

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Машины и технология литейного производства»

В.Ф. Одинокко, Ю.Ю. Гуминский

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПАС-3D V17 ДЛЯ ГРАФИЧЕСКИХ
ПОСТРОЕНИЙ ПРИ АНАЛИЗЕ ПЛОСКИХ РЫЧАЖНЫХ
МЕХАНИЗМОВ

Учебный электронный материал
для студентов специальности 1-36 02 01
«Машины и технология литейного производства»

Минск ◊ БНТУ ◊ 2020

УДК 621.828.3.01:531.8:004.92(0758):004.92(0758)

ББК 34.12я7

О-42

Авторы:

В.Ф.Одиночко, доцент кафедры «Машины и технология литейного производства» БНТУ, доцент, к.т.н.;

Ю.Ю.Гуминский, старший преподаватель кафедры «Машины и технология литейного производства» БНТУ.

Рецензент

Доцент кафедры «Теплоэнергетика и эффективное использование ТЭР» ГИПК «ГАЗ-ИНСТИТУТ» к.т.н., доцент

В.А. Стасюлевич

Одиночко В.Ф., Гуминский Ю.Ю.

Использование КОМПАС-3D V17 для графических построений при анализе плоских рычажных механизмов: учебный электронный материал для студентов специальности 1-36 02 01 «Машины и технология литейного производства» / - Минск: БНТУ, 2020. – 80 с.

Пособие разработано в соответствии с учебной программой дисциплины «Прикладная механика литейного производства». Содержит подробную методику использования программы «КОМПАС-3D V 17» для построений планов положений, а также планов скоростей, ускорений и сил рычажного механизма. Пособие предназначено для студентов специальности 1-36 02 01 «Машины и технология литейного производства» и рекомендовано учебно-методическим объединением высших учебных заведений Республики Беларусь по образованию в области металлургического оборудования и технологий.

Белорусский национальный технический университет
пр-т Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь

Тел. (017) 292-77-52 факс (017) 292-91-37

Регистрационный № БНТУ/МТФ 32 – 25.2020

© БНТУ, 2020

© Одиночко В.Ф., Гуминский Ю.Ю., 2020

© Одиночко В.Ф., компьютерный дизайн, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ	5
2 НАСТРОЙКА ПРОГРАММЫ «КОМПАС-3D V17»	6
3 ПОСТРОЕНИЕ ПЛАНОВ МЕХАНИЗМА.....	8
4 КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЫЧАЖНОГО МЕХАНИЗМА	33
4.1 ПОСТРОЕНИЕ ПЛАНОВ СКОРОСТЕЙ.....	33
4.2 ПОСТРОЕНИЕ ПЛАНОВ УСКОРЕНИЙ	47
5 КИНЕТОСТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА	57
6 ПЕЧАТЬ ГРАФИЧЕСКИХ ФАЙЛОВ ИЗ КОМПАС-3D	78
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	80

ВВЕДЕНИЕ

«КОМПАС» – семейство систем автоматизированного проектирования с возможностями оформления проектной и конструкторской документации согласно стандартам серии ЕСКД и СПДС.

Разрабатывается российской компанией «Аскон». Система «КОМПАС-3D» предназначена для создания трёхмерных ассоциативных моделей отдельных деталей и сборочных единиц, содержащих как оригинальные, так и стандартизованные конструктивные элементы. Параметрическая технология позволяет быстро получать модели типовых изделий на основе проектированного ранее прототипа. Многочисленные сервисные функции облегчают решение вспомогательных задач проектирования и обслуживания производства.

Новая версия программы «КОМПАС-3D V17» отличается от предыдущих версий ленточным графическим интерфейсом и рассчитана на использование широкоформатных мониторов. Одним из подходов к эргономике новой версии «КОМПАС-3D V17» стала интеграция режимов работы. В каждом режиме создания модели появилась возможность «вытащить» необходимые инструменты из другого режима и сократить тем самым количество действий.

Пособие разработано в соответствии с учебной программой дисциплины «Прикладная механика литейного производства» и содержит подробную методику использования программы «КОМПАС-3D V17» для построений планов положений, а также планов скоростей, ускорений и сил рычажного механизма.

1 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

На рисунке 1 представлена **кинематическая схема** плоского рычажного механизма.

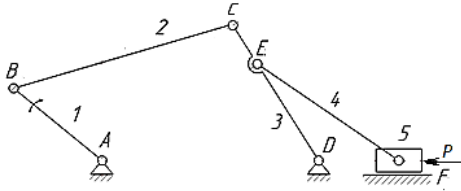


Рисунок 1

Механизм включает входное звено 1 (**кривошип**), **шатуны** 2 и 4, **коромысло** 3 и выходное звено 5 (**ползун**). Заданный механизм является цикловым механизмом и предназначен для преобразования равномерного **вращательного** движения кривошипа в **возвратно-поступательное** движение ползуна. Исходные данные для расчётов и построений представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные

$l_{AB},$ м	$l_{BC},$ м	$l_{CD},$ м	$l_{DE},$ м	$l_{EF},$ м	$l_{AD},$ м	$m_1,$ кг	$m_2,$ кг	$m_4,$ кг	$m_5,$ кг	$I_{S_2},$ кгм ²	$I_{S_4},$ кгм ²	$P,$ Н
0,1	0,2	0,14	0,1	0,15	0,19	10	20	15	40	1,0	1,5	250

В таблице 1 буквами l и m обозначены соответственно длины и массы звеньев, буквами I – моменты инерции звеньев относительно центральных осей их вращения. Внешнее усилие на ползуне 5 обозначено буквой P .

Частота вращения кривошипа $n_1 = 140$ об/мин. Центр массы S_2 звена 2 расположен посередине звена. Центр массы S_4 звена 4 расположен на расстоянии равном $1/3 l_{EF}$ от точки E . Масса звена 3 незначительна и в данном случае может быть проигнорирована.

2 НАСТРОЙКА ПРОГРАММЫ «КОМПАС-3D V17»

Запустите программу «КОМПАС-3D V17». Откроется стартовая страница (рисунок 2).

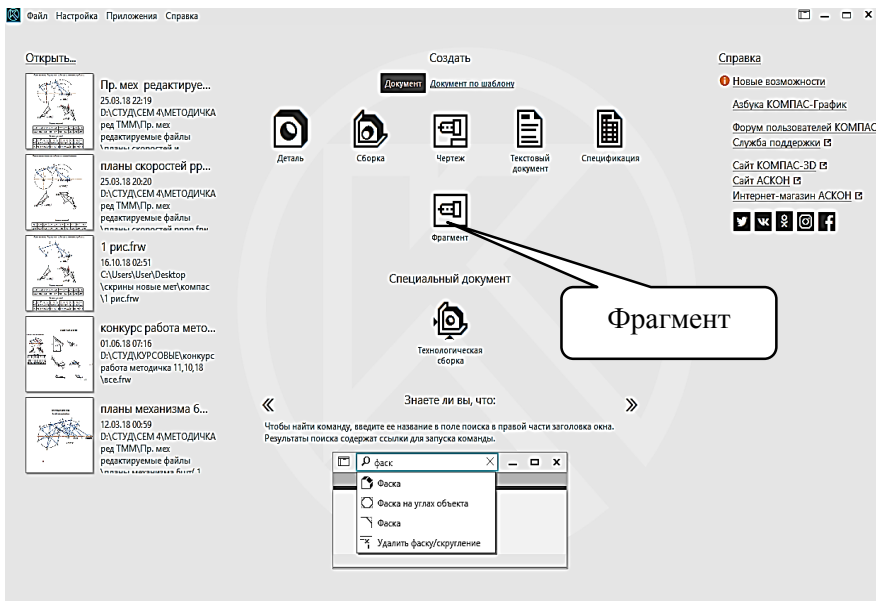


Рисунок 2

Чтобы создать документ вызовите команду **Файл — Создать**. Затем щёлкните по ярлыку документа нужного типа, в данном случае **Фрагмент** (рисунок 3). Диалог закроется, документ будет создан.



Рисунок 3

Выполните команду **Настройка – Параметры – Система – Графический редактор – Привязки**. В окне диалога поставьте пометку «Все привязки» и щелкните ОК (рисунок 4). Также привязки можно установить щелчком на кнопке **Привязки** на панели быстрого доступа

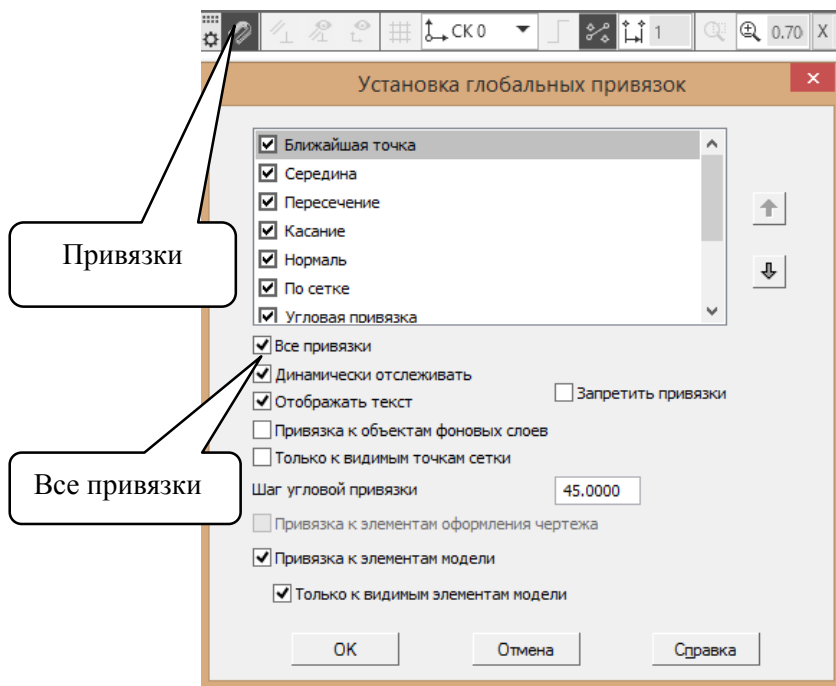


Рисунок 4

3 ПОСТРОЕНИЕ ПЛАНОВ МЕХАНИЗМА

Выполнение **кинематического** и **кинетостатического** анализов начните с построения **совмещенных планов** механизма в шести положениях входного звена.

Для построения планов положения механизма определите масштабный коэффициент μ_l по формуле:

$$\mu_l = \frac{l_{AB}}{AB};$$

где $l_{AB}=0,1$ м – **истинная длина** кривошипа (см. таблицу 1);

AB – **отрезок**, изображающий на плане механизма длину кривошипа задаётся произвольно, например $AB = 25$ мм.

$$\mu_l = \frac{0,1}{25} = 0,004 \frac{\text{м}}{\text{мм}}.$$

Расстояние между неподвижными точками A и D на планах механизма определите по формуле:

$$AD = \frac{l_{AD}}{\mu_l} = \frac{0,19}{0,004} = 47,5 \text{ мм}.$$

Длины отрезков, изображающих на планах механизма звенья 2, 3 и 4, определите аналогично. Вычислите длины отрезков и запишите их размеры в таблицу 2.

Таблица 2 – Длины отрезков, изображающих звенья на планах механизма

AB , мм	BC , мм	CD , мм	DE , мм	EF , мм	AD , мм
25	50	35	25	32,5	47,5

При выполнении чертежа планов механизма выполняйте построения в масштабе 1:1.

Построение планов механизмов начните с изображения траектории точки B , которая представляет собой окружность. Для построения окружности на инструментальной панели «Геометрия» выберите кнопку «Окружность» (рисунок 5).

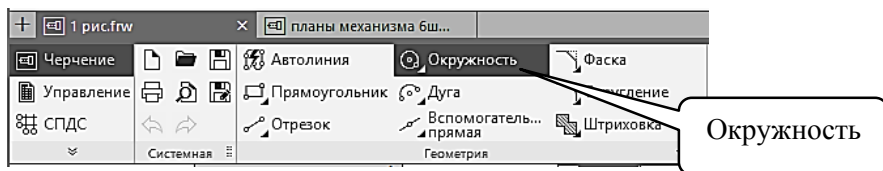


Рисунок 5

На панели параметров в основной области укажите радиус 25, добавьте оси и стиль линии «Пунктир 2» (рисунок 6).

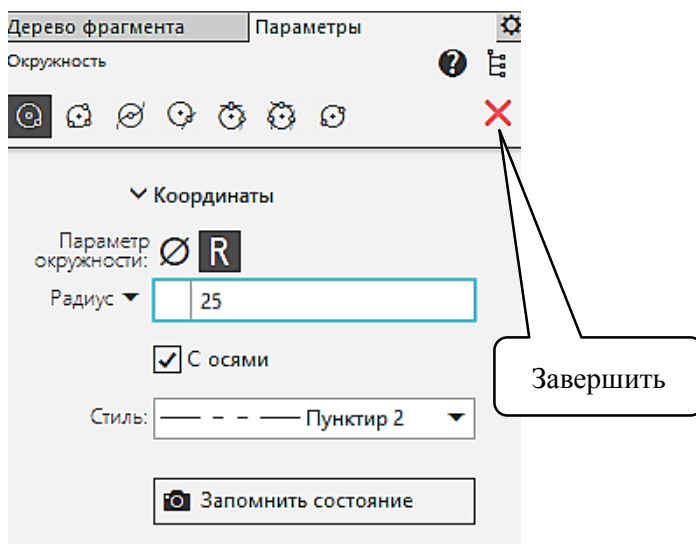


Рисунок 6

Траектория точки B построена (рисунок 7).

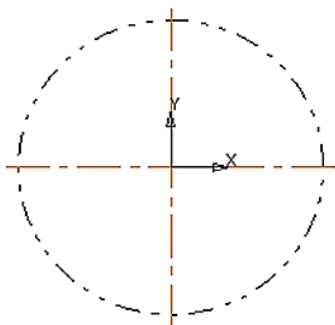


Рисунок 7

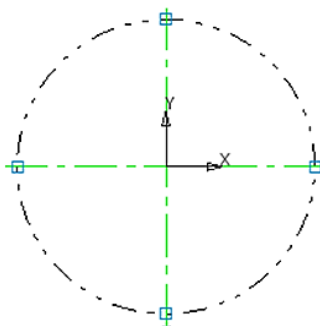


Рисунок 8

Точка D находится на расстоянии 47,5 мм правее точки A на горизонтальной оси, которую необходимо продлить в правую сторону. Для этого щелчком мыши на осевой линии выделите оси (рисунок 8). Затем подведите указатель мыши к правому маркеру на горизонтальной оси, нажмите левую кнопку мыши и, удерживая её нажатой, протяните вправо (рисунок 9).

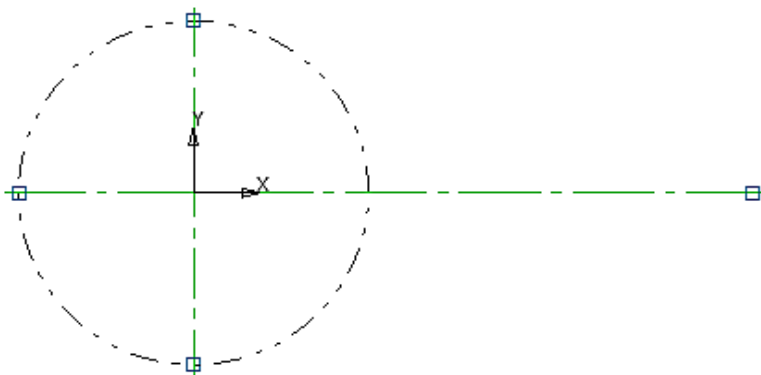


Рисунок 9

Для определения положения точки D выберите инструмент «Точка на заданном расстоянии» (рисунок 10) на панели инструментов «Геометрия».

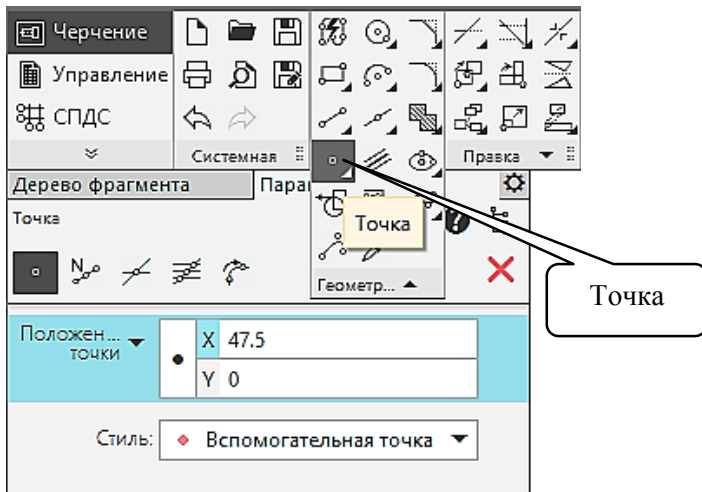


Рисунок 10

Укажите кривую для простановки точек. Ее наименование появится в поле «Объект» Панели параметров. В поле «Расстояние» введите расстояние между базовой точкой и первой создаваемой точкой – 47,5 мм. Стиль точки «Вспомогательная точка» оставьте по умолчанию. Введите количество создаваемых точек в поле «Количество точек». Укажите точку на кривой – базовую точку. Переместите курсор в нужную сторону. На экране появится фантом создаваемой точки. Зафиксируйте его щелчком мыши. Точка D построена (рисунок 11).

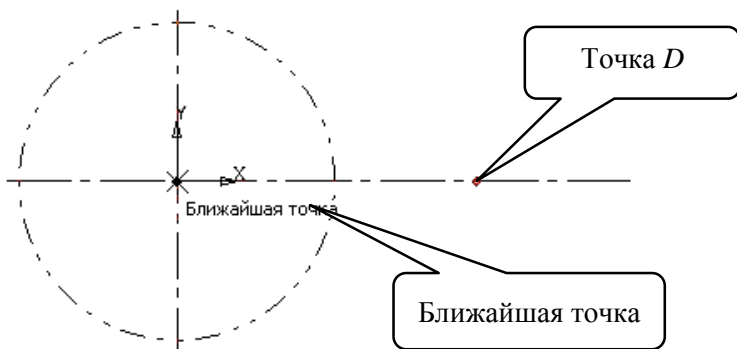


Рисунок 11

Траекторией точки C будет дуга окружности радиуса $R=35$ мм с центром в точке D . Построение этой окружности выполняется также, как и построение траектории точки B (см. рис. 7).

В качестве начального первого плана механизма выберите план, соответствующий одному из **крайних положений выходного звена** (ползуна), например, крайнему правому. В этом положении кривошип AB и шатун BC направлены по одной линии и их суммарная длина составляет 75 мм. Проведите окружность радиуса 75 мм с центром в точке A и получите засечку на траектории точки C (рисунок 12).

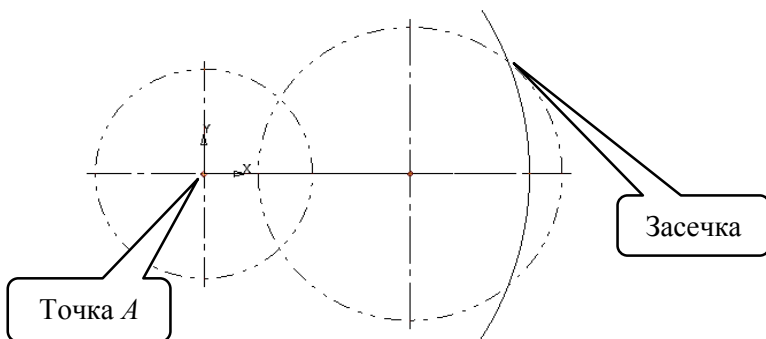


Рисунок 12

Далее выберите инструмент «Вспомогательная прямая» (рисунок 13) на панели инструментов «Геометрия».

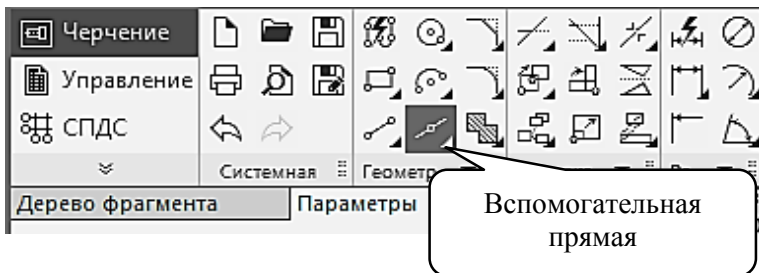


Рисунок 13

Проведите вспомогательную прямую через точку A и точку C (засечку в месте пересечения окружностей). Для этого подведите указатель мыши в точку A (привязка «Ближайшая точка»), нажмите левую кнопку мыши и, удерживая её нажатой, подведите к точке C (привязка «Пересечение»), отпустите левую кнопку мыши и затем щёлкните на точке C (рисунок 14).

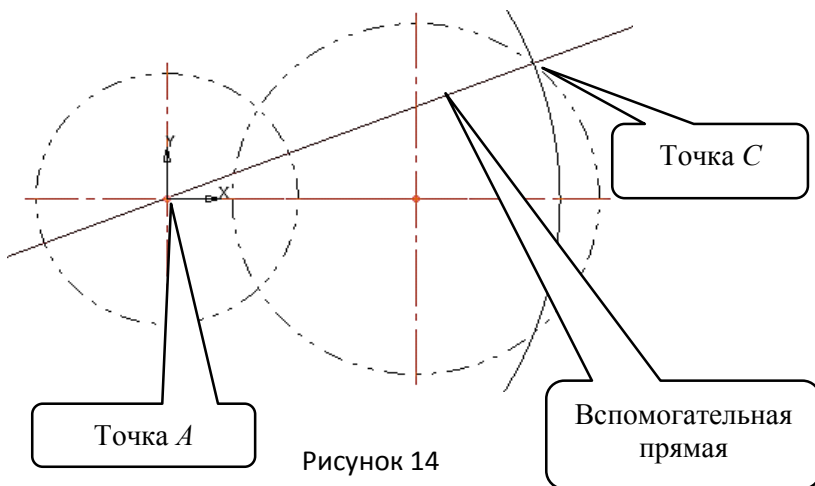


Рисунок 14

Выберите инструмент «Отрезок» (рисунок 15) на Инструментальной панели «Геометрия». На панели параметров выберите стиль линии «Основная».

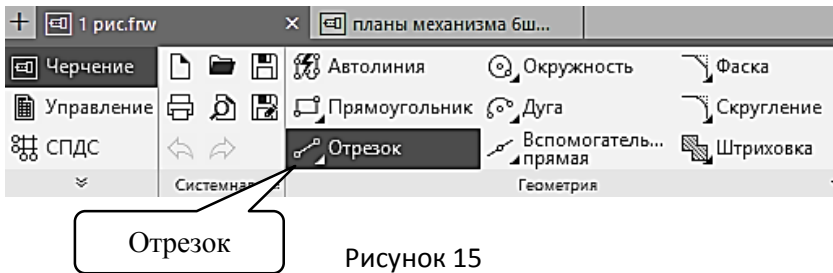


Рисунок 15

Последовательно соедините точки *A*, *B*, *C* и *D* основной линией с использованием привязок «Пересечение» и «Ближайшая точка» (рисунок 16).

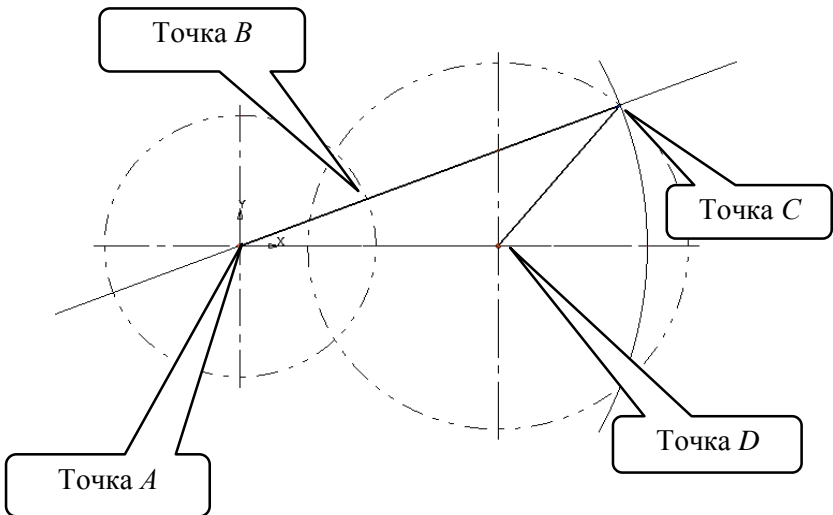


Рисунок 16

Большинство операций заиклены, то есть они не завершаются после создания объекта и позволяют создать несколько однотипных объектов подряд (или выполнить несколько однотипных действий). Например, за один запуск операции построения отрезка можно построить несколько отрезков. Для выхода из операции нужно после построения последнего объекта нажать кнопку **Завершить** (красный крестик) в области заголовка Панели параметров или клавишу <Esc>.

Вспомогательные линии удалите. Для этого последовательно их выделяйте щелчком мыши и используйте клавишу **Delete** на клавиатуре (рисунок 17).

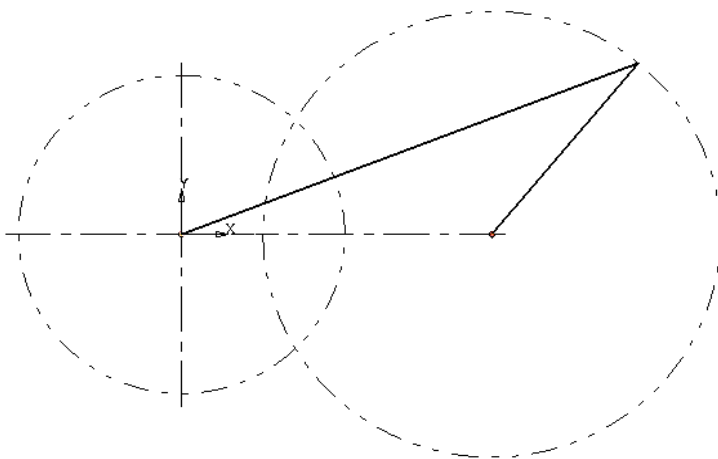


Рисунок 17

Траекторией точки E является дуга окружности радиуса $R=25$ мм с центром в точке D . Точка E лежит на пересечении этой окружности и отрезка DC (рисунок 18).

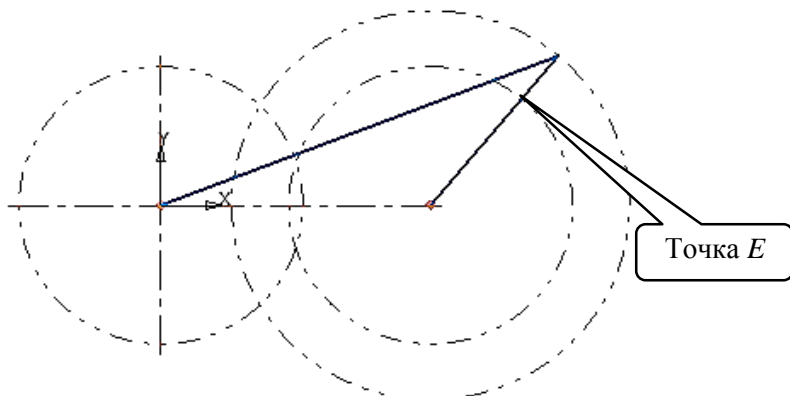


Рисунок 18

Траекторией движения точки F является горизонтальная ось. Продлите эту ось вправо (см. рис. 9). Далее проведите окружность радиуса $R=37,5$ мм с центром в точке E . Точка пересечения этой окружности и горизонтальной оси – начальное положение точки F ползуна (рисунок 19).

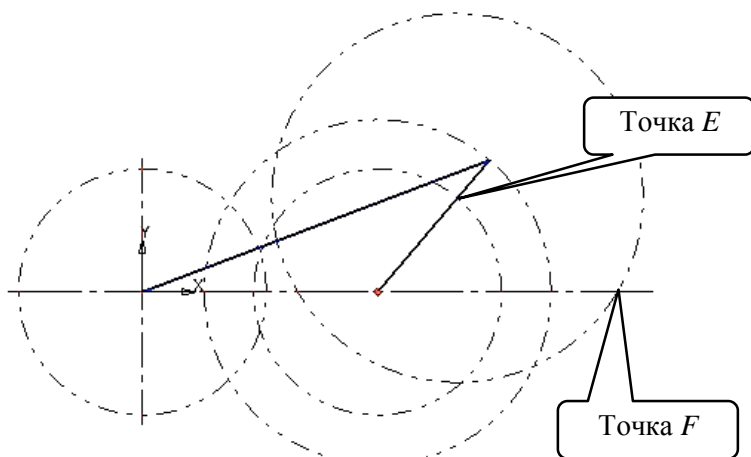


Рисунок 19

Изобразите шатун EF соединив точки E и F основной линией. Вспомогательные окружности удалите. Звенья механизма в крайнем правом положении ползуна построены (рисунок 20).

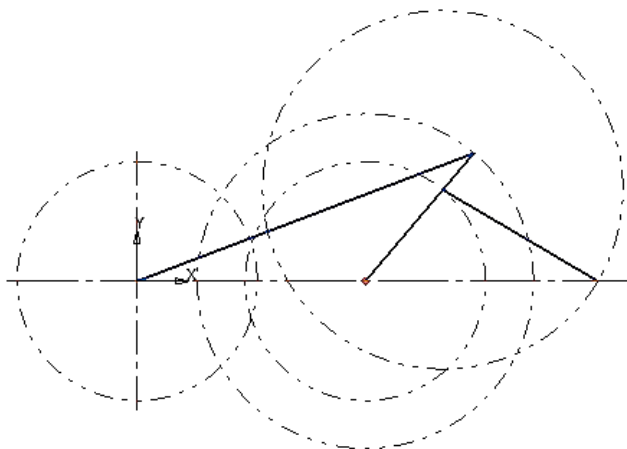


Рисунок 20

Для построения остальных пяти планов механизма разделите на 6 равных частей траекторию точки B , начиная от начальной точки с помощью инструмента «Точки по кривой» (рисунок 21) на активизированной Инструментальной панели «Геометрия».

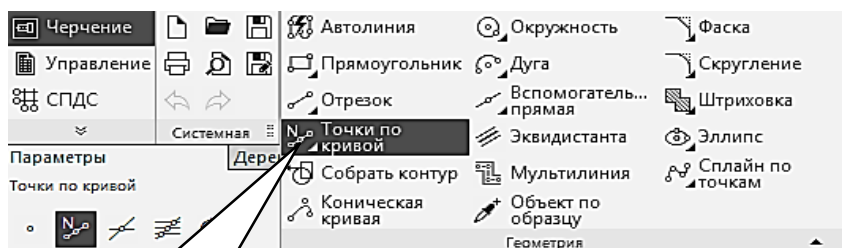


Рисунок 21

Для этого выберите на Панели параметров количество участков 6 (рисунки 22).

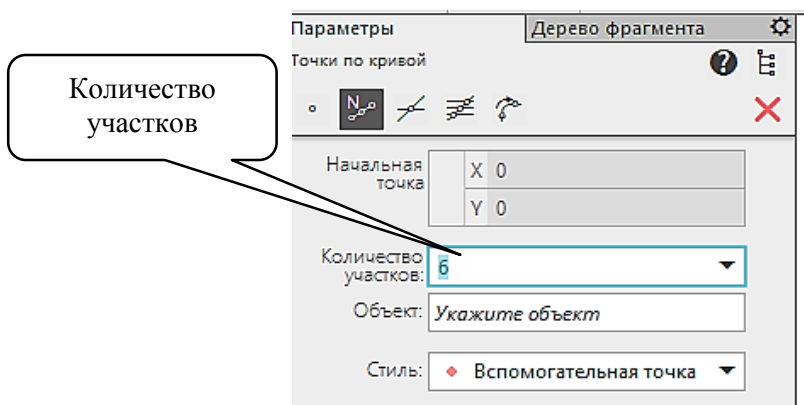


Рисунок 22

Затем щёлкните на точке *B* (см. рис 16). Окружность (траектория точки *B*) разделится на 6 равных частей (рисунки 23).

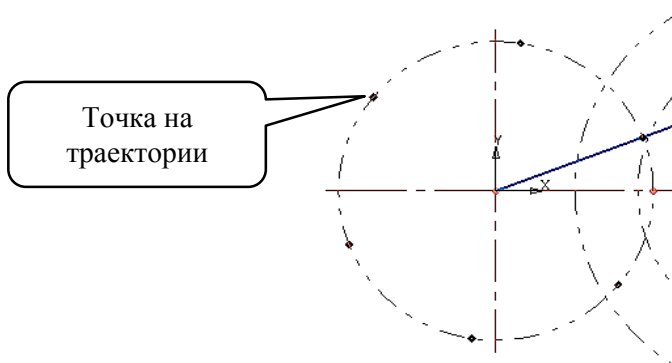
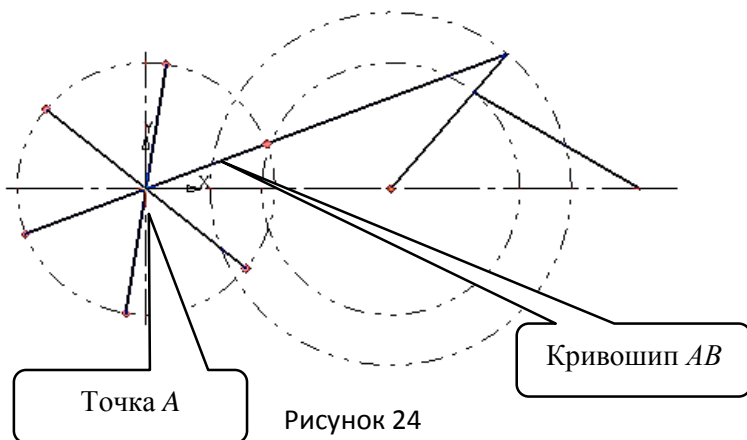
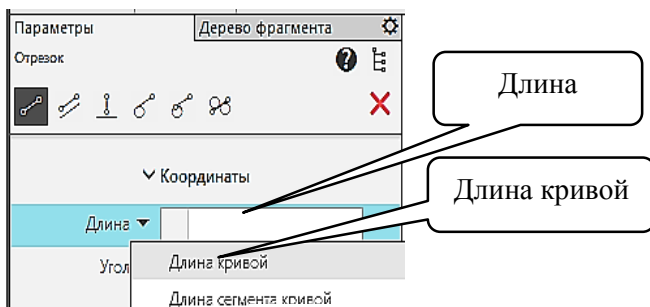


Рисунок 23

Полученные точки соедините с точкой A отрезками, и тем самым получите все шесть положений кривошипа AB (рисунок 24).



Положение точек C (см. рис. 16) на планах механизма определяется при помощи геометрического калькулятора. Для этого выберите инструмент «Отрезок» (см. рис. 15). Щелчком левой кнопки возле поля «Длина» на панели параметров вызовите контекстное меню. В нём выберите пункт «Длина кривой» (рисунок 25) и щёлкните левой кнопкой мыши на отрезке BC .



Далее соедините остальные точки B с траекторией точки C используя привязку «Пересечение» (рисунок 26).

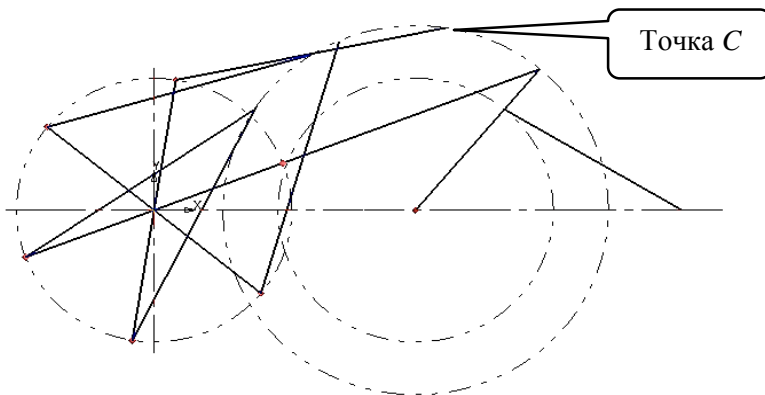


Рисунок 26

Отобразите коромысло CD в остальных пяти положениях механизма (рисунок 27) соединяя последовательно точки C со стойкой D аналогично, как и при построении кривошипа AB (см. рис. 24).

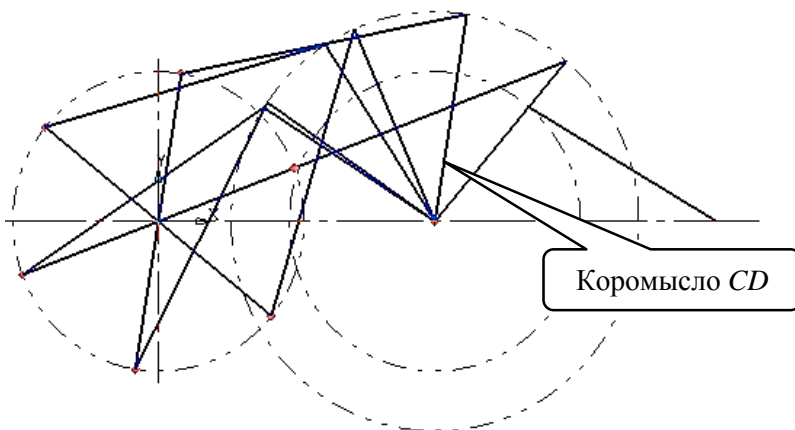


Рисунок 27

Затем при помощи геометрического калькулятора отобразите шатун EF в остальных пяти положениях используя привязку «Пересечение» (рисунок 28).

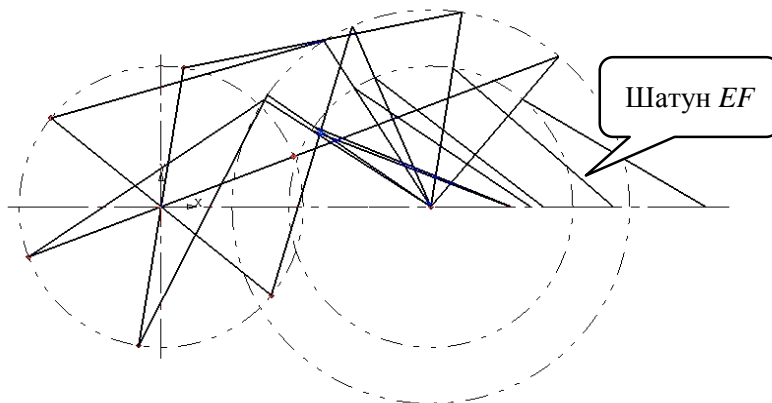


Рисунок 28

Кинематические пары в точках A, B, C, D, E и F изобразите в виде окружностей нужного диаметра в зависимости от масштабного коэффициента (например, 2 мм), используя привязки «Ближайшая точка» (рисунок 29).

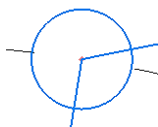


Рисунок 29



Рисунок 30

Для усечения лишних линий внутри полученных окружностей вызовите команду «Усечь кривую» (рисунок 30) на Инструментальной панели **Правка** (рисунок 31).



Усечь кривую

Рисунок 31

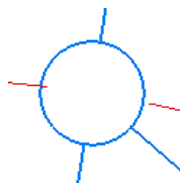


Рисунок 32

Используя инструмент «Усечь кривую» щелчками мыши на ненужных линиях удалите их (рисунок 32).

Для отображения на планах механизма кинематических пар в точках E , изобразите вторую внешнюю концентричную окружность (рисунок 33) нужного диаметра (например, 3 мм). При этом используйте привязки «Ближайшая точка». С помощью инструмента «Усечь кривую» удалите (см. рис. 31) ненужные линии (рисунок 34).

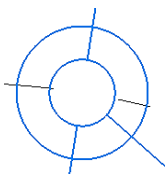
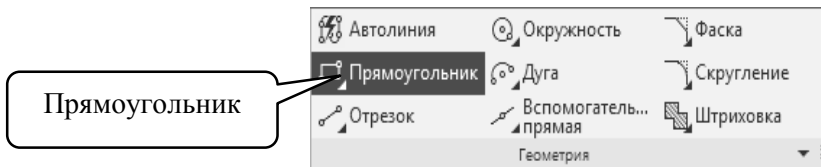


Рисунок 33



Рисунок 34

Для изображения ползуна выберите инструмент «Прямоугольник» на Инструментальной панели «Геометрия» (рисунок 35).



Прямоугольник

Рисунок 35

В панели параметров выберите «Прямоугольник по центру и вершине» (рисунок 36) задайте высоту и ширину прямоугольника (например, 5 мм и 10 мм соответственно).

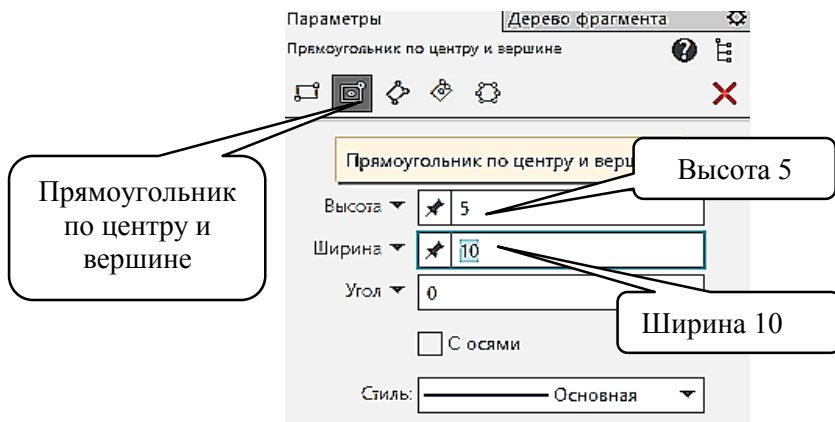


Рисунок 36

Используя привязку «Ближайшая точка» в крайнем правом положении ползуна, нарисуйте ползун и, используя инструмент «Усечь кривую» (см. рис. 31), удалите лишние линии (рисунок 37).

Далее выберите инструмент «Прямоугольник» и нарисуйте под ползуном прямоугольник произвольных размеров (рисунок 38).



Рисунок 37

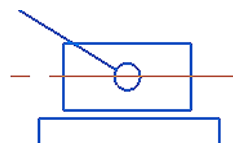


Рисунок 38

На Инструментальной панели «Геометрия» выберите инструмент «Штриховка» (рисунок 39).

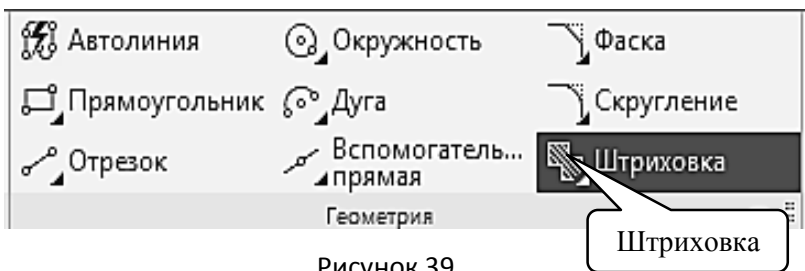


Рисунок 39

На панели параметров выберите стиль металл, шаг штриховки (например 1,0), угол 45,0 и другие параметры (рисунок 40), щелкните левой кнопкой мыши в пределах прямоугольника (см. рис. 38).

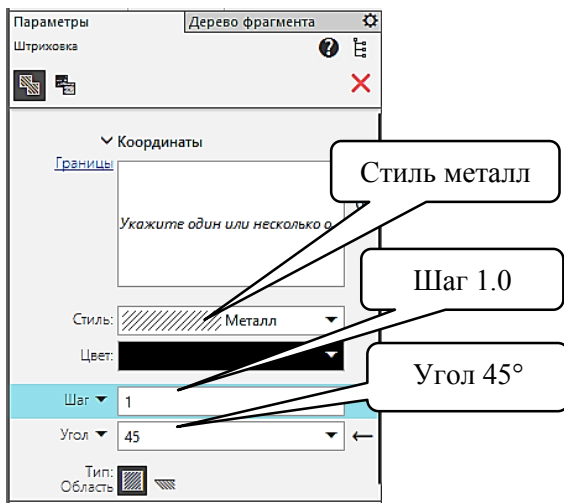


Рисунок 40

Закройте параметры «Штриховки» щелчком на кнопке **Создать объект** (зелёная пометка) на Панели параметров.

Щелчком мыши на контурной линии выделите прямоугольник и удалите его.

Постройте над штриховкой прямую контурную линию (рисунок 41).

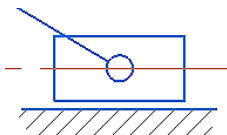


Рисунок 41

Для изображения неподвижной точки A (стойки) отрезками нарисуйте изображение стойки используя привязки «Ближайшая точка» и «Выравнивание» (рисунок 42). Заштрихуйте прямоугольник в нижней части стойки (см. рис 39, 40) и удалите с помощью инструмента «Усечь кривую» (см. рис. 31) ненужные линии (рисунок 43).

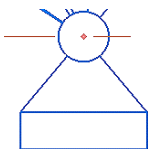


Рисунок 42

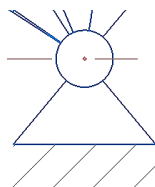


Рисунок 43

Для отображения подобной стойки в точке D скопируйте построенную стойку. Для копирования стойки выделите всю стойку, удерживая левую кнопку мыши и нажмите *ctrl+c*. Затем щёлкните левой кнопкой на свободном месте экрана и нажмите *ctrl+v*. Перетащите фантом стойки в точку D , используя привязку «Ближайшая точка» и щелкните левой кнопкой мыши. Закройте Панель параметров щелчком мыши на кнопке **Завершить**.

Для обозначения точек вызовите команду «Надпись» в группе Инструментальной панели Обозначения (рисунок 44).

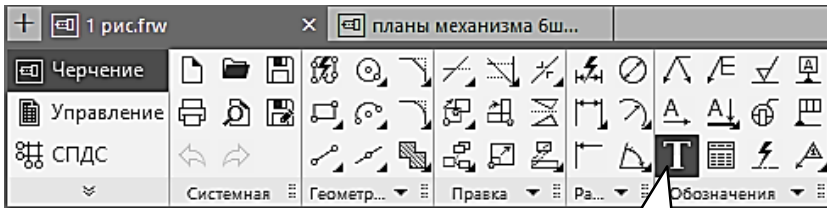


Рисунок 44

Надпись

Далее щелчком левой кнопкой мыши в любом месте чертежа введите текстовое поле. Убедитесь, что на панели параметров выбран шрифт «GOST type A ABCDEF», высота символов 2.5, курсив (рисунок 45).

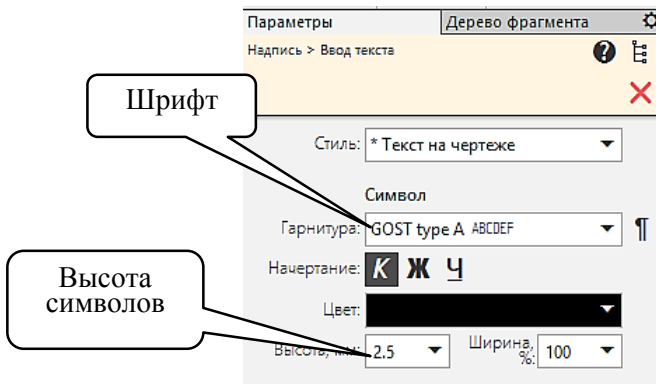


Рисунок 45

Напишите в текстовом поле букву, например, *B*. Для того, чтобы вписать нижний индекс выполните команду «Вставка» – «Индексы» – «Средней высоты» (рисунок 46).

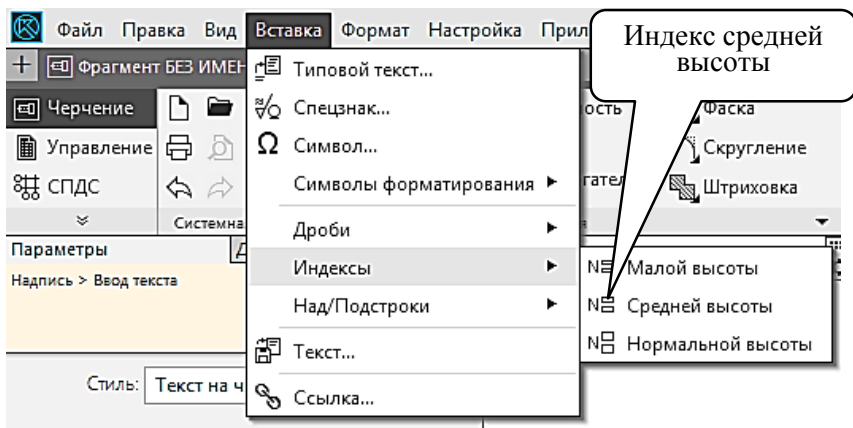


Рисунок 46

Для перехода на нижний индекс в случае если программа предложит верхний индекс нажмите **Enter**, затем **Backspace**, впишите нужную цифру и щелкните на кнопке **Создать объект** на **Панели управления**. Аналогично напишите обозначения других точек на планах механизма.

Примечание. Если недостаточно места для обозначения точки и текст оказывается поверх линий плана (рисунок 47) проделайте следующие действия:

1. Выделите текст щелчком левой кнопки мыши.
2. Вызовите контекстное меню щелчком правой кнопки мыши.
3. В контекстном меню снимите пометку с пункта «Очистить фон» (рисунок 48).

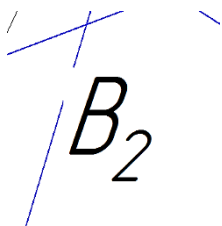


Рисунок 47

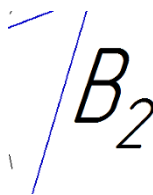
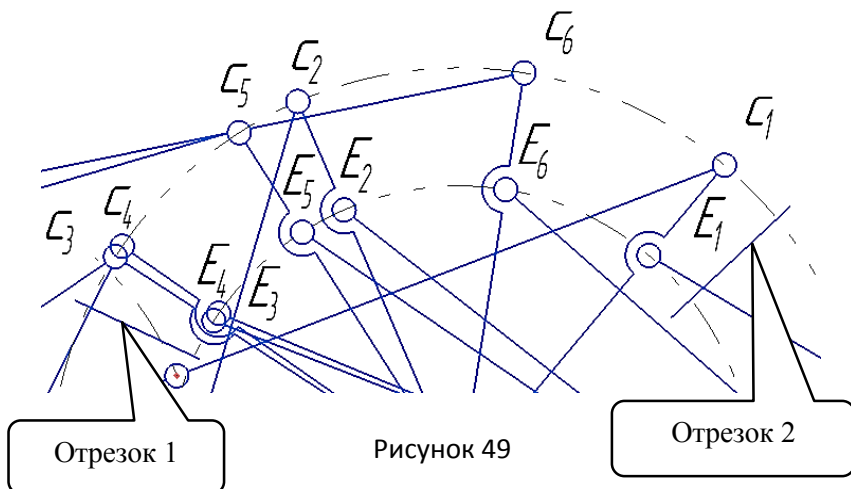
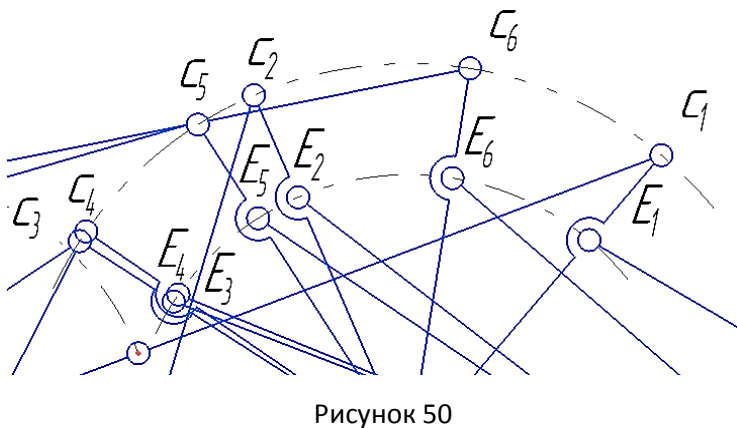


Рисунок 48

Траектории точек C и E представляют собой дуги. Для отображения траекторий движения точек C и E , совершающих неполное вращательное движение выберите инструмент «Отрезок» и нарисуйте два отрезка (отрезок 1 и отрезок 2), как это показано на рисунке 49.



Далее при помощи инструмента «Усечь кривую» удалите части окружностей и вспомогательные отрезки 1 и 2 (рисунок 50).



Для отображения дугообразной стрелки выберите на инструментальной панели «Геометрия» инструмент «Дуга по 2 точкам и углу раствора» на (рисунок 51).

На панели параметров введите в поле «Угол раствора» 120. Выберите направление дуги «По часовой стрелке», стиль – «Основная».

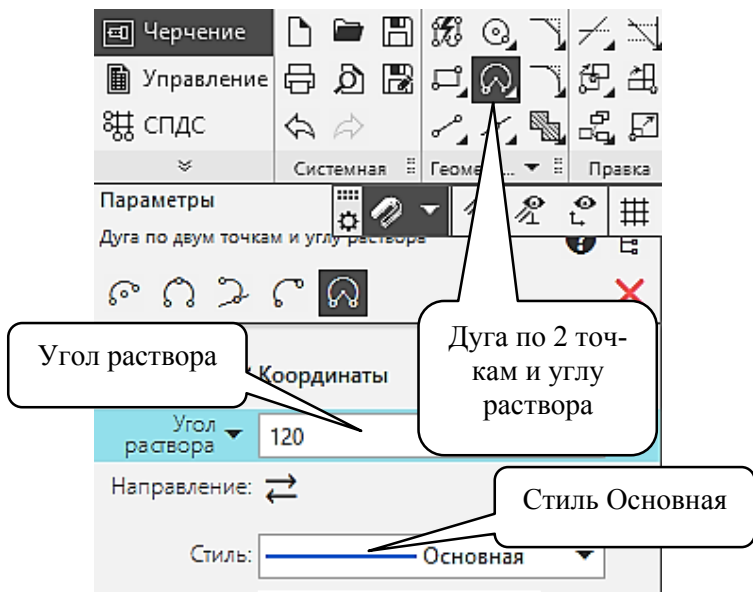


Рисунок 51

На звене *AB* в пятом положении механизма в любом свободном месте нарисуйте дугу. Радиус дуги выберите произвольно, но так чтобы размеры дуги получились соизмеримыми с размерами звена *AB*. Щёлкните на кнопке «Отменить» на панели параметров.

На Инструментальной панели «Геометрия» выберите инструмент «Отрезок». С помощью двух отрезков произвольной длины с использование привязки «Выравнивание» дорисуйте стрелку (рисунок 52). Щёлкните на кнопке «Отменить» на панели параметров.

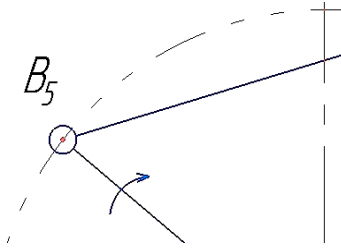


Рисунок 52

Для отображения символа масштабного коэффициента (μ) выберите инструмент «Надпись» (см. рис 44) и щелчком мыши на свободном месте чертежа введите текстовое поле. Затем выполните команду «Вставка» – « Ω Символ». В открывшемся окне «Символ» задайте шрифт «*Times New Roman*» и набор символов «Греческий и Коптский» (рисунок 53). Выделите символ μ и щелкните ОК.

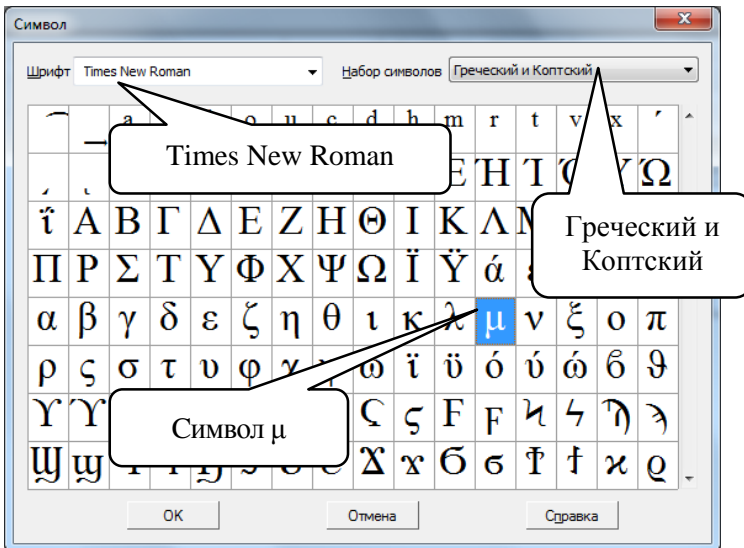


Рисунок 53

Используя инструмент «Надпись» (см. рис. 44) впишите с клавиатуры значение масштабного коэффициента. Размерность м/мм вставьте при помощи инструмента «Дроби». Для этого выполните команду «Вставка» – «Дроби» – «Средней высоты» (рисунки 54).

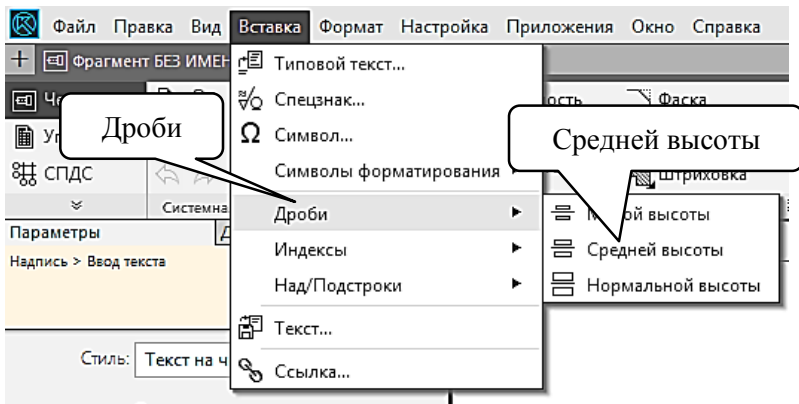


Рисунок 54

В результате проделанных действий получится надпись (рисунок 55).

$$\mu_1 = 0,004 \frac{\text{м}}{\text{мм}}$$

Рисунок 55

Планы механизма построены (рисунок 56).

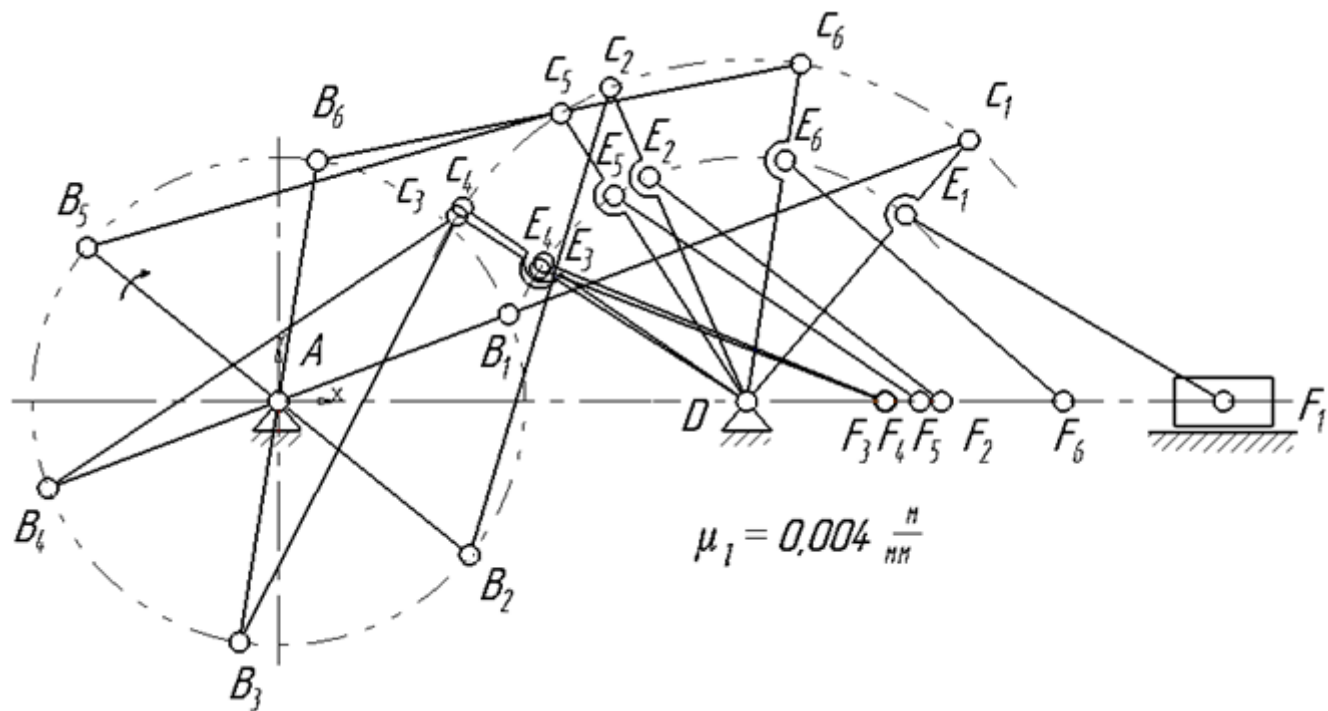


Рисунок 56

4 КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЫЧАЖНОГО МЕХАНИЗМА

4.1 ПОСТРОЕНИЕ ПЛАНОВ СКОРОСТЕЙ

Целью кинематического анализа является определение ускорений центров масс и угловых ускорений звеньев механизма в нескольких положениях ведущего звена. В данном пособии в учебных целях методика построений планов скоростей и ускорений в КОМПАС-3D показана только для одного (пятого) положения механизма. Поэтому на ранее построенных совмещенных планах механизма (см. рис. 56) выделите и удалите всё, что не относится к пятому положению (кроме ползуна со стойкой). Затем выделите ползун со стойкой, перетащите его из точки F_1 в точку F_5 . Добавьте номера звеньев (1, 2, 3, 4 и 5). Неподвижные звенья (стойки) обозначьте цифрой 0. Кинематические пары на планах механизма обозначьте прописными буквами (рисунок 57).

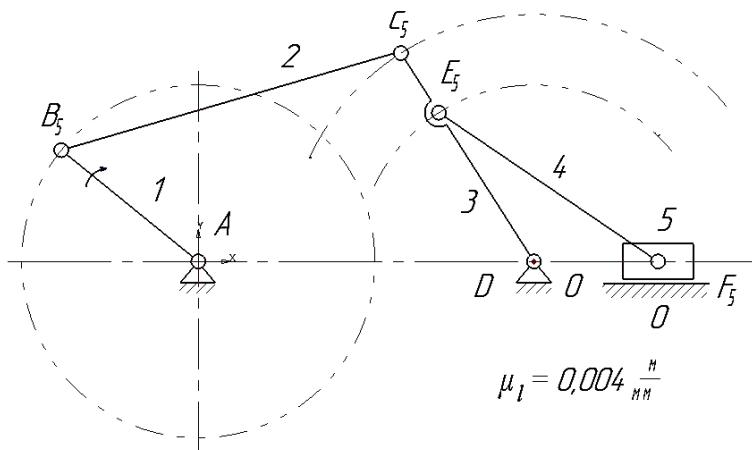


Рисунок 57

После окончания построений на панели задач во вкладке «Вид» выбрать «Обновить изображение (*Ctrl+F9*)» (рисунок 58).

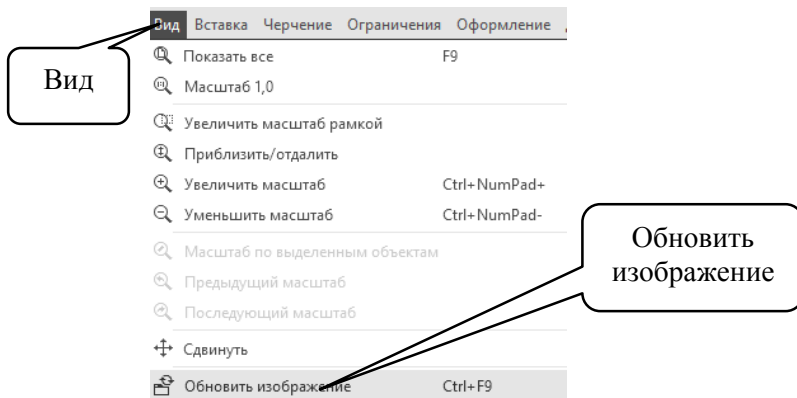


Рисунок 58

Построение плана скоростей начните с построения полюса p_v в непосредственной близости с планом положения. Для построения полюса используйте инструмент «Точка» (рисунок 59) на инструментальной панели «Геометрия».

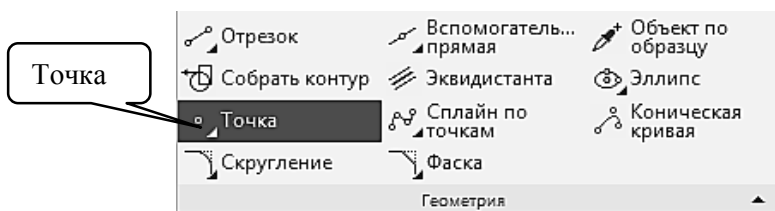


Рисунок 59

Стиль точки «Вспомогательная точка» выберите на панели параметров. Отобразите точку щелчком мыши в любом месте чертежа рядом с планом механизма.

Выберите инструмент «Надпись» (см. рис. 44). Щелкните левой кнопкой мыши в любом свободном месте чертежа. Убедитесь, что на панели свойств во вкладке «Формат» выбран шрифт «*GOST type A*», высота символов, например, 2.50 (см. рис. 45). **В отличие от обозначений точек на планах механизма, обозначения точек на планах скоростей выполняются строчными буквами.**

Напишите в текстовом поле букву *p*. Для отображения нижнего индекса *v* щелчком мыши активируйте закладку «Вставка» на панели параметров и выберите «Вставить индекс средней высоты» (см. рис. 46).

Переключитесь на нижний индекс и проставьте с клавиатуры букву *v*.

Точки *A* и *D* механизма неподвижны. Их скорости равны нулю. Поэтому точки *a* и *d* также находятся в полюсе. Впишите буквы *a* и *d* в текстовое поле с клавиатуры. Щелкните на кнопке **Завершить команду** (рисунок 60).



Рисунок 60

Выделите полученную надпись и перетащите её с помощью мыши к полюсу (рисунок 61). Щелчком на свободном месте экрана отмените выделение.

В соответствии с исходными данными (см. табл. 1) кривошип 1 вращается с постоянной частотой $n_1 = 140$ об/мин. Угловая скорость кривошипа будет равна:

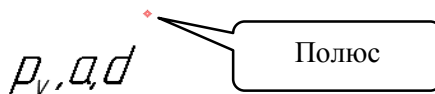


Рисунок 61

$$\omega_1 = \frac{\pi \cdot n_1}{30} = \frac{3,14 \cdot 140}{30} = 14,66 \text{ с}^{-1}.$$

Модуль вектора скорости точки B равен:

$$V_B = \omega_1 \cdot l_{AB} = 14,66 \cdot 0,1 = 1,466 \text{ м/с.}$$

Масштабный коэффициент скорости принимается произвольно, например $\mu_v = 0,04 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Длина вектора скорости $p_v b$ на плане скоростей, будет равна:

$$p_v b = \frac{V_B}{\mu_v} = \frac{1,466}{0,04} = 36,65 \text{ мм.}$$

Вектор скорости $p_v b$, направлен по касательной к траектории движения точки B перпендикулярно кривошипу AB на плане механизма в направлении угловой скорости ω_1 .

Выберите инструмент «Перпендикулярный отрезок» на панели инструментов «Геометрия». На панели параметров задайте стиль линии «Тонкая» (рисунок 62)

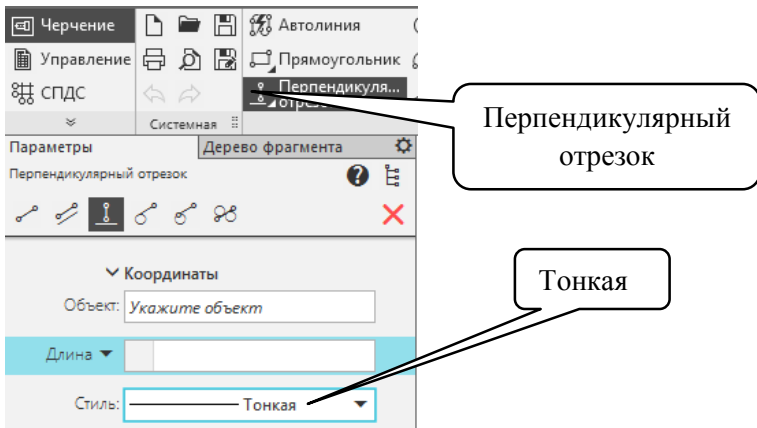


Рисунок 62

Щёлкните на звене AB на плане механизма (звено выделится красным цветом). Используя привязку «Ближайшая точка» щёлкните на точке p_v . В поле «Длина» на панели свойств запишите длину отрезка $p_v b$ (36,65 мм), направьте отрезок из полюса в сторону кривошипа AB и щёлкните левой кнопкой мыши (рисунок 63). Закончите построение щёлчком левой кнопкой мыши на кнопке «Завершить» (см. рис. 60).

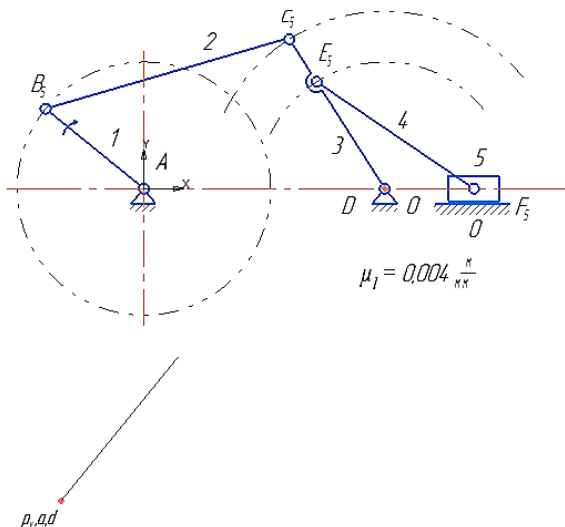


Рисунок 63

Обозначьте конец полученного отрезка строчной буквой b (рисунок 64).

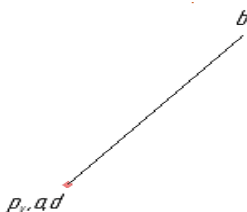


Рисунок 64

Шатун BC движется плоскопараллельно, поэтому на основании теоремы «О сложении скоростей», вектор скорости точки C можно определить из векторного уравнения $\vec{V}_C = \vec{V}_B + \vec{V}_{CB}$.

В данном векторном уравнении скорость \vec{V}_B является переносной, а относительной скоростью является \vec{V}_{CB} . Неизвестные по модулю, но известные по направлению векторы \vec{V}_C и \vec{V}_{CB} подчеркните одной чертой, вектор \vec{V}_B известный по модулю и направлению – двумя.

$$\underline{\vec{V}_C} = \underline{\vec{V}_B} + \underline{\vec{V}_{CB}}$$

Вектор \vec{V}_C перпендикулярен коромыслу CD , а вектор \vec{V}_{CB} перпендикулярен шатуну BC . Векторное уравнение решается графически.

Для удобства построений воспользуйтесь вспомогательными линиями с помощью инструмента «Перпендикулярная прямая» на инструментальной панели «Геометрия» (рисунок 65).

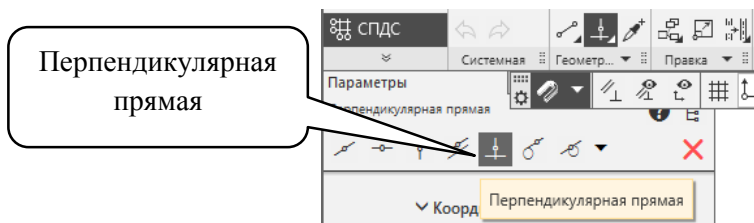


Рисунок 65

Для того чтобы провести вспомогательную линию через точку b на плане скоростей перпендикулярно шатуну BC на плане механизма щелкните на звене BC (звено выделится красным цветом). Используя привязку «Ближайшая точка» в точке b щелчком мыши отобразите вспомогательную перпендикулярную прямую и щелкните на ней левой кнопкой мыши. Вспомогательная прямая выделится красным цветом (рисунок 66).

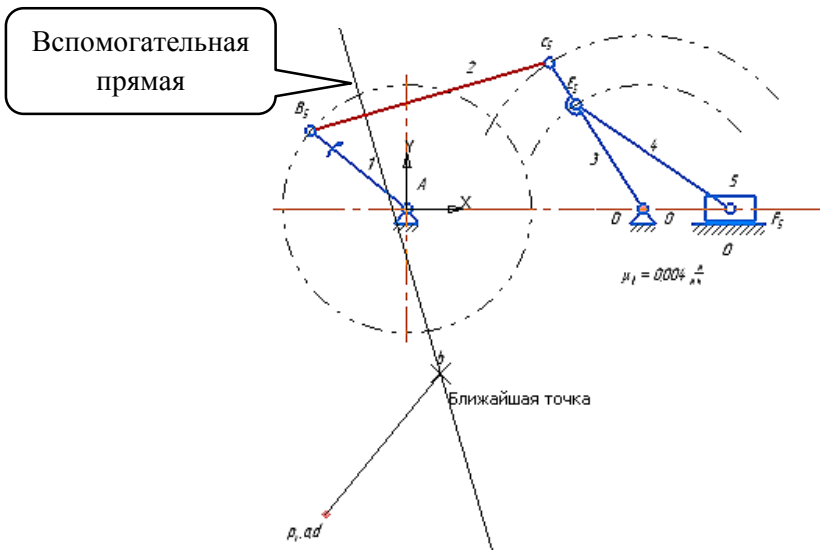


Рисунок 66

Аналогично выполните построение вспомогательной линии проходящей через полюс p_v перпендикулярно коромыслу CD . Точка пересечения вспомогательных прямых – точка c на плане скоростей. Обозначьте эту точку. Завершите построение вспомогательных линий щелчком на кнопке «Завершить» (см. рис. 60).

Отобразите стрелки на векторах скоростей с помощью линий-выносок. Для этого выберите инструмент «Линия-выноска» на инструментальной панели «Обозначения» (рисунок 67).

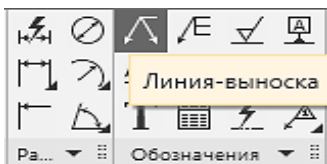


Рисунок 67

Линия-выноска на плане скоростей должна проводиться в направлении противоположном направлению вектора. Например, вектор скорости точки B направлен от полюса p_v к точке b . Для изображения стрелки используя привязки «Ближайшая точка» щёлкните на точке b , а затем на точке p_v . Для завершения построения каждой из стрелок щёлкайте на кнопке **Создать объект** (2 раза). Построения завершите щелчком на кнопке **Завершить** на Панели управления.

Для настройки размера стрелок Линии-выноски воспользуйтесь следующей командой: **Настройка – Параметры – Линия-выноска – Параметры** (рисунок 68).

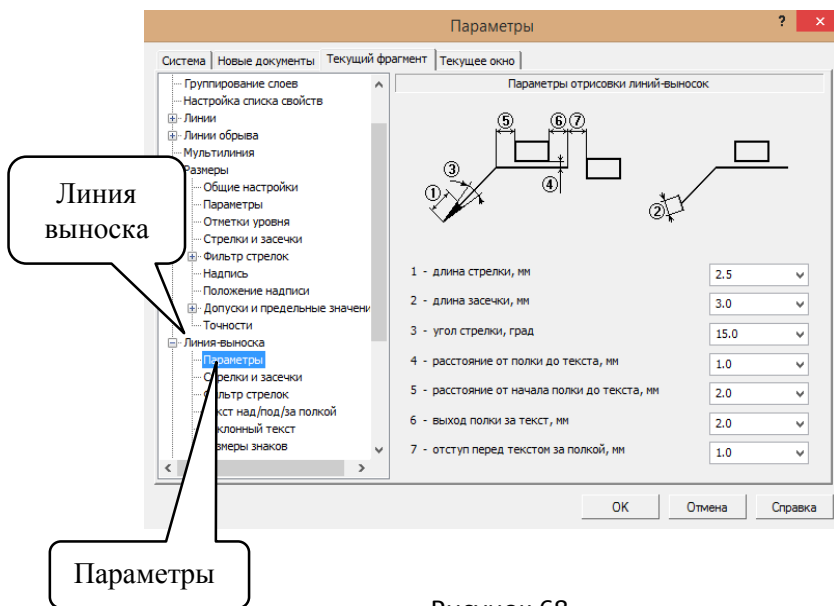


Рисунок 68

Вспомогательные линии выделите и удалите (рисунок 69).

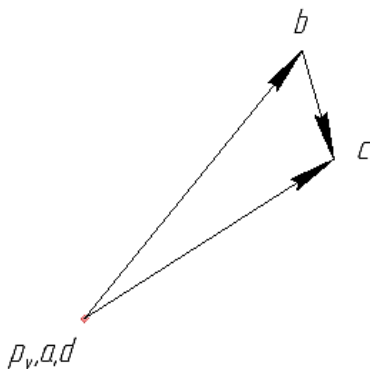


Рисунок 69

Положение точки e на плане скоростей определяется на основании **теоремы подобия**. Так как точка E лежит на звене CD , то на плане скоростей точка e будет находится на отрезке $p_v c$ и будет делить его в той же **пропорции**, в какой точка E делит звено CD , то есть

$$\frac{p_v e}{p_v c} = \frac{l_{DE}}{l_{CD}}.$$

Активизируйте инструментальную панель «Диагностика» и выберите инструмент «Расстояние между 2 объектами» (рисунок 70).

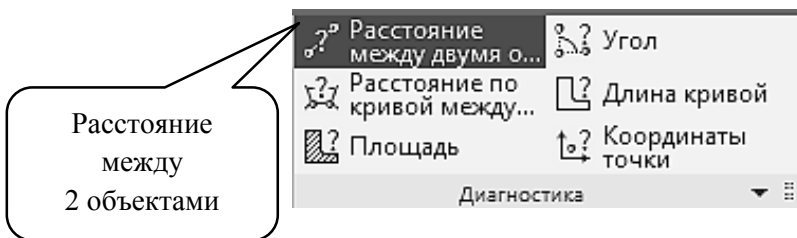


Рисунок 70

Для измерения отрезка $p_v c$ на плане скоростей щёлкните на точке p_v , а затем на точке c используя привязки «Ближайшая точка». Результат измерения отобразится в окне «Информация» (рисунок 71). $L1 = 31,407489$ мм.

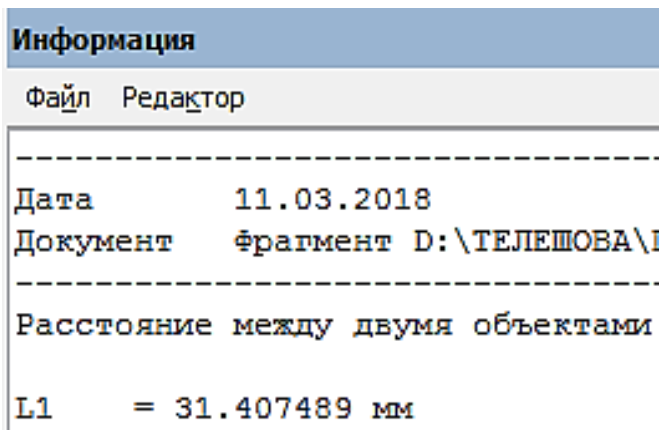


Рисунок 71

С учётом исходных данных (см. таблица 1) отрезок $p_v e$ будет равен:

$$p_v e = p_v c \cdot \frac{l_{DE}}{l_{CD}} = 31,4 \cdot \frac{0,1}{0,14} = 22,4 \text{ мм.}$$

Выберите инструмент «Точка на заданном расстоянии» на инструментальной панели «Геометрия» (рисунок 72). Укажите на панели свойств «Расстояние» – 22,4 мм и «Количество точек» – 1.

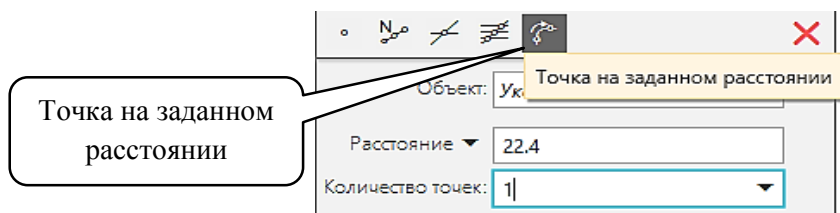


Рисунок 72

Для отображения точки e на векторе $p_v c$ на расстоянии 22,4 мм от полюса щёлкните левой кнопкой мыши на векторе $p_v c$ (вектор выделится красным цветом). Затем щёлкните левой кнопкой мыши на точке p_v , используя привязку «Ближайшая точка». Щелчком левой кнопкой мыши на свободном месте экрана закончите построение. Щёлкните на кнопке «Прервать команду». Полученную точку обозначьте буквой e (рисунок 73)

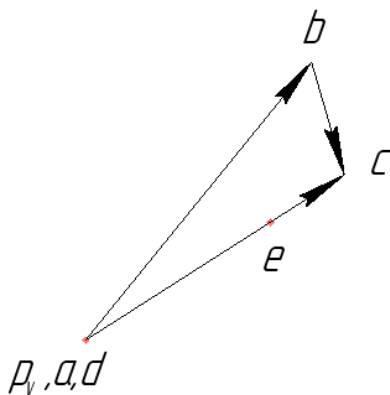


Рисунок 73

Для определения скорости точки F составьте векторное уравнение

$$\underline{\vec{V}}_F = \underline{\vec{V}}_E + \underline{\vec{V}}_{FE}.$$

В этом уравнении, переносной скоростью является \vec{V}_E , а относительной скоростью является \vec{V}_{FE} . Вектор скорости \vec{V}_F – горизонтален, а вектор скорости \vec{V}_{FE} перпендикулярен шатуну EF . Известные по модулю векторы \vec{V}_F и \vec{V}_{FE} подчеркнуты одной чертой, вектор \vec{V}_E , известный по модулю и направлению – двумя.

Векторное уравнение решается графически с использованием вспомогательных линий «Перпендикулярная прямая» и «Горизонтальная прямая» (рисунок 74).

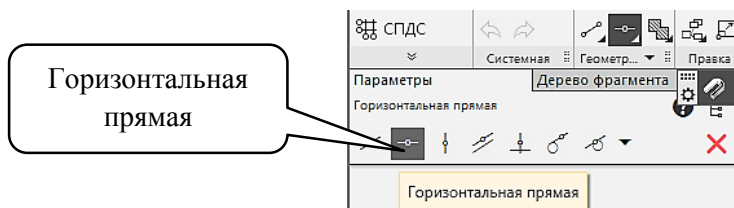


Рисунок 74

Проведите вспомогательную прямую перпендикулярно шатуну EF через точку e , используя привязку «Ближайшая точка». Через полюс p_v проведите вспомогательную горизонтальную прямую используя привязку «Ближайшая точка». Щёлкните на кнопке «Прервать команду».

Точка пересечения вспомогательных прямых является точкой f плана скоростей. Обозначьте её. Стрелки на векторах $p_v e$, $p_v f$ и ef изобразите с помощью линий-выносок. Удалите вспомогательные линии.

Используя инструмент «Надпись» запишите с клавиатуры значение масштабного коэффициента $\mu_v = 0,04 \frac{\text{м/с}}{\text{мм}}$ (см. рис. 53-55).

План скоростей для пятого положения механизма построен (рисунок 75).

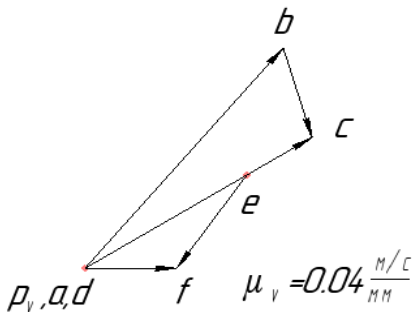


Рисунок 75

Постройте таблицу результатов. Для этого на инструментальной панели «Обозначения» выберите инструмент «Таблица» (рисунок 76).

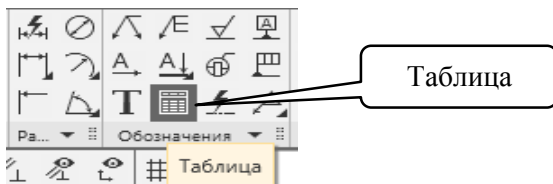


Рисунок 76

Щёлкните на любом свободном месте чертежа. В окне «Создать таблицу» задайте 2 строки, 10 столбцов, ширина столбца 15 мм, высота 10 мм. Щёлкните создать. Далее, используя инструмент «Надпись» заполните первую строку таблицы в соответствии с образцом (таблица 3).

Таблица 3

$\omega_1,$ с ⁻¹	$V_B,$ м/с	$V_{CB},$ м/с	$V_C,$ м/с	$V_E,$ м/с	$V_{FE},$ м/с	$V_F,$ м/с	$\omega_2,$ с ⁻¹	$\omega_3,$ с ⁻¹	$\omega_4,$ с ⁻¹

Над таблицей напишите заголовок **Значения скоростей**.

Запишите в таблицу уже известные значения ω_1 и V_B .

Измерьте длины векторов p_{ve} , p_{vc} , p_{vf} , bc и ef на плане скоростей (см. рис. 70 и 71). Полученные значения перемножьте на масштабный коэффициент μ_v . Результаты вычислений впишите в таблицу (рисунок 77).

Определите угловые скорости звеньев 2, 3 и 4.

Угловая скорость шатуна 2 равна:

$$\omega_2 = \frac{V_{CB}}{l_{BC}} = \frac{0,48}{0,2} = 2,4 \text{ с}^{-1}.$$

Угловая скорость коромысла 3 равна:

$$\omega_3 = \frac{V_{CD}}{l_{CD}} = \frac{1,25}{0,14} = 8,93 \text{ с}^{-1}.$$

Угловая скорость шатуна 4 равна:

$$\omega_4 = \frac{V_{FE}}{l_{EF}} = \frac{0,58}{0,15} = 3,87 \text{ с}^{-1}.$$

Результаты вычислений запишите в таблицу (рисунок 77).

Значение скоростей

$\omega_1, \text{с}^{-1}$	$V_B, \text{м/с}$	$V_{CB}, \text{м/с}$	$V_C, \text{м/с}$	$V_e, \text{м/с}$	$V_{FE}, \text{м/с}$	$V_f, \text{м/с}$	$\omega_2, \text{с}^{-1}$	$\omega_3, \text{с}^{-1}$	$\omega_4, \text{с}^{-1}$
-14,66	1,466	0,48	1,25	0,9	0,58	0,43	-2,4	-8,93	-3,87

Рисунок 77

Знак минус перед значением угловой скорости свидетельствует о её направлении по ходу часовой стрелки.

4.2 ПОСТРОЕНИЕ ПЛАНОВ УСКОРЕНИЙ

Построение плана ускорений начинается с отображения полюса p_a в непосредственной близости с планом положения (см рис. 61). Точки A и D на плане механизма неподвижны. Их ускорения равны нулю, поэтому точки a и d также находятся в полюсе (рисунок 78).

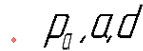


Рисунок 78

Масштабный коэффициент ускорения выбирается произвольно, например

$$\mu_a = 0,4 \frac{\text{м/с}^2}{\text{мм}}.$$

Создайте таблицу **Значения ускорений** (см. рис. 88) на свободном месте чертежа. В дальнейшем все результаты вычислений по мере их получения заносите в эту таблицу.

Точка B движется с постоянной угловой скоростью по дуге окружности и её ускорение равно $a_B = \omega_1^2 \cdot l_{AB} = -14,66^2 \cdot 0,1 = 21,49 \text{ м/с}^2$. Запишите полученный результат в таблицу (см. рис. 88).

Длина вектора ускорения точки B , на плане ускорений, будет равна:

$$p_a b = \frac{a_B}{\mu_a} = \frac{21,49}{0,4} = 53,73 \text{ мм}.$$

На плане ускорений вектор ускорения точки B **параллелен** кривошипу AB и **направлен** из полюса p_a в направлении **от точки B к точке A на плане механизма**.

Для построения вектора ускорения точки B используйте инструмент «Параллельный отрезок» на панели инструментов «Геометрия».

Задайте стиль линии «Тонкая» и из полюса p_a отложите отрезок длиной 53,73 мм. Конец отрезка обозначьте буквой b (рисунок 79).

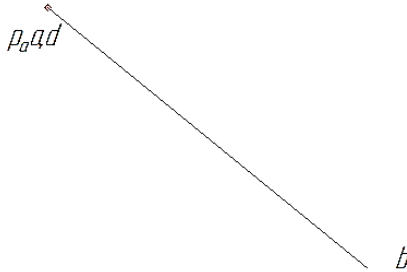


Рисунок 79

Точка C одновременно принадлежит шатуну BC и коромыслу CD . На основании теоремы «О сложении ускорений», можно записать следующие векторные уравнения для определения ускорения точки C :

$$\vec{a}_C = \vec{a}_B + \vec{a}_{CB}^n + \vec{a}_{CB}^\tau;$$

$$\vec{a}_C = \vec{a}_D + \vec{a}_{CD}^n + \vec{a}_{CD}^\tau.$$

Приравняйте их правые части и подчеркните **неизвестные по модулю** векторы одной чертой, а **известные по модулю и направлению** векторы – двумя.

$$\underline{\vec{a}_B} + \underline{\vec{a}_{CB}^n} + \underline{\vec{a}_{CB}^\tau} = \underline{\vec{a}_{CD}^n} + \underline{\vec{a}_{CD}^\tau}.$$

Полученное уравнение с двумя неизвестными может быть решено графически.

Вектор \vec{a}_{CB}^n **параллелен** шатуну BC и направлен от точки C к точке B . Вектор \vec{a}_{CD}^n **параллелен** коромыслу CD и направлен от точки C к точке D .

Модули нормальных составляющих относительных ускорений равны:

$$a_{CB}^n = \omega_2^2 \cdot l_{BC} = 2,4^2 \cdot 0,2 = 1,15 \text{ м/с}^2;$$

$$a_{CD}^n = \omega_3^2 \cdot l_{CD} = 8,93^2 \cdot 0,14 = 11,16 \text{ м/с}^2.$$

Полученные данные запишите в таблицу **Значения ускорений** (см. рис. 88).

Проведите вспомогательные параллельные прямые через точки b и d на плане ускорений соответственно параллельно звеньям BC и CD .

Отложите используя привязки «Ближайшая точка» и «Точка на кривой» из точки b , параллельно шатуну BC отрезок bn_2 , равный:

$$bn_2 = \frac{a_{CB}^n}{\mu_a} = \frac{1,15}{0,4} = 2,875 \text{ мм.}$$

Обозначьте конец отрезка n_2 (рисунок 80).

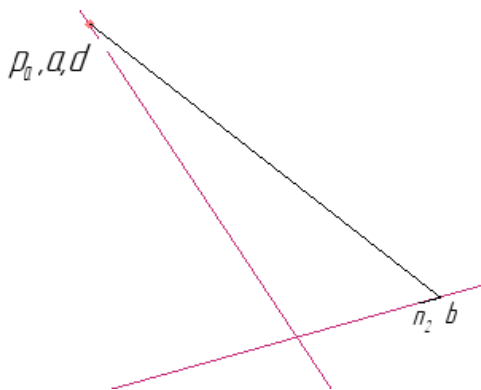


Рисунок 80

Далее из полюса p_a , параллельно коромыслу CD , отложите отрезок dn_3 , равный:

$$dn_3 = \frac{a_{CD}^n}{\mu_a} = \frac{11,16}{0,4} = 27,9 \text{ мм.}$$

Обозначьте его конец n_3 (рисунок 81).

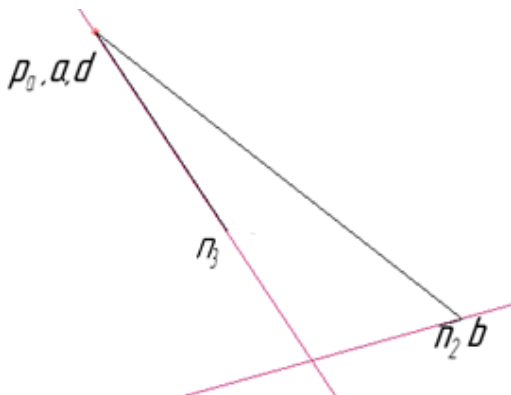


Рисунок 81

Удалите вспомогательные параллельные прямые.

Тангенциальные составляющие векторов ускорений \vec{a}_{CB}^t и \vec{a}_{CD}^t **перпендикулярны** соответственно шатуну BC и коромыслу CD .

Проведите вспомогательные перпендикулярные прямые через точки n_2 и n_3 соответственно **перпендикулярно** звеньям BC и CD . Полученную на пересечении двух вспомогательных линий точку обозначьте буквой c .

Соедините точки d, b, n_2 и n_3 с точкой c тонкими линиями при помощи отрезков используя привязки «Ближайшая точка» и «Пересечение». Стрелки на векторах отобразите с помощью линий-выносок. Удалите вспомогательные прямые (рисунок 82).

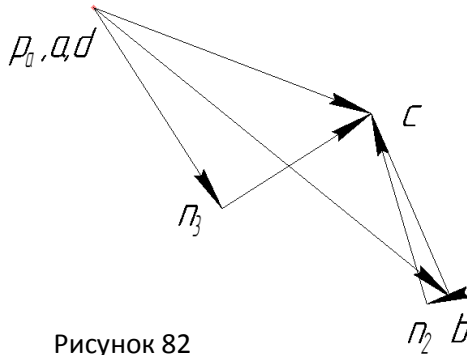


Рисунок 82

Измерьте длину отрезка p_{ac} при помощи инструмента «Расстояние между 2 точками». Для определения положения точки e , лежащей на этом векторе, воспользуйтесь теоремой подобия и рассчитайте длину отрезка p_{ae} .

$$p_{ae} = p_{ac} \cdot \frac{l_{DE}}{l_{CD}} = 34,8 \cdot \frac{0,1}{0,14} = 24,8 \text{ мм.}$$

При помощи инструмента «Точка на заданном расстоянии» на отрезке p_{ac} отобразите точку e на расстоянии 24,8 мм от полюса, обозначьте её и отобразите стрелку (рисунок 83).

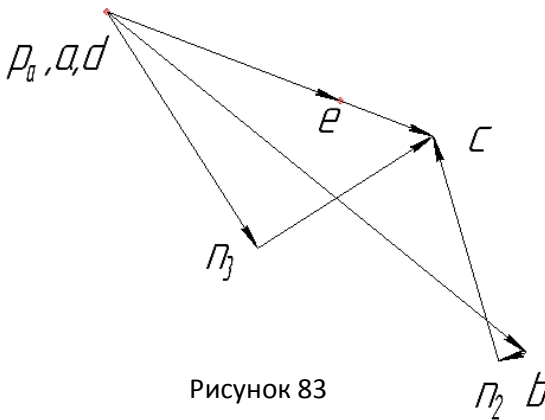


Рисунок 83

Длины отрезков p_{ae} и p_{ac} перемноженные на масштабный коэффициент μ_a соответствуют ускорениям a_E и a_C , которые равны соответственно $9,94 \text{ м/с}^2$ и $13,92 \text{ м/с}^2$. Запишите их значения в таблицу **Значения ускорений** (см. рис. 88).

Для определения ускорения точки F составьте векторное уравнение:

$$\vec{a}_F = \vec{a}_E + \vec{a}_{FE}^n + \vec{a}_{FE}^\tau.$$

В этом уравнении \vec{a}_E известно по величине и направлению. Нормальная составляющая относительного ускорения \vec{a}_{FE}^n **перпендикулярна** звену FE . Вычислите модуль a_{FE}^n .

$$a_{FE}^n = \omega_4^2 \cdot l_{EF} = 3,87^2 \cdot 0,15 = 2,25 \text{ м/с}^2.$$

Запишите полученное значение a_{FE}^n в таблицу **Значения ускорений** (см. рис. 88).

Направление вектора p_{af} на плане ускорений известно (**горизонтальная линия**).

Подчеркните в векторном уравнении известные и неизвестные величины для определения ускорения точки F .

$$\underline{\vec{a}}_F = \underline{\vec{a}}_E + \underline{\vec{a}}_{FE}^n + \underline{\vec{a}}_{FE}^\tau.$$

Вектор \vec{a}_{FE}^n направлен **параллельно** шатуну EF от точки F к точке E . Вектор \vec{a}_{FE}^τ **перпендикулярен** шатуну EF , а вектор ускорения \vec{a}_F – **горизонтален**.

Из конца вектора ускорения точки e , отложите **параллельно** шатуну EF отрезок en_4 , равный:

$$en_4 = \frac{a_{FE}^n}{\mu_a} = \frac{2,25}{0,4} = 5,62 \text{ мм.}$$

Обозначьте конец полученного отрезка n_4 . Через точку n_4 проведите вспомогательную прямую перпендикулярную EF , которая будет линией действия вектора тангенциальной составляющей \vec{a}_{FE}^τ , а через полюс p_a проведите вспомогательную горизонтальную линию. Точка пересечения линий – точка f . Обозначьте её.

Нарисуйте стрелки и удалите вспомогательные линии. Соедините тонкой линией точки e и f (рисунок 84).

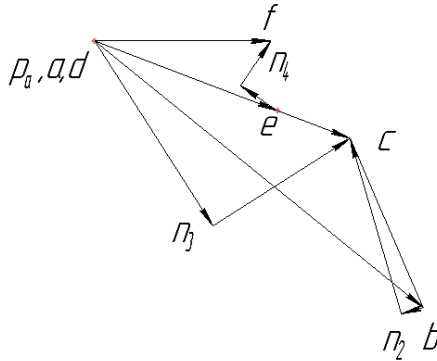


Рисунок 84

Измерьте на плане ускорений отрезки n_{2c} , n_{3c} и n_{4f} и перемножьте результаты измерений на масштабный коэффициент μ_a . Полученные результаты соответствующие тангенциальным составляющим ускорений a_{CB}^{τ} , a_{CD}^{τ} и a_{FE}^{τ} запишите в таблицу **Значения ускорений** (см. рис. 88). Определите угловые ускорения звеньев 2, 3 и 4.

$$\varepsilon_2 = \frac{a_{CB}^{\tau}}{l_{BC}} = \frac{9,3}{0,2} = 46,5 \text{ c}^{-2};$$

$$\varepsilon_3 = \frac{a_{CD}^{\tau}}{l_{CD}} = \frac{8,32}{0,14} = 59,4 \text{ c}^{-2};$$

$$\varepsilon_4 = \frac{a_{FE}^{\tau}}{l_{EF}} = \frac{2,73}{0,15} = 18,2 \text{ c}^{-2}.$$

Полученные результаты запишите в таблицу **Значения ускорений** (см. рис. 88).

Для определения сил инерции звеньев при проведении силового анализа механизма нужно знать **ускорения центров масс** звеньев.

Центр масс кривошипа 1 (точка S_1) совпадает с неподвижной точкой A , ускорение которой равно нулю.

Центр масс шатуна 2 (точка S_2) лежит на середине звена BC . Разделите отрезок cb на плане ускорений **на две равные части** пользуясь инструментом «Точка» и привязкой «Середина». Соедините эту точку с полюсом стрелкой-выноской и обозначьте S_2 .

Масса коромысла 3 в соответствии с исходными данными не задана.

Центр массы шатуна 4 (точка S_4) расположен на расстоянии $1/3 l_{EF}$ от точки E . Разделите отрезок ef на плане ускорений на **три равные части**. Для этого воспользуйтесь инструментом «Точка по кривой» на инструментальной панели «Геометрия» (рисунок 85).

На панели свойств укажите количество участков – 3.

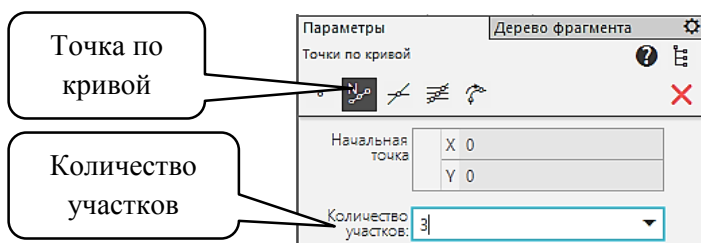


Рисунок 85

Щёлкните на отрезке ef на плане ускорений, затем на кнопке «Прервать команду». Обозначьте S_4 точку, лежащую ближе к точке e . (рисунок 86).

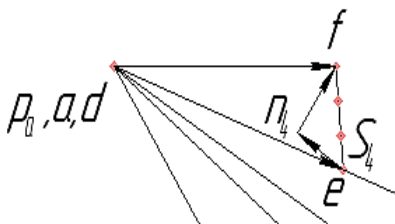


Рисунок 86

На плане ускорений соедините стрелками точки S_2 и S_4 с полюсом.

Центр масс точка S_5 ползуна совпадает с точкой F , поэтому ускорение центра массы звена 5 равно ускорению точки F .

Рядом с планом ускорений укажите масштабный коэффициент μ_a (рисунок 87).

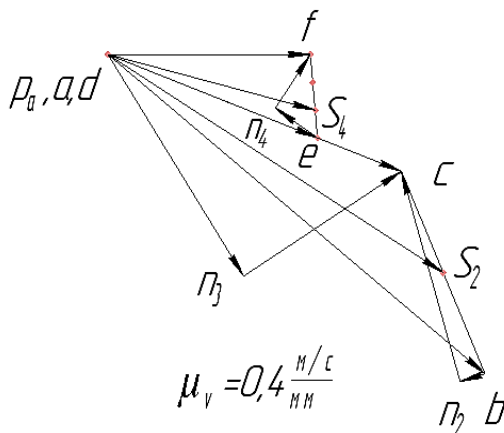
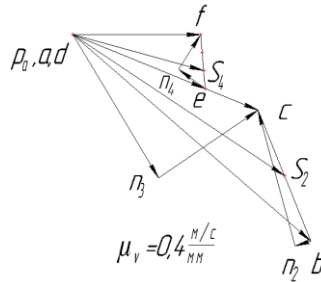
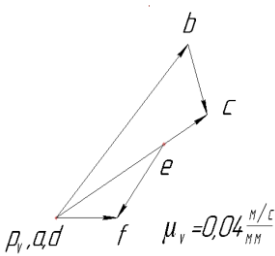
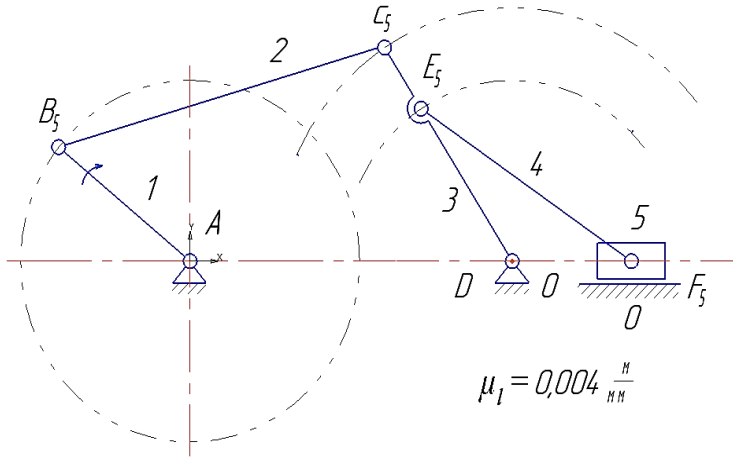


Рисунок 87

Измерьте на плане ускорений отрезки a_{S_2} и a_{S_4} , перемножьте их длины на масштабный коэффициент μ_a и тем самым определите ускорения этих точек, которые равны соответственно $17,5 \text{ м/с}^2$ и $9,48 \text{ м/с}^2$. Полученные данные запишите в таблицу **Значения ускорений** (см. рис. 88).

Оформите результаты кинематического анализа механизма в пятом положении ведущего звена в соответствии с рисунком 88.



Значение скоростей

$\omega_1, \text{с}^{-1}$	$V_B, \text{м/с}$	$V_{B5}, \text{м/с}$	$V_C, \text{м/с}$	$V_E, \text{м/с}$	$V_{E5}, \text{м/с}$	$V_D, \text{м/с}$	$\omega_2, \text{с}^{-1}$	$\omega_3, \text{с}^{-1}$	$\omega_4, \text{с}^{-1}$
-14,66	1,466	0,48	1,25	0,9	0,58	0,43	-2,4	-8,93	-3,87

Значение ускорений

$a_B, \text{м/с}^2$	$a_{B5}^0, \text{м/с}^2$	$a_{B5}^r, \text{м/с}^2$	$a_C^0, \text{м/с}^2$	$a_C^r, \text{м/с}^2$	$a_E, \text{м/с}^2$	$a_E^0, \text{м/с}^2$	$a_{E5}^r, \text{м/с}^2$	$a_D, \text{м/с}^2$	$\varepsilon_2, \text{с}^{-2}$	$\varepsilon_3, \text{с}^{-2}$	$\varepsilon_4, \text{с}^{-2}$	$a_{S2}, \text{м/с}^2$	$a_{S4}, \text{м/с}^2$
21,49	1,15	9,3	11,16	8,32	13,92	9,94	2,25	2,73	46,45	59,4	18,2	17,5	9,48

Рисунок 88

5 КИНЕТОСТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА

Задачей **кинетостатического** (силового) анализа является определение **реакций** в кинематических парах механизма, а также определение **внешнего уравновешивающего момента сил**, приложенного к ведущему звену (кривошипу).

Под реакциями в кинематических парах подразумеваются силы, с которыми звенья механизма воздействуют друг на друга.

Например, звено 2 и звено 3 соединены кинематической парой.

Принято реакцию звена 2 на звено 3 обозначать R_{23} , а реакцию звена 3 на звено 2 – R_{32} . То есть в векторном виде $\vec{R}_{32} = -\vec{R}_{23}$.

При силовом анализе механизмов используют принцип кинестатики, в соответствии с которым, для нахождения реакций в кинематических парах можно использовать **уравнения равновесия статики**, если к внешним силам, действующим на звенья механизма, прибавить **силы инерции**.

Главный вектор сил инерции звена 2 равен:

$$\vec{F}_{i2} = -m_2 \cdot \vec{a}_{S_2};$$

Где m_2 – масса звена 2;

\vec{a}_{S_2} – ускорение центра масс звена 2.

Главный момент сил инерции звена 2 равен:

$$\vec{M}_{i2} = -I_{S_2} \cdot \vec{\varepsilon}_2;$$

где I_{S_2} – момент инерции звена 2 относительно центральной оси;

$\vec{\varepsilon}_2$ – угловое ускорение звена 2.

Силовой анализ выполняется **графоаналитическим методом** для плана механизма, для которого уже ранее был выполнен **кинематический анализ**.

Скопируйте план механизма в пятом положении ведущего звена, нанесите на звенья 2 и 4 центры масс (точки S_2 и S_4) в соответствии с исходными данными) (рисунок 88) используя инструмент «Точка по кривой».

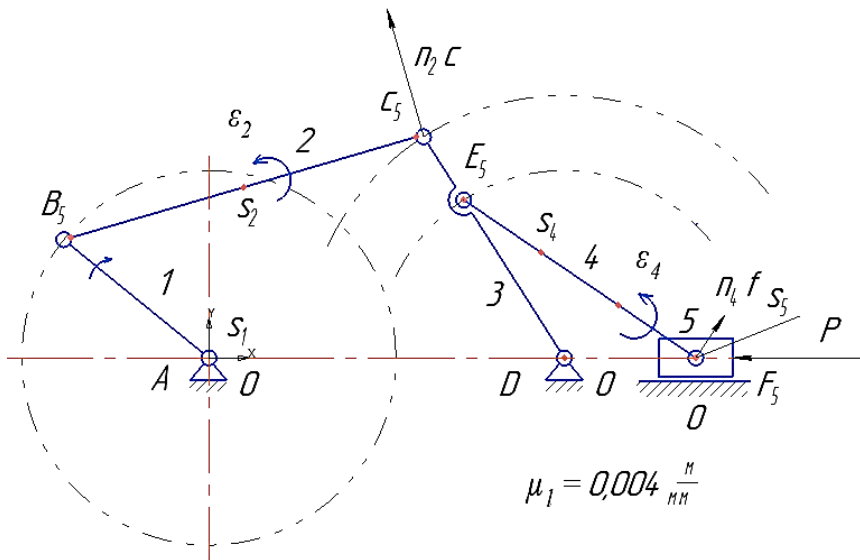


Рисунок 89

Для определения направления углового ускорения звена 2 **мысленно** перенесите с плана ускорений вектор тангенциальной составляющей \vec{a}_{CB}^t (вектор n_2c на плане ускорений) в точку C на плане механизма. Угловое ускорение ε_2 будет направлено против хода часовой стрелки (рисунок 89).

Аналогично **мысленно** перенесите в точку F вектор \vec{a}_{FE}^t , (вектор n_4f на плане ускорений). Угловое ускорение ε_4 также будет направлено против хода часовой стрелки (рисунок 89). Дугообразные стрелки нарисуйте в соответствии с рекомендациями (см. рис. 51, 52).

Центр масс кривошипа 1 находится на оси его вращения, поэтому сила инерции кривошипа равна нулю ($F_{i1} = 0$). Момент сил инерции также равен нулю ($M_{i1} = 0$), так как угловая скорость кривошипа величина постоянная.

Инерционные нагрузки шатуна BC (звена 2) равны:

$$F_{i2} = m_2 \cdot a_{s2} = 20 \cdot 17,5 = 350 \text{ Н};$$

$$M_{i2} = I_{S2} \cdot \varepsilon_2 = 1,0 \cdot 46,45 = 46,45 \text{ Нм.}$$

В соответствии с исходными данными (см. таблицу 1) масса коромысла 3 не задана (например, в данном механизме она незначительна). В этом случае инерционные нагрузки коромысла можно считать равными нулю ($F_{i3} = 0$; $M_{i3} = 0$).

Для шатуна EF (звена 4) инерционные нагрузки равны:

$$F_{i4} = m_4 \cdot a_{S4} = 15 \cdot 9,48 = 142,2 \text{ Н;}$$

$$M_{i4} = I_{S4} \cdot \varepsilon_4 = 1,5 \cdot 18,2 = 27,3 \text{ Нм.}$$

Ползун (звено 5) движется **поступательно**, поэтому имеет место **только сила инерции**, равная:

$$F_{i5} = m_5 \cdot a_F = 40 \cdot 8,97 = 358,8 \text{ Н.}$$

Силовой анализ механизма выполняют в последовательности, обратной последовательности исследования его кинематики. Простейшими кинематическими цепями, обладающими кинетостатической определённостью, являются структурные группы Ассура. **Силовой анализ производят по группам Ассура, начиная с последней, включающей в себя выходное звено.**

В данном случае, это группа Ассура второго класса второго вида, состоящая из шатуна 4 и ползуна 5. Для отображения указанной группы выберите масштабный коэффициент длины, например, $\mu_l = 0,004 \frac{\text{м}}{\text{мм}}$ и начертите её. Приложите к звеньям группы **внешние** нагрузки: силу тяжести G_4 , силу тяжести G_5 и сила полезного сопротивления P (рисунок 90).

Вектор силы инерции F_{i4} звена 4, приложите к центру масс и направьте **противоположно** вектору ускорений $p_{a_{S4}}$. (см. план ускорений на рисунке 88).

Вектор силы инерции F_{i5} ползуна приложите в точке F и направьте **противоположно** вектору ускорения этой точки p_{af} .

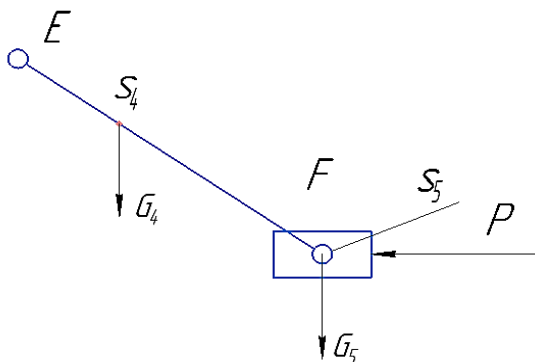


Рисунок 90

Приложите реакцию R_{05} стойки 0 на ползун 5 (без учёта трения), которая направлена **перпендикулярно** траектории движения ползуна 5 (вертикально вверх).

Момент сил инерции M_{i4} направьте **противоположно** угловому ускорению ε_4 . Отобразите стрелку указывающую направление M_{i4} (рисунок 91).

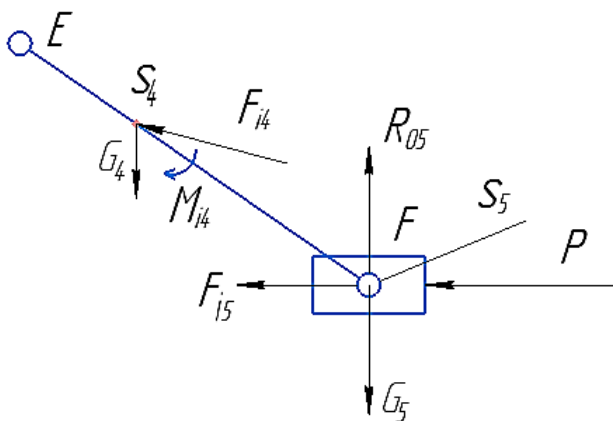


Рисунок 91

Реакции во внешних кинематических парах группы обычно представляют в виде **нормальной** и **тангенциальной** составляющих.

Реакцию R_{34} коромысла на шатун в шарнире E , представьте в виде двух составляющих: нормальной R_{34}^n , направленной **параллельно** звену EF и тангенциальной R_{34}^t , направленной **перпендикулярно** звену EF (рисунок 92).

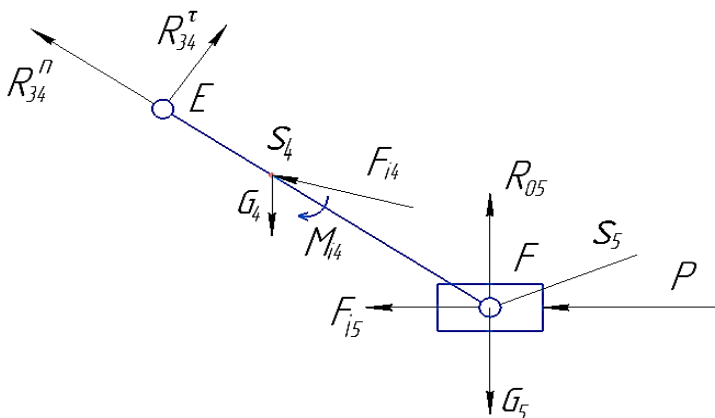


Рисунок 92

Отобразите плечо h_{G_4} силы G_4 . Для этого проведите вертикальную вспомогательную прямую через точку S_4 вдоль вектора G_4 используя привязку «Ближайшая точка». Затем проведите вспомогательную прямую перпендикулярно вектору G_5 .

Для отображения размерной линии выберите инструмент «Линейный размер» на панели инструментов (рисунок 93).

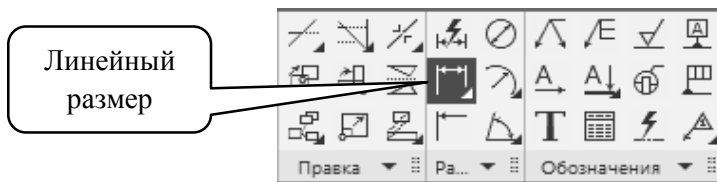


Рисунок 93

Проставьте размерную линию по вспомогательной линии перпендикулярной вектору G_5 , используя привязки «Пересечение». Щёлкните на размерной линии левой кнопкой мыши.

Двойным щелчком на размерной надписи вызовите окно диалога и, удалив надпись в текстовом поле «Значение», введите надпись h_{G4} . Подтвердите команду щелчком на кнопке **Завершить**.

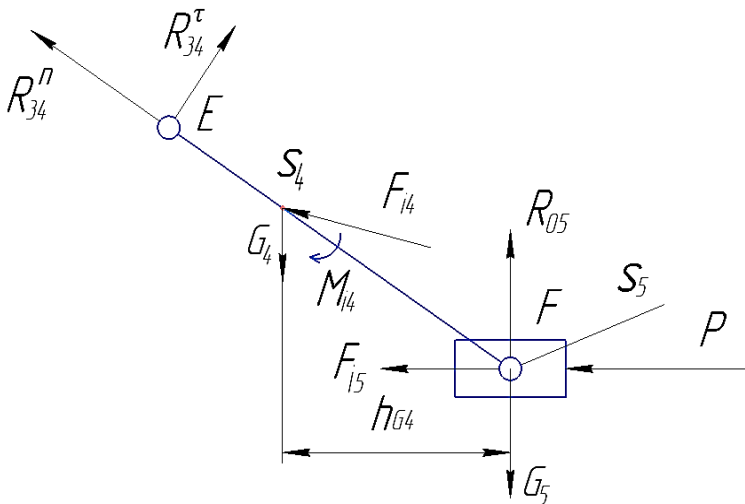
Проведите тонкую линию по вспомогательной линии перпендикулярной вектору G_5 используя инструмент «Отрезок». Удалите вспомогательные линии.

Аналогично постройте плечо h_{i4} (см. рис. 95).

Определите длины плечей сил h_{G4} и h_{i4} . Для этого измерьте их на схеме и умножьте результаты измерений на масштабный коэффициент $\mu_l = 0,004 \frac{\text{м}}{\text{мм}}$.

Получите: $h_{G4} = 0,0827 \text{ м}$; $h_{i4} = 0,034 \text{ м}$.

На схеме (см. рис. 94) три неизвестных вектора: \vec{R}_{34}^n , \vec{R}_{34}^t и \vec{R}_{05} .



Начните силовой анализ группы с определения **тангенциальной** составляющей \vec{R}_{34}^{τ} . Для этого запишите уравнение равновесия моментов сил, действующих на звено 4 относительно точки F и приравняйте его к нулю.

$$\sum M_F = -R_{34}^{\tau} \cdot l_{EF} + G_4 \cdot h_{G4} + F_{i4} \cdot h_{i4} - M_{i4} = 0.$$

Определите тангенциальную составляющую \vec{R}_{34}^{τ} , которая равна:

$$R_{34}^{\tau} = \frac{G_4 \cdot h_{G4} + F_{i4} \cdot h_{i4} - M_{i4}}{l_{EF}} = \frac{150 \cdot 0,0827 + 142,2 \cdot 0,034 - 27,3}{0,15} = -67,068 \text{ Н.}$$

Направление вектора \vec{R}_{34}^{τ} было выбрано неправильно, так как результат получился со знаком минус. Поэтому нужно **перенаправить** вектор \vec{R}_{34}^{τ} на противоположное направление (рисунок 95).

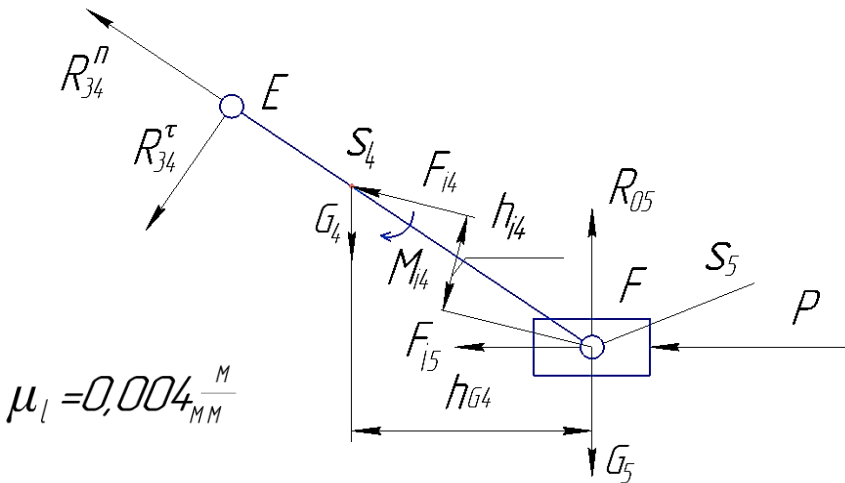


Рисунок 95

При определении сил тяжести звеньев можно принять ускорение свободного падения равным 10 м/с^2 . Вычислите значения сил тяжести умножив массы звеньев на 10 м/с^2 . Получите соответственно 150 Н и 400 Н.

На схеме группы Ассура (рисунок 95) осталось два известных по направлению, но неизвестных по модулю вектора: \vec{R}_{34}^n и \vec{R}_{05} . Модули этих векторов можно определить построением плана сил.

Составьте векторное уравнение равновесия сил, действующих на всю группу Ассура 4–5. **При этом, неизвестные по модулю векторы \vec{R}_{34}^n и \vec{R}_{05} , запишите соответственно в начале и в конце этого уравнения.** Кроме того, при составлении уравнения целесообразно силы записать в такой **последовательности**, как они приложены к звеньям. То есть, вначале записать силы, приложенные к звену 4, а затем силы, приложенные к звену 5.

Величины известных векторов запишите в строке под уравнением.

$$\vec{R}_{34}^n + \vec{R}_{34}^\tau + \vec{G}_4 + \vec{F}_{i4} + \vec{G}_5 + \vec{F}_{i5} + \vec{P} + \vec{R}_{05} = 0.$$

67,1 150 142,2 400 359 250

Примите масштабный коэффициент сил, например равный:

$$\mu_f = 10 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}$$

При построении плана сил учитывайте масштабный коэффициент. Например, длина вектора полезной силы P определится следующим образом:

$$p = \frac{P}{\mu_f} = \frac{250}{10} = 25 \text{ мм.}$$

Аналогично определите длины остальных известных векторов и запишите их значения в строке под уравнением.

Для определения реакции во внутренней кинематической паре F группы, запишите уравнение равновесия сил, действующих на одно из звеньев группы, например, на 4 звено:

$$\vec{R}_{34} + \vec{G}_4 + \vec{F}_{i4} + \vec{R}_{54} = 0.$$

Неизвестным в этом уравнении является только вектор \vec{R}_{54} , который в данном случае можно найти на уже ранее построенном плане сил. Началом вектора \vec{R}_{54} будет конец вектора \vec{F}_{i4} , а концом его будет начало вектора \vec{R}_{34} (рисунок 99).

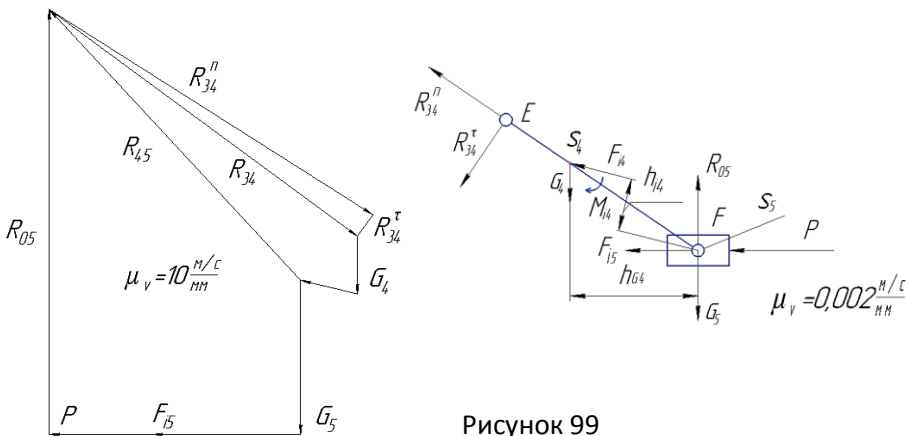


Рисунок 99

Создайте в окне КОМПАС-3D таблицу и заполните первую строку в соответствии с образцом (таблица 5). Измерьте векторы \vec{R}_{34} , \vec{R}_{45} и \vec{R}_{05} на плане сил, умножьте на масштабный коэффициент μ_f и запишите в таблицу в окне КОМПАС-3D.

Таблица 5 – Результаты силового анализа

R_{01} , Н	R_{12} , Н	R_{23} , Н	R_{03} , Н	R_{34} , Н	R_{54} , Н	R_{05} , Н	M_{yp} , Нм
				950,5	930,1	1103,2	

Не изменяя масштабный коэффициент длины $\mu_l = 0,004 \frac{\text{м}}{\text{мм}}$ начертите группу Ассур 2–3 (рисунок 100).

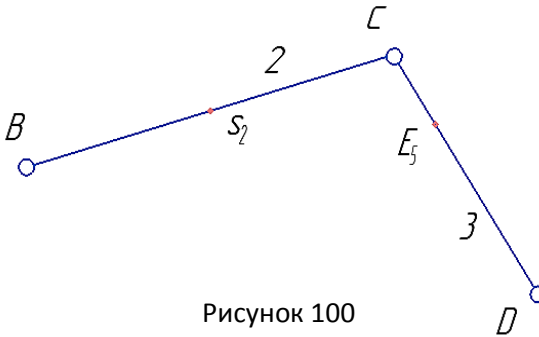


Рисунок 100

Приложите к звеньям группы 2-3 **внешние нагрузки**: реакцию R_{43} , которая направлена **противоположно** реакции R_{34} и силу тяжести G_2 (рисунок 101). Силой тяжести G_3 в данном конкретном случае можно пренебречь, так как масса звена 3 не задана (см. таблицу 1).

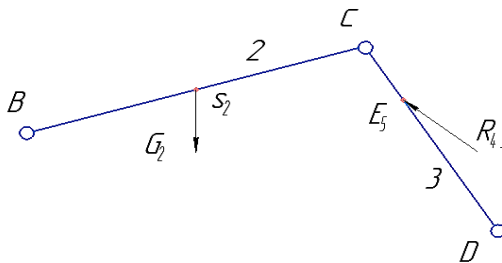


Рисунок 101

По этой же причине инерционные нагрузки приложите только к второму звену (рисунок 102). Сила инерции F_{i2} направлена **противоположно** вектору a_{s2} на плане ускорений, а момент сил инерции M_{i2} **противоположен** угловому ускорению ε_2 (см. рис. 87).

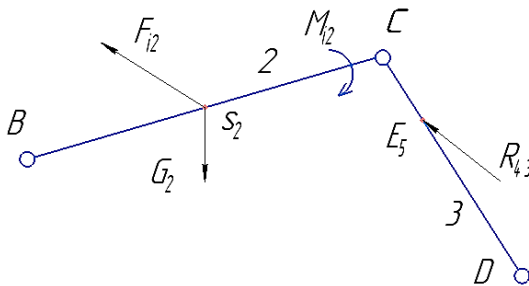


Рисунок 102

Покажите плечи сил, относительно общей точки C , а также реакции во внешних кинематических парах группы, представленные в виде нормальной и тангенциальной составляющих. **Направление указанных реакций выберите произвольно** (рисунок 103).

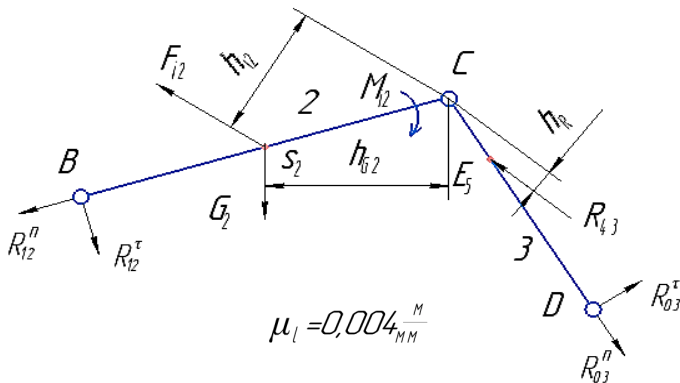


Рисунок 103

Определите длины плечей сил h_{G2} , h_{12} и h_R . Для этого измерьте их на схеме и умножьте результаты измерений на масштабный коэффициент $\mu_l = 0,004 \frac{M}{MM}$.

Получите: $h_{G2} = 0,096$ м; $h_{i2} = 0,0741$ м; $h_R = 0,0132$ м.

Перейдите к определению тангенциальных составляющих \vec{R}_{12}^τ и \vec{R}_{03}^τ (рисунок 103).

Для определения тангенциальной составляющей \vec{R}_{12}^τ запишите уравнение равновесия моментов сил относительно точки C для звена 2:

$$\sum M_C = R_{12}^\tau \cdot l_{BC} + G_2 \cdot h_{G2} - F_{i2} \cdot h_{i2} - M_{i2} = 0.$$

Тангенциальная составляющая \vec{R}_{12}^τ равна:

$$\begin{aligned} -R_{12}^\tau &= \frac{G_2 \cdot h_{G2} + F_{i2} \cdot h_{i2} - M_{i2}}{l_{BC}} = \\ &= \frac{200 \cdot 0,096 - 350 \cdot 0,0741 - 46,5}{0,2} = \\ &= -266,175 \text{ Н.} \end{aligned}$$

$$R_{12}^\tau = 266 \text{ Н.}$$

Запишите уравнение равновесия моментов сил относительно точки C для звена 3:

$$\sum M_C = R_{03}^\tau \cdot l_{CD} - R_{43} \cdot h_R = 0.$$

Тангенциальная составляющая \vec{R}_{03}^τ равна:

$$R_{03}^\tau = \frac{R_{43} \cdot h_R}{l_{CD}} = \frac{950,6 \cdot 0,0132}{0,14} = 89,3 \text{ Н.}$$

Примите масштабный коэффициент сил прежний $\mu_f = 10 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}$.

Составьте векторное уравнение равновесия сил, действующих на всю группу Ассур 2–3 и запишите во второй строке модули известных векторов. Длины векторов на плане сил получите делением модулей векторов на масштабный коэффициент и запишите под значениями модулей сил в третьей строке.

$$\vec{R}_{12}^n + \vec{R}_{12}^\tau + \vec{G}_2 + \vec{F}_{i2} + \vec{R}_{43} + \vec{R}_{03}^\tau + \vec{R}_{03}^n = 0.$$

266	200	350	950,5	93,3
26,6	20	35	95	9,3

Скопируйте это уравнение в окно программы КОМПАС-3D.

Из произвольно выбранной точки последовательно отложите **известные по величине и направлению** векторы аналогично как при построении плана сил для группы Ассура 4–5 (рисунок 104).

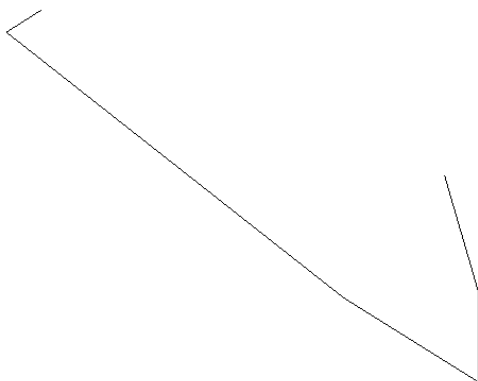


Рисунок 104

Через конец последнего вектора (\vec{R}_{03}^τ) проведите вспомогательную прямую **параллельно** звену 3, а через начало первого вектора (\vec{R}_{12}^τ) проведите вспомогательную прямую **параллельно** звену 2 (рисунок 105).

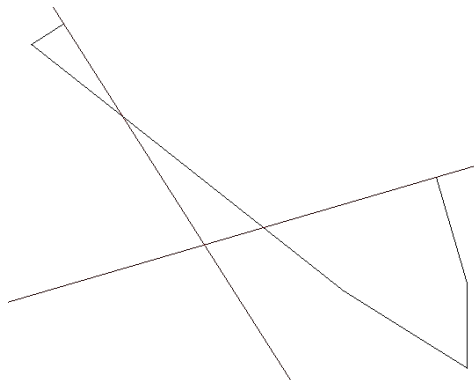


Рисунок 105

Соедините стрелкой точку пересечения вспомогательных линий с концом вектора \vec{R}_{03}^{τ} . Соедините стрелкой конец вектора \vec{R}_{03}^{τ} с началом вектора \vec{R}_{12}^{τ} . Удалите вспомогательные линии. Расставьте остальные стрелки и обозначьте векторы (рисунок 106).

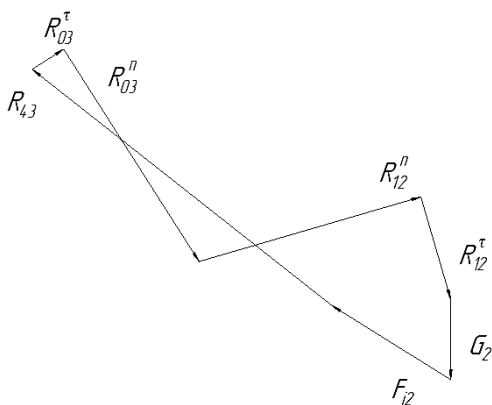


Рисунок 106

Соедините стрелкой начало вектора \vec{R}_{12}^n с концом вектора \vec{R}_{12}^τ . Соедините стрелкой начало вектора \vec{R}_{03}^τ с концом вектора \vec{R}_{03}^n . Обозначьте полученные векторы соответственно \vec{R}_{12} и \vec{R}_{03} (рисунок 107).

Найдите реакцию в шарнире C . Для этого запишите уравнение равновесия сил, действующих на коромысло EC :

$$\vec{R}_{23} + \vec{R}_{43} + \vec{R}_{03} = 0.$$

В этом уравнении **неизвестным** является вектор \vec{R}_{23} . Его начало, это конец вектора \vec{R}_{03} , а конец – это начало вектора \vec{R}_{43} . Отобразите вектор \vec{R}_{23} (рисунок 117).

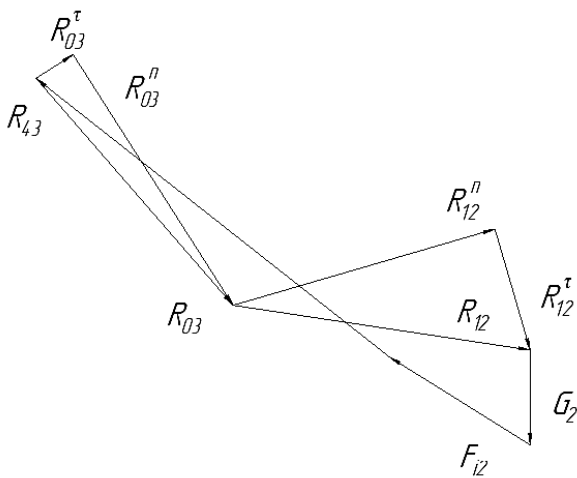


Рисунок 107

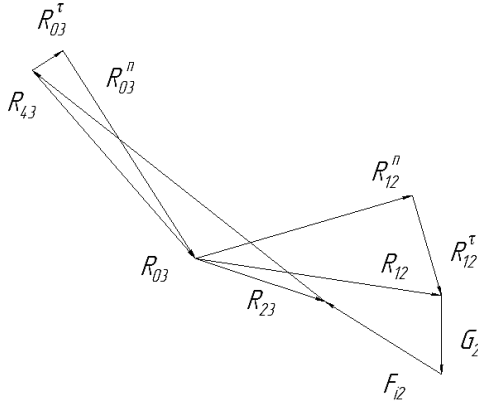


Рисунок 108

Измерьте длины векторов \vec{R}_{12} , \vec{R}_{23} и \vec{R}_{03} на плане сил, умножьте их на масштабный коэффициент μ_f и соответственно получите: 782,4 Н; 219,6 Н; 899,7Н.

Полученные результаты запишите в таблицу 5.

Таблица 5 – Результаты силового анализа

R_{01} , Н	R_{12} , Н	R_{23} , Н	R_{03} , Н	R_{34} , Н	R_{54} , Н	R_{05} , Н	Мур, Нм
	782,4	219,6	899,7	950,5	930,1	1103,2	

Начертите входное звено (кривошип AB) не изменяя масштабный коэффициент длины $\mu_l = 0,004 \frac{\text{м}}{\text{мм}}$.

Проведите через точку B вспомогательную прямую **параллельно** вектору \vec{R}_{12} . Приложите в точке B реакцию, направленную **противоположно** реакции \vec{R}_{12} (см. рис. 108).

Определите силу тяжести G_1 , как произведение массы m_1 на величину ускорения свободного падения 10 м/с^2 ($G_1 = 10 \cdot 10 = 100 \text{ Н}$). Приложите силу тяжести G_1 в точке A **вертикально вниз**. Приложите реакцию R_{01} в точке A и направьте её **произвольно** (рисунок 109).

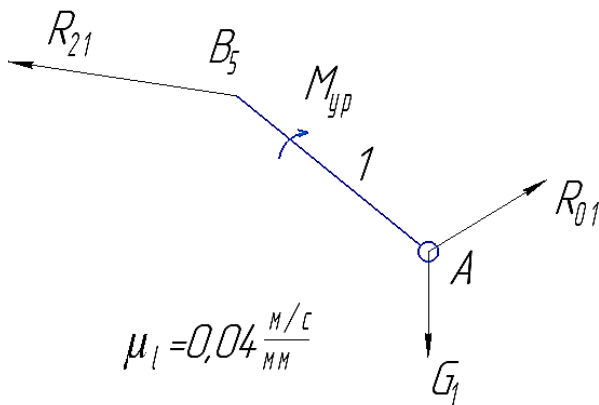


Рисунок 109

Векторное уравнение равновесия сил, действующих на кривошип, имеет вид:

$$\begin{array}{r} \vec{R}_{21} + \vec{G}_1 + \vec{R}_{01} = 0. \\ 782,4 \quad 100 \\ 78,2 \quad 10 \end{array}$$

Запишите во второй строке под уравнением модули известных векторов. Длины векторов на плане сил получите делением модулей векторов на масштабный коэффициент и запишите под значениями модулей сил в третьей строке.

Скопируйте это уравнение в окно программы КОМПАС-3D.

В данном уравнении имеется один **неизвестный** вектор \vec{R}_{01} .

Из **произвольной точки** отложите вектор \vec{R}_{21} длиной 78,2 мм (см. таблицу 5), а из его конца отложите вектор \vec{G}_1 длиной 10 мм. Замыкающим будет искомый вектор \vec{R}_{01} . Нанесите на план сил стрелки и обозначения (рисунок 110).

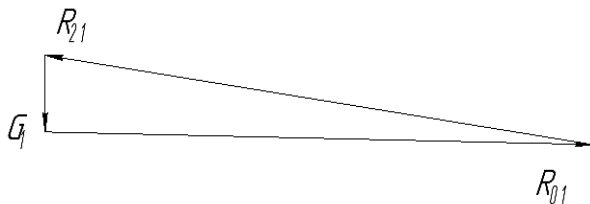


Рисунок 110

Измерьте вектор \vec{R}_{01} , умножьте на масштабный коэффициент μ_f .
Получите $78,15 \cdot 10 = 781,5$ Н.

Для равновесия кривошипа к нему должен быть приложен внешний уравновешивающий момент сил $M_{ур}$. Его модуль будет равен:

$$M_{ур} = R_{21} \cdot h_{21},$$

где h_{21} плечо силы R_{21} .

Для построения плеча нанесите на схему кривошипа две вспомогательные линии через точку A **параллельно** и **перпендикулярно** вектору \vec{R}_{21} (рисунок 111).

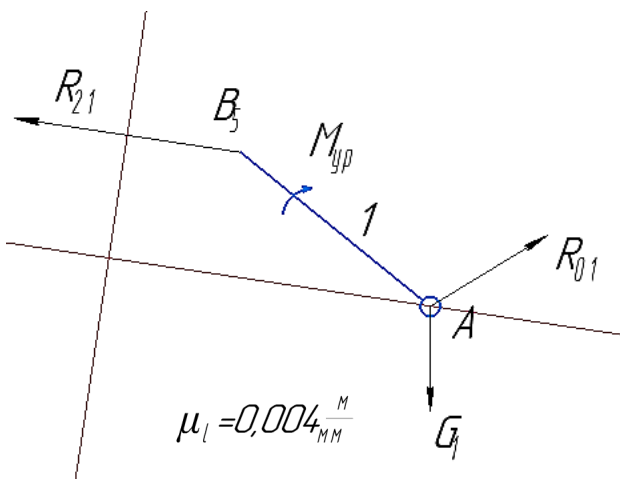


Рисунок 111

Проставьте размерную линию по вспомогательной линии **перпендикулярной** вектору \vec{R}_{21} , используя привязки «Пересечение». Надпишите размерную линию. Проведите выноску для размерной линии тонкой линией по параллельной вспомогательной прямой. Удалите вспомогательные прямые (рисунок 112).

Измерьте длину плеча и умножьте её величину на масштабный коэффициент длины $\mu_l = 0,004 \frac{\text{М}}{\text{мм}}$.

$$h_{21} = 14,4 \cdot 0,004 = 0,0576 \text{ м.}$$

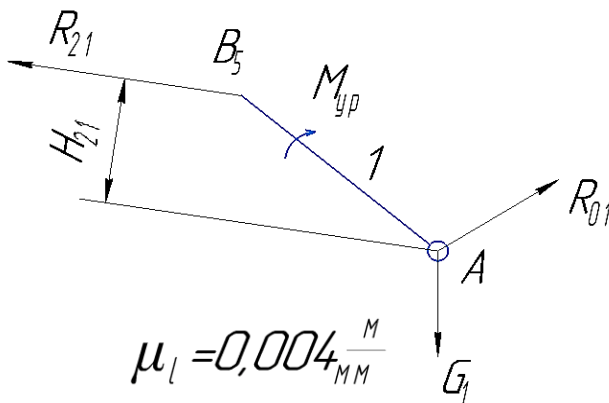


Рисунок 112

Вычислите модуль уравнивающего момента:

$$M_{yp} = R_{21} \cdot h_{21} = 782,4 \cdot 0,0576 = 45,07 \text{ Нм.}$$

Запишите полученные значения R_{01} и M_{yp} в таблицу 5.

Таблица 5 – Результаты силового анализа

R_{01} , Н	R_{12} , Н	R_{23} , Н	R_{03} , Н	R_{34} , Н	R_{54} , Н	R_{05} , Н	M_{yp} , Нм
782,5	782,4	219,6	899,7	950,5	930,1	1103,2	45,07

Кинестатический анализ механизма в пятом положении ведущего звена выполнен.

6 ПЕЧАТЬ ГРАФИЧЕСКИХ ФАЙЛОВ ИЗ КОМПАС-3D

Созданные в КОМПАС-3D графические материалы необходимо вывести на печать в **масштабе 1:1**. Для этого:

1. Расположите объекты для печати на фрагменте компактно, так чтобы они в масштабе 1:1 поместились на листе, который поддерживается вашим принтером, например А4.

2. Выделите все объекты, которые будут выведены на печать.

3. Выполните команду **Файл, Печать**.

4. В окне диалога **Печать** документа (рисунок 113) в списке **Подгонка масштаба листов** выберите **Обрезать по размеру страницы**. В поле **Масштаб листов** впишите 1.

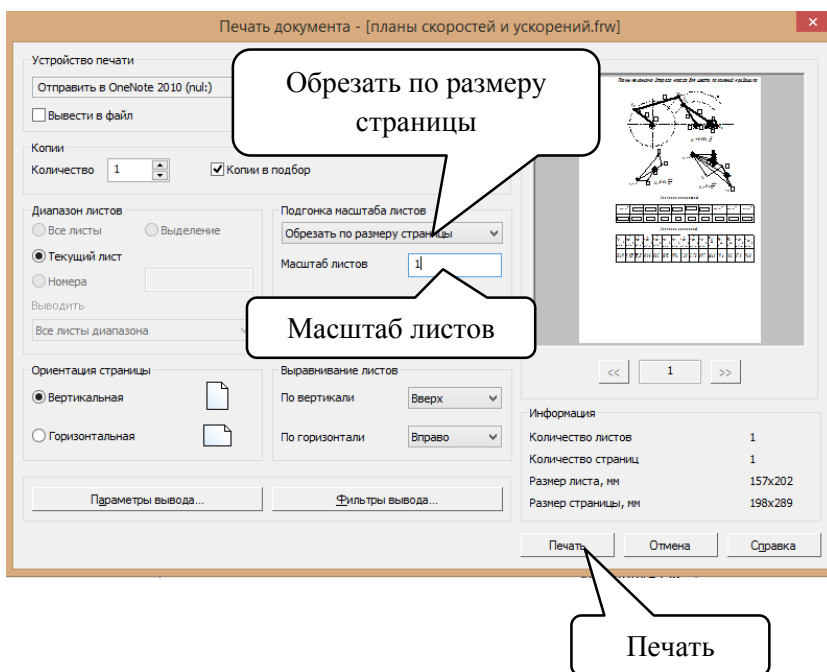


Рисунок 113

5. Щелчком на кнопке **Параметры вывода** откройте окно диалого **Настройка параметров вывода** (рисунок 114).

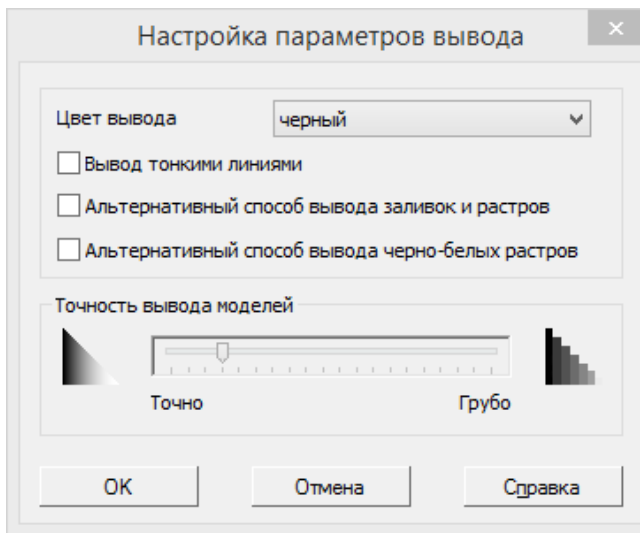


Рисунок 114

6 В окне диалого **Настройка параметров вывода** установите: **Цвет вывода** черный, **Точность вывода моделей** Точно. Щёлкните на кнопке **ОК**.

7 В окне диалого **Печать документа** (см. рис. 113) щёлкните на кнопке **Печать**.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Одиночко В.Ф. Прикладная механика литейного производства : учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-36 02 01 «Машины и технология литейного производства» / В. Ф. Одиночко. — Минск: БНТУ, 2019.-71 с.
2. <https://www.youtube.com/watch?v=z1yJycIU26o>. Построение планов сил.
3. https://www.youtube.com/watch?v=0O007_wrDWE Построение планов ускорений.
4. https://www.youtube.com/watch?v=FGf7az_Fobs Построение планов скоростей.
5. <http://www.twirpx.com/file/1512443/>. АСКОН. КОМПАС-3D V15. Руководство пользователя