкая стоимость рабочей жидкости (газа или воздуха), которая позволяет создавать технически простые, надежные и пожаробезопасные устройства, способные передавать пневматическую энергию на расстояния. Для преобразования энергии сжатого воздуха в возвратно-поступательное движение используется поршневая пневматика, в которой сжатый воздух через поршень вызывает возвратно-поступательное движение штока. В зависимости от конструкции пневматического привода используются пневматические цилиндры простого и двойного действия.

Пневматический цилиндр с односторонним контуром, сжатый воздух имеет одностороннюю подачу, а возвратная пружина используется для возврата поршня в исходное положение. Цилиндр с односторонним движением совершает рабочий ход только в одном направлении и имеет только один вход.

Пневматические цилиндры двойного действия создают рабочую силу как для прямого, так и для обратного хода.

Двусторонний пневматический цилиндр может иметь односторонний шток. Двусторонний шток, который под действием сжатого воздуха, подаваемого с одной или другой стороны цилиндра, способен перемещаться в двух направлениях с одинаковой силой.

Принцип действия цилиндров двойного действия основан на движении поршня со штоком под воздействием сжатого воздуха в противоположных направлениях. В основном, этот тип привода используется в промышленности. В зависимости от важных требований они различаются как по конструктивным параметрам, так и по отношению к пневматической системе и атмосфере.

Внутри цилиндра вставлен поршень, который жестко соединен со штоком пневматического привода. Через фитинг подается сжатый воздух, который постепенно перемещается и активирует рабочий механизм, перемещая поршень. Пока сжатый воздух находится в полости цилиндра, поршень находится под давлением, пневматический цилиндр выполняет свою функцию. Обратный процесс происходит, когда сжатый воздух выходит из полости цилиндра, а затем

течет в противоположном направлении. Поршень движется, но в противоположном направлении, и работа привода останавливается.



Рисунок 7 – Пневматический цилиндр для прессы

Все компоненты пневматических цилиндров - шток, поршни, крышки, фланцы - изготовлены из высокопрочной стали и подвергаются специальной обработке. Особое внимание при изготовлении приводов уделяется качеству сборки. Гарантия качества материалов при изготовлении пневмоцилиндров является гарантией безопасности при их эксплуатации.

### 3.2 Классификация и виды пневматических цилиндров

Классификация дисков:

- поворотные приводы с ограниченным углом поворота;
- пневматические приводы с поступательным движением выходного стержня;
- пневматические приводы с неограниченным вращением выходного звена.

Пневматические приводы с поступательным движением делятся на поршневые и сильфонные. Наиболее распространенным в настоящее время является поршневой привод, который также известен как пневматический цилиндр. Пневматические цилиндры подразделяются на многопозиционные и двухпозиционные. Принцип действия пневматического цилиндра - это преобразование потенциальной энергии в механическую энергию поршня. Пневматический цилиндр одностороннего действия работает по принципу приложения давления сжатого воздуха к поршню, и только в одном направлении поршень со штоком возвращается назад под воздействием пружины или внешних сил. Приводы этого типа часто используются для небольших перемещений (не более 80 мм.), поскольку пружина во время сжатия значительно уменьшает усилие, развиваемое поршнем.

По числу конечных положений поршня пневматические цилиндры могут быть:

- двухпозиционный, то есть имеющий только два крайних фиксированных положения;
- многопозиционные, позволяющий закрепить рабочий орган в нескольких положениях между двумя крайними положениями.



Рисунок 8 – Сдвоенные пневмоцилиндры

Сдвоенные пневматические цилиндры - это приводы, которые работают на одном штоке, используя два или более цилиндров, соединенных последовательно друг с другом. Они используются из-за недостатка места, в случае ограниченного диаметра цилиндра. Отрицательным качеством таких элементов является увеличение его длины практически в том же соотношении, в котором увеличивается его сила.

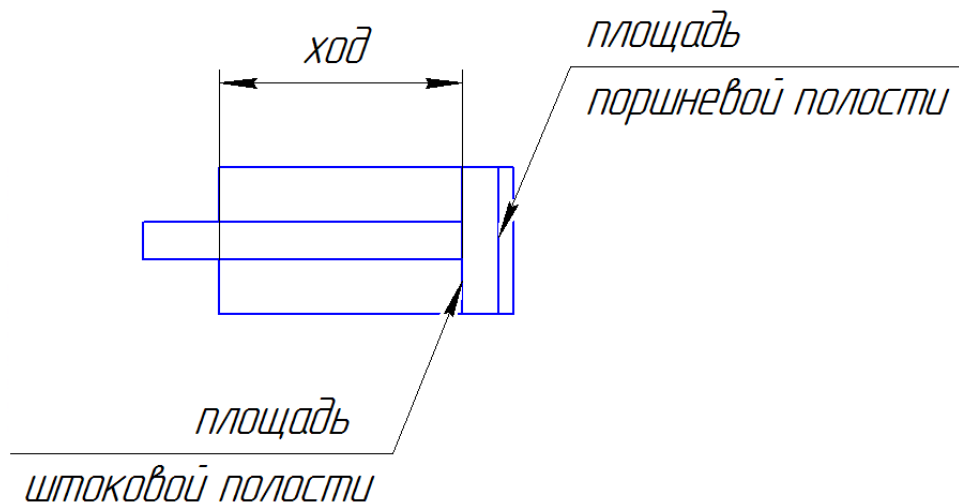


Рисунок 9 - Расчетная схема пневматического цилиндра

Расчет пневматического цилиндра заключается в выборе диаметра его поршня, чтобы сила, развиваемая цилиндром, была достаточной для преодоления воздействующих на него нагрузок. Конструктивная схема

пневмоцилиндра показана на рисунке 8. Произведем расчет диаметра пневматического цилиндра. Действующая сила на штоке цилиндра  $P_{эфф}$ , Н:

$$\begin{aligned} \text{При прямом ходе: } P_{эфф} &= S_1 \cdot P_{наг} - S_2 \cdot P_{ат} - P_{тр} \\ \text{При обратном ходе: } P_{эфф} &= S_2 \cdot P_{наг} - S_1 \cdot P_{ат} - P_{тр} \end{aligned} \quad (21)$$

$P_{наг}$  – избыточное давление в полостях пневмоцилиндра, в соответствии с рабочими условиями оно должно быть равно - 6 атм =  $6 \cdot 10^5$  Па .

Теоретическая сила, зависит от диаметра поршня и давления воздуха в его рабочих полостях и рассчитывается по формулам:

$$\begin{aligned} \text{При прямом ходе: } Q_{пх} &= S_1 \cdot P_{наг} \\ \text{При обратном ходе: } Q_{ох} &= S_2 \cdot P_{наг} \end{aligned} \quad (22)$$

$S_1$  – эффективная площадь поршневой полости,  $m^2$ ,

$$S_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (23)$$

$D$  – диаметр поршня, мм

$S_2$  – эффективная площадь штоковой полости,  $m^2$ .

$$S_2 = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4} \quad (24)$$

$d$  – диаметр штока, мм.

В практических расчетах необходимо учитывать силу трения на штоке пневмоцилиндра. Для этого нужно знать массу, перемещаемую пневматическим цилиндром. Найдём усилие от силы трения на штоке:

$$P_{тр} = m \cdot g \cdot \mu \quad (25)$$

$\mu = 0.4$  - коэффициент трения,

$m = 18$  кг - масса подвижных частей,

$g = 10$  м/с<sup>2</sup> - ускорение свободного падения.

$$P_{тр} = m \cdot g \cdot \mu = 18 \cdot 10 \cdot 0.4 = 72 \text{ Н} \quad (26)$$

Запишем формулу для нахождения диаметра пневматического цилиндра:

$$D = 1.13 \cdot \sqrt{\frac{P_{\text{тр}}}{K_1 \cdot K_2 \cdot P_{\text{наг}}}} \quad (27)$$

$k_1$  – коэффициент, учитывающий силы трения в пневматическом цилиндре, принимаю  $k_1 = 0,8$ ;

$k_2$  – коэффициент, определяющий запас по усилию, поскольку для транспортного цилиндра, то принимаю  $k_2 = 0,6$ .

### **3.3 Пневматические цилиндры – назначение, использование и особенности конструкции**

Сейчас, мы рассмотрим пневматический цилиндр гидравлический пресс усилием 2000 кН модели П-457.



Рисунок 10 – Гидравлический пресс модели П-457

Перемещение подвижной поперечины вверх осуществляется с помощью пневматических цилиндров. Цилиндры устанавливаются снизу или на верхней неподвижной поперечине. Пневматический цилиндр - это отрезок трубы разного диаметра и длины, закрытый на концах крышками. В крышки вворачиваются пневматические соединения - фитинги, для подачи сжатого воздуха внутрь цилиндра.

Одним из преимуществ пневматических цилиндров является высокая - до 1,5 м / с (а в ударных цилиндрах до 10 м / с) - скорость перемещения выходного звена. При достижении конечного положения, когда поршень «сидит» на

крышке, возникают значительные ударные силы, что приводит к характерной детонации. Такие удары приводят к преждевременному износу и даже повреждению элементов конструкции, а также вызывают шум. В таких случаях используйте пневматические цилиндры двойного действия с воздушным демпфированием в конце хода.

Когда жидкость перекачивается из насоса в рабочий цилиндр пресса, поперечина движется вниз, сначала делая холостой ход (подход к ковке), а затем рабочий ход. Затем жидкость из возвратного цилиндра подается в сливной бак. После выполнения хода жидкость из насоса подается в возвратные цилиндры, а рабочий цилиндр соединяется со сливным баком, а подвижная поперечина 8 совершает обратный ход. Потoki жидкости контролируются распределителем клапана и ручкой управления.

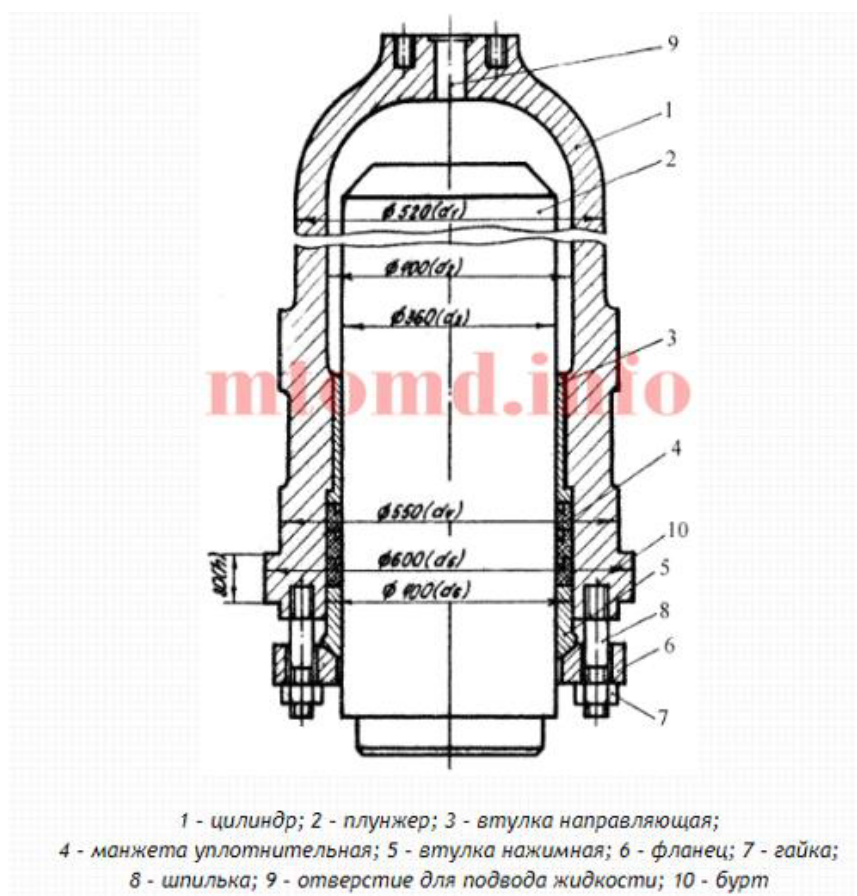


Рисунок 11 — Рабочий цилиндр пресса

Чтобы исключить разрушение крышки цилиндра от удара, в значительной части конструкции предусмотрены демпферы. В небольших цилиндрах с коротким ходом поршня демпфер выполнен в виде пластикового кольца, прикрепленного к поверхности поршня. Крупногабаритные пневматические цилиндры, набирающие большие усилия и скорость, устанавливаются пневматическим демпфированием. Пневматическое демпфирование создает торможение за счет подачи воздуха через дроссель в конце хода поршня.

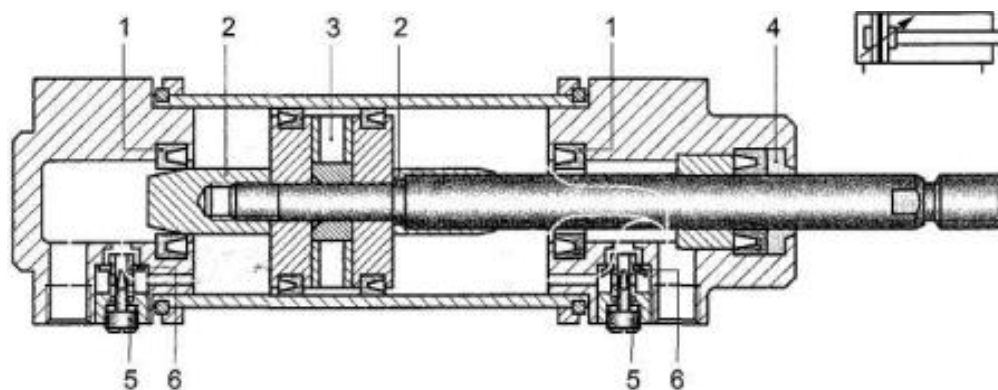


Рисунок 12 – Пневматический цилиндр демпфированием в конце хода

Расширение функциональности таких цилиндров достигается за счет введения дополнительных элементов в традиционный дизайн. Демпферные гильзы 2 установлены с обеих сторон поршня, а в головках цилиндров - уплотнительные манжеты 1 и дроссели 5 с обратным клапаном 6. Сжатый воздух, подаваемый в цилиндр, свободно поступает в соответствующую полость, в том числе и через встроенную проверку клапан 6. Поршень перемещается к крышке, удаленной от него, на максимальной скорости в тот момент, пока гильза демпфера 2 не достигнет уплотнительных втулок 1. В этом случае определенное количество воздуха, отводимого из цилиндра, «блокируется». В полости, которая была только что связана с атмосферой. Теперь воздух из этой полости может быть вытеснен в атмосферу только через отверстие малого диаметра в дросселе 5, размер области потока, которого можно изменить. При изменении направления движения сжатый воздух свободно проходит под поршнем через обратный клапан 6, который вместе с дросселем 5 образует единое целое, что обеспечивает быстрое перемещение цилиндра с места.

Чтобы защитить шток от внешних загрязнений, на (передней) крышке почти всех пневматических цилиндров установлено съемное кольцо 4.

Наличие в пневматическом цилиндре регулируемых демпфирующих устройств обозначено в обычном графическом обозначении стилизованным изображением втулок демпфера, пересекаемых стрелкой, а наличие постоянного магнита обозначено жирной линией на изображении поршня.

В целом, силовые возможности пневматических цилиндров используются в машиностроении и приборостроении, в литейной и сварочной промышленности, металлообработке и во многих других отраслях, которые выбрали путь пневматических систем управления для обхода гидравлических и электрических систем. Начальная энергия в этих комбинированных системах - это потенциальная энергия сжатого воздуха, полученная от компрессорных агрегатов. Воздух поступает в систему через пневматические клапаны. Пневмогидравлический привод обычно представляет собой гидравлическую систему с пневматическим управлением.



## **4 Расчет корпуса пневматического цилиндра и штока на прочность и устойчивость в программе АРМ**

### **4.1 Расчет корпуса пневматического цилиндра на прочность**

Для расчета корпуса пневматического цилиндра на прочность необходимо создать её трехмерную модель. Проектирование корпуса пневматического цилиндра происходило в системе автоматизированного проектирования КОМПАС-3D, что значительно облегчило прочностной расчет, так как программа АРМ, предназначенная для проведения различных анализов и расчетов деталей и сборок, является встроенной прикладной программой, и при необходимости проведения прочностного анализа не приходится изменять формат детали как это делается в других системах автоматизированного проектирования.

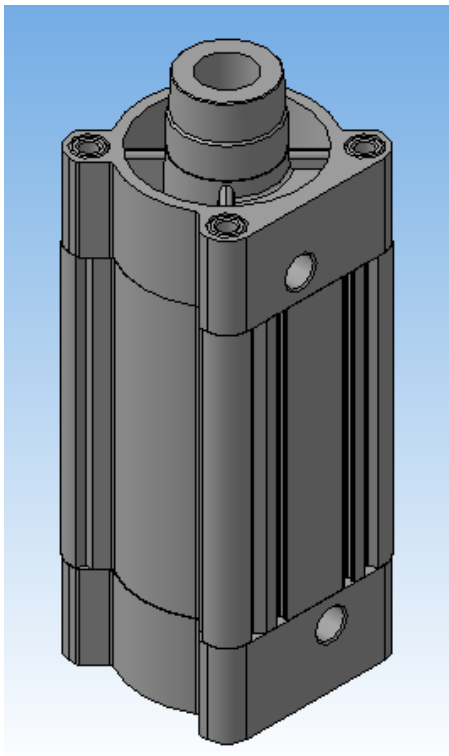


Рисунок 13 – Трехмерная модель пневматического цилиндра

После создания трехмерной модели корпуса пневматического цилиндра необходимо задать материал детали. Из списка библиотеки материалов необходимо выбрать легированную сталь. Для того, чтобы начать проверку на прочность необходимо перейти в «Менеджер библиотек» и выбрать «АРМ FEM: Прочностной анализ».

После задания материала корпуса пневматического цилиндра необходимо задать крепления. Крепление будет зафиксированным, и будет осуществляться

на двух торцевых сторонах корпуса. После выбора места крепления программа автоматически выделит выбранные места красным цветом.

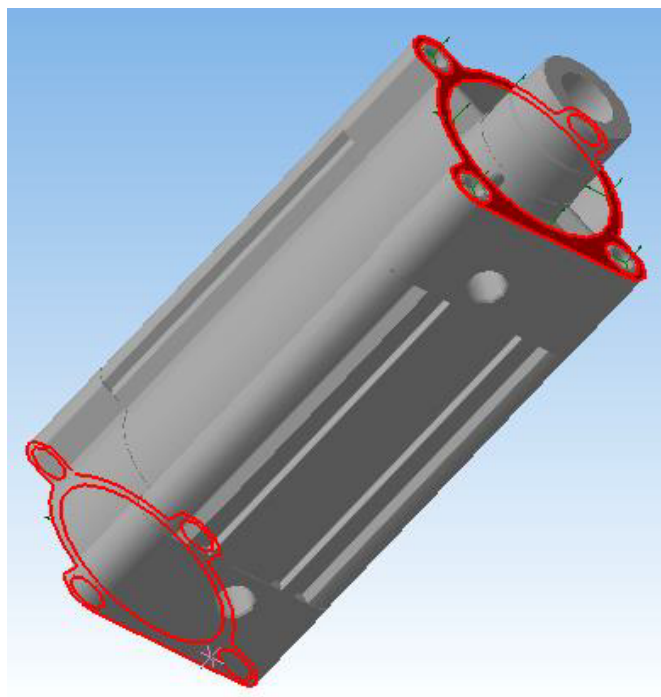


Рисунок 14 – Выбор крепления для корпуса

Выбрав место закрепления нужно приложить удельную силу на внутреннюю цилиндрическую поверхность корпуса.

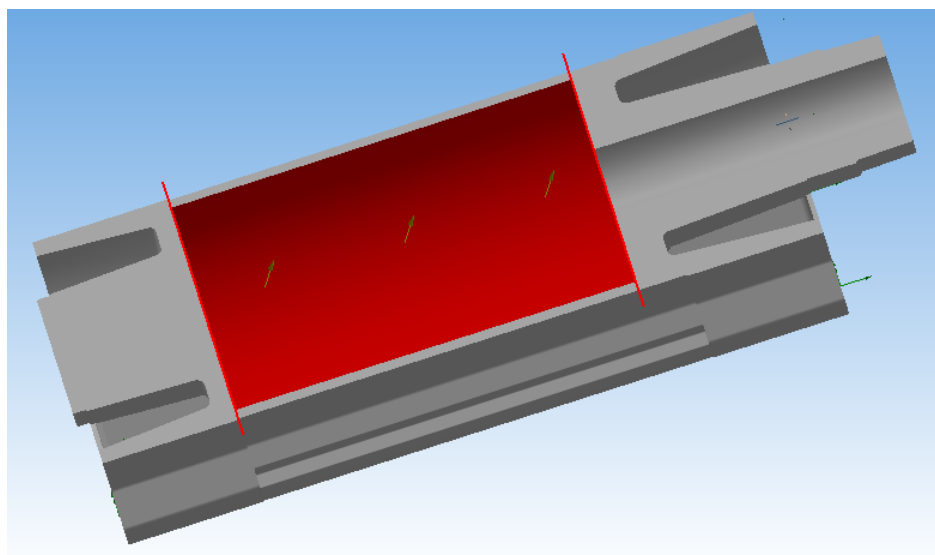


Рисунок 15 – Место приложения удельной силы

Следующим действием необходимо создать конечно-элементную сетку модели. Для этого выбираем пункт «Генерация КЭ сетки».

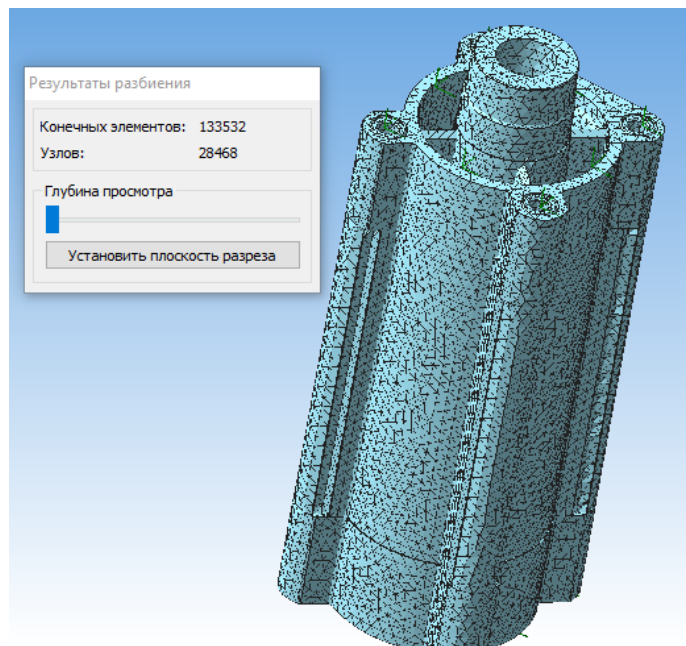


Рисунок 16 – КЭ сетка трехмерной модели

После завершения создания конечно-элементной сетки необходимо запустить исследование. Программа автоматически начнет расчет.

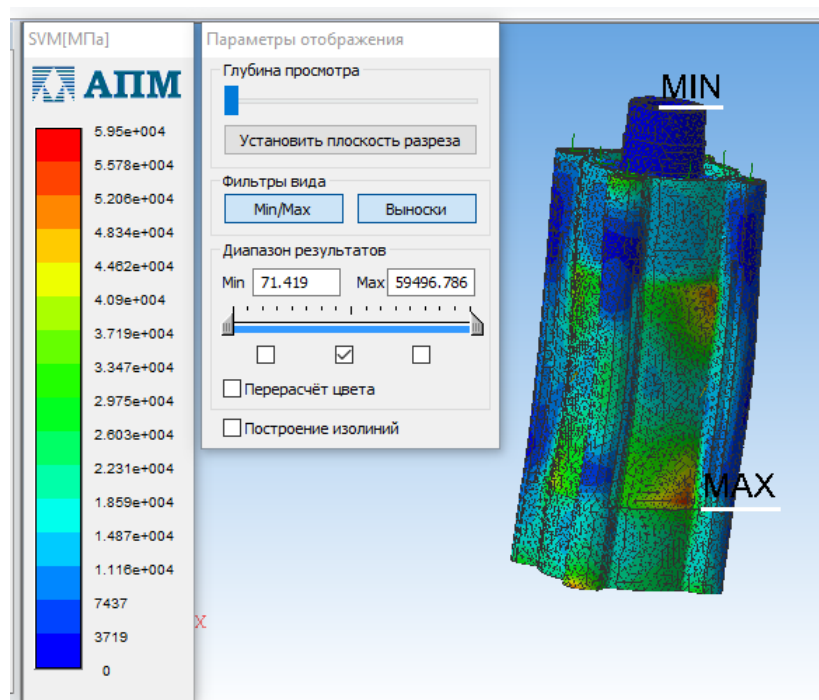


Рисунок 17 – Карта результатов напряжения

По результатам исследования видно, что возникают напряжения, способствующие изменению формы корпуса пневматического цилиндра. Следующим подпунктом анализа является «Карта результатов деформации».

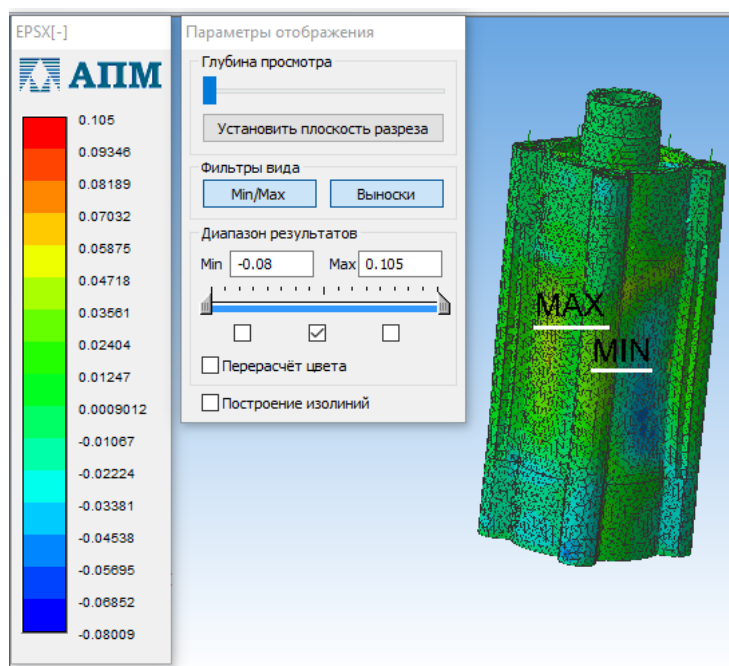


Рисунок 18 – Карта результатов деформации

Последним результатом анализа являются значения перемещения, возникающие в корпусе пневматического цилиндра. максимальное перемещение возникают в двух местах приложения силы.

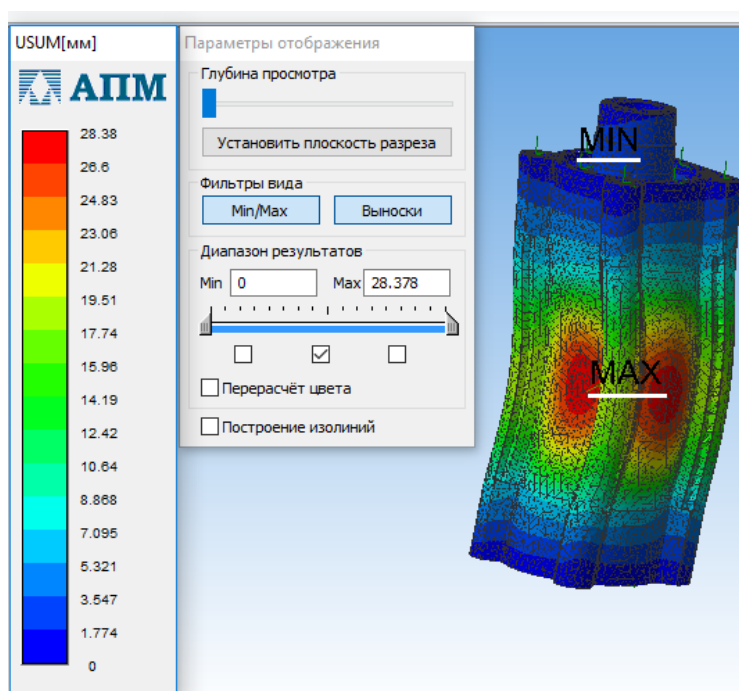


Рисунок 19 – Карта результатов перемещения

В заключении прочностного расчета корпуса пневматического цилиндра можно сказать, что на изменение формы корпуса влияют перемещения, а также

напряжения, возникающие в следствие приложения силы, тогда как значения возникающей деформации не так велики, и не оказывают значимого воздействия.

По результатам исследования минимальное напряжение 71,4 МПа, а максимальное напряжения 194 МПа. Допустимое напряжение для легированной стали марки СТ45, 450 МПа. Наибольшее значение напряжения возникают в начале и конце внутренней цилиндрической поверхности корпуса, коэффициента запаса прочности составляет 2,3.

При анализе на деформацию, получил результаты в диапазоне: Min -0.08, max 0.105. По результатам исследования можно увидеть, что деформации возникают по всей поверхности корпуса, а ее значения находятся в допустимых пределах.

Исходя от результатов анализа, а также по «Карте результатов перемещения» видно, что, максимальное перемещение возникают в двух местах приложения силы. А ее максимальное значение вышло 28,378.

#### **4.2 Расчет штока на устойчивость**

Расчет штока на устойчивость будет производиться по такому же принципу как расчет цилиндра на прочность. Для начала необходимо создать трехмерную модель штока.

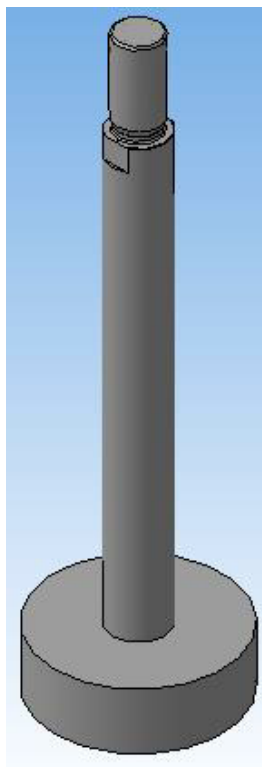


Рисунок 20 – Трехмерная модель штока

Создав трехмерную модель штока необходимо выбрать материал. Из списка библиотеки материалов необходимо выбрать также легированную сталь.

Следующим шагом является выбор места крепления. Так как производится расчет штока на устойчивость, то крепление будет осуществляться у основания.

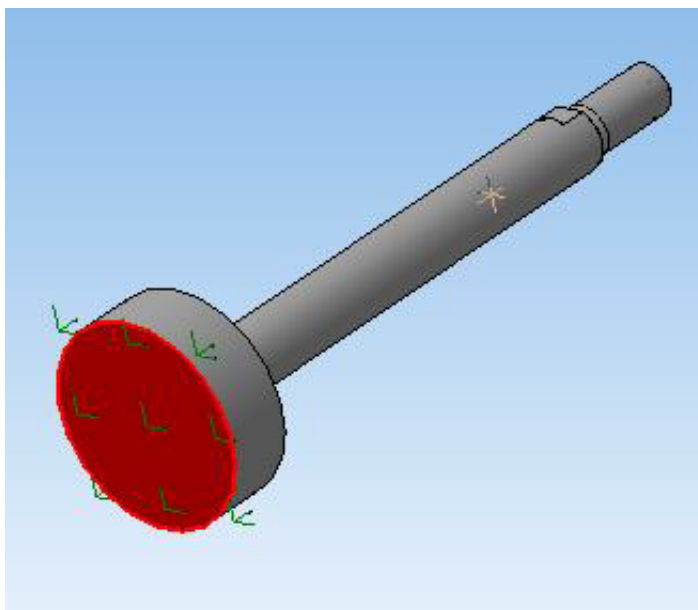


Рисунок 21 – Место крепления штока

После выбора место крепления необходимо выбрать место приложения удельной силы.

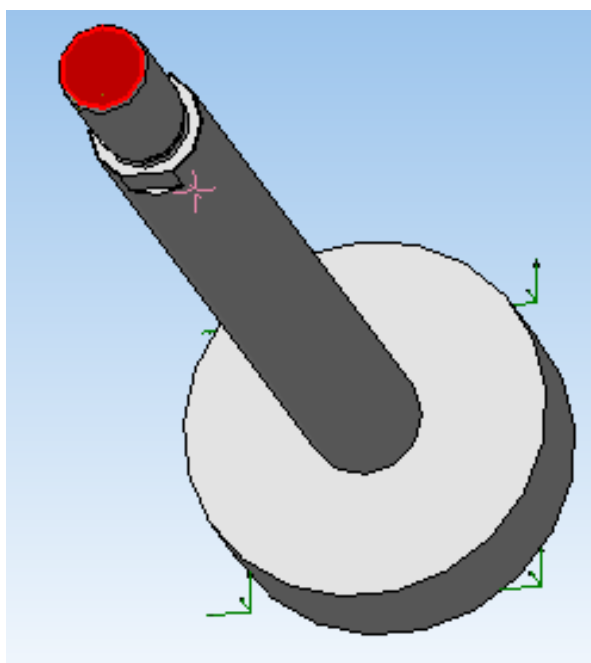


Рисунок 22 – Место приложения силы

Закрепив и выбрав место приложения силы, необходимо создать конечно-элементную сетку. Для этого выбираем пункт «Генерация КЭ сетки».

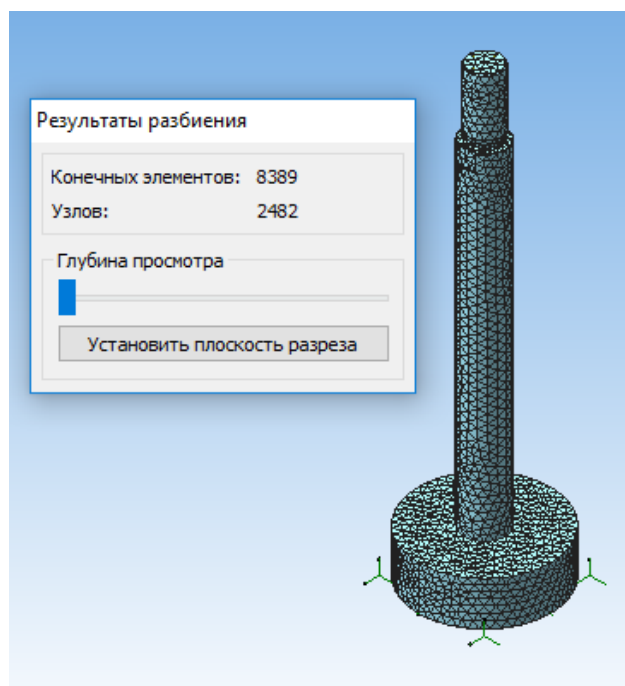


Рисунок 23 - КЭ сетка трехмерной модели штока

После создания конечно-элементной сетки необходимо запустить исследование. И в «Карте результатов» выбрать пункт «Устойчивость».

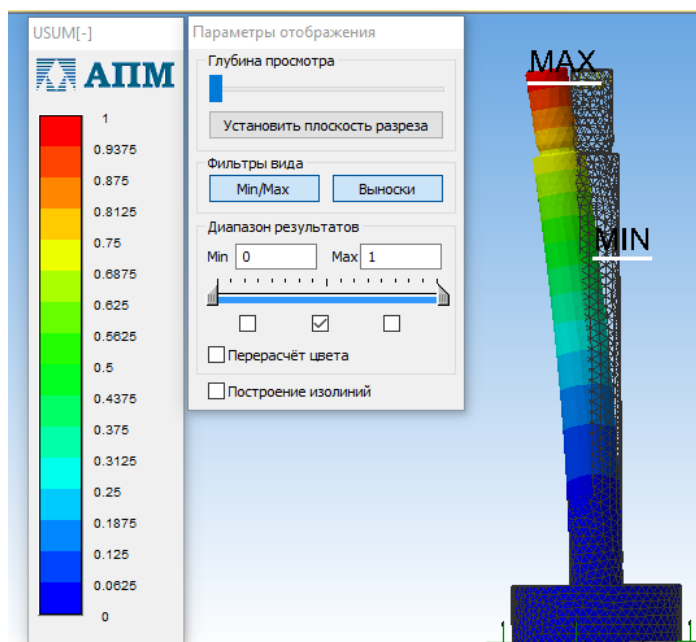


Рисунок 24 – Расчет штока на устойчивость

По результатам исследования видно, что под воздействием приложенной силы стержень штока будет сгибаться, коэффициент запаса устойчивости составляет 1. Поскольку  $\mu < 1.3$  устойчивость стержня обеспечена.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью данной дипломной работы было спроектировать пневматический цилиндр пресса. Для того, чтобы спроектировать конструкцию была использована программное средство проектирование Solidworks.

Данная программа достаточно эффективна, так как с помощью данной программы значительно повысится скорость проектирования, подготовки конструкторской и технической документации, и в свою очередь скорость выпуска и дальнейшей эксплуатации продукции.

Сделал САЕ расчеты с помощью программы APM Win Machine. Получил результаты напряжения, перемещение, коэффициент запаса прочности, а также для штока коэффициент запаса устойчивости. Ознакомились с выводами и постобработкой данной программы.

Основными результатами работы являются: дальнейшее развитие теории пневматических приводов, а разработка нового класса пневматических дискретных приводов, обладающих повышенной надежностью и безотказностью - инвариантных пневматических дискретных приводов технологических машин.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Герц Е.В., Крейнин Г.В. Расчет пневматических приводов. Справочное пособие. - М.: Машиностроение, 1975.
- 2 Донской А.С. Математическое моделирование процессов в пневматических приводах. Учебное пособие. 2008. – 126 с.
- 3 Донской А.С. Обобщенные математические модели элементов пневмосистем. – СПб.: СПГУТД, 2001. – 215 с.
- 4 Донской А.С. Моделирование переходных процессов в пневматических системах. – СПб.: СПГУТД, 1998. – 204 с.
- 5 Погорелов В.И. Газодинамические расчеты пневматических приводов. - Л.: Машиностроение, 1971. - 182 с.
- 6 Кунву Ли. Основы САПР. ПИТЕР, 2004
- 7 Кондаков А.И. САПР технологических процессов и производств. ACADEMA, 2007
- 8 А.А. Замрий. Практический учебный курс. CAD/CAE система APM WinMachine. Учебно-методическое пособие – М: Москва, издательство АПМ, 2008. – 144 с.: ил.