



### Задания, ответы и критерии оценивания

Выпускник университета решил организовать собственное малое инновационное предприятие. Взяв кредит в банке, он купил роботизированную производственную систему для изготовления станков аддитивного производства (3D принтеров) для изготовления из пластика моделей и прототипов машиностроительных изделий (рис. 1). Такой 3D принтер содержит несущую систему, приводы, узлы координатных перемещений, печатающую головку, линейные измерительные преобразователи (энкодеры). В цехе предприятия было установлено следующее оборудование: токарный и фрезерный обрабатывающие центры с компьютерным управлением, сварочный робот и робот-манипулятор. В процессе изготовления различных деталей молодой инженер столкнулся с рядом производственных задач, представленных ниже.



Рис. 1

#### Задача № 1 (5 баллов)

На вертикальном обрабатывающем центре фрезеруется деталь привода (рис. 2). Фреза диаметром 15 мм, при обработке, может двигаться по различным траекториям, две из которых показаны на рис. 3. Траектории на рис. 3а представляют собой три эквидистантных прямоугольника. Траектория на рис. 3б представляет собой ломаную линию. Требуется определить, какая из траекторий (1 или 2) обеспечит наименьшее время обработки, если известно, что фреза движется с одинаковой постоянной скоростью, глубина резания одинакова. Параметры траекторий показаны на рис. 3.

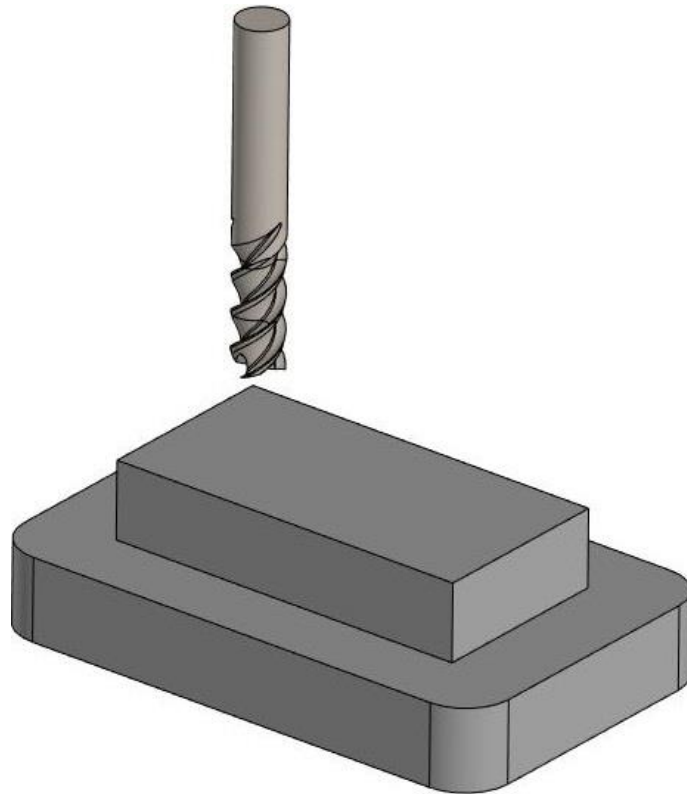


Рис. 2

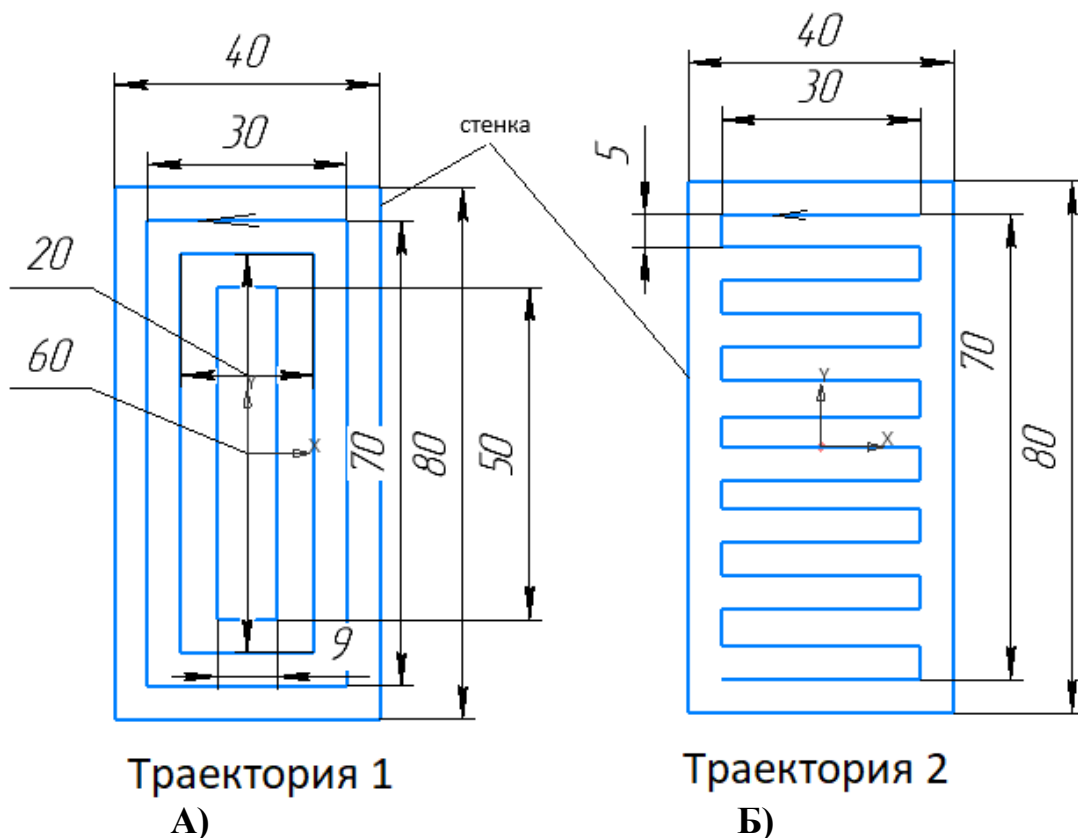


Рис. 3

**Решение.**

Длина траектории на рис. 3а равна  $L_1 = (2 \cdot 9 + 2 \cdot 50) + (2 \cdot 20 + 2 \cdot 60) + (2 \cdot 30 + 2 \cdot 70) = 478$  мм. Длина траектории на рис. 3б равна  $L_2 = 15 \cdot 30 + 14 \cdot 5 = 540$  мм. Траектория 1 с наименьшей длиной обеспечит меньшее время обработки.

**Ответ: 1.**

### Задача № 2 (10 баллов)

На фрезерном станке фрезеруется деталь (1) привода 3D принтера, которая закрепляется в зажимном приспособлении с пневмоприводом. Пневмопривод состоит из пневмокамеры двустороннего действия с резиновой диафрагмой (2), рычага (3), рычага (4) и тяги (5). Требуется определить, какая сила  $W$  будет приложена к детали, если диаметр диафрагмы пневмокамеры равен  $D=160$  мм, диаметр опорной шайбы  $d=115$  мм, КПД всего привода  $\eta=0,9$ , остальные параметры приведены на рис. 4. Давление воздуха  $p=0,4$  МПа.

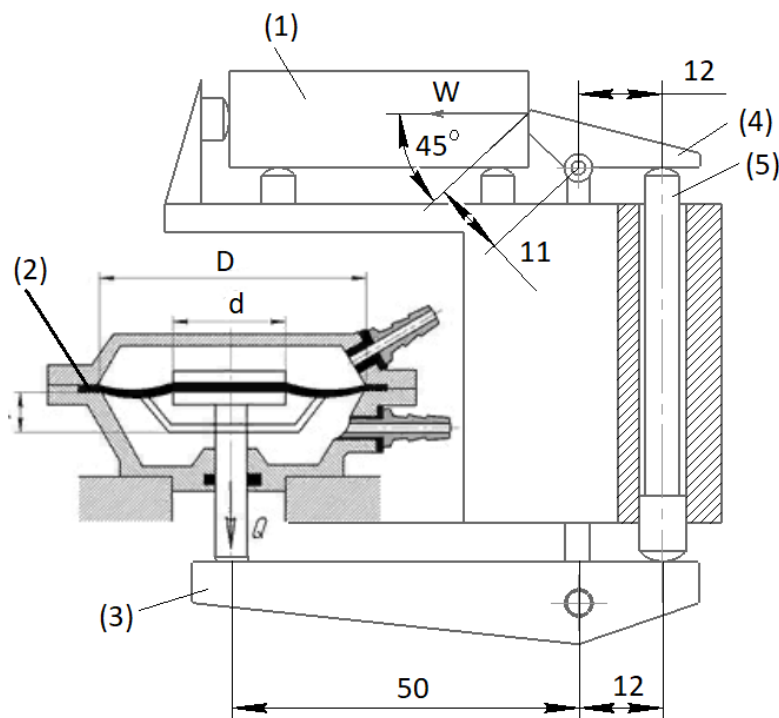


Рис. 4

### Решение.

Эффективное усилие на штоке пневмокамеры определяется диаметром опорной шайбы и рабочим давлением воздуха:  $Q=p \cdot \pi \cdot d^2/4=400000 \cdot 3,14 \cdot 0,115^2/4 \approx 4153$  Н.

Усилие зажима  $W$  определяется усилием  $Q$  и передаточным отношением исполнительного механизма:

$$W=Q \cdot 50/12 \cdot 12/11 \cdot \cos 45^\circ \cdot \eta=4153 \cdot 4,17 \cdot 1,09 \cdot 0,71 \cdot 0,9 \approx 12062 \text{ Н.}$$

**Ответ: 12062 Н.**

### Задача № 3 (20 баллов)

На вертикально-фрезерном станке концевой фрезой (1) диаметром 20 мм фрезеруется композитная деталь (2) для крышки привода, представляющая собой в плане прямоугольник с правильной семиугольной выемкой со скругленными углами, радиус скругления 10 мм (рис 5). Фреза последовательно проходит по траекториям (1), (2), (3), (4) без скруглений (рис. 6). Траектория (1) представляет из себя правильный семиугольник с диаметром описанной окружности  $d_1=80$  мм. Траектория (2) – правильный семиугольник с диаметром описанной окружности  $d_2=60$  мм. Траектория (3) – правильный семиугольник с диаметром описанной окружности  $d_3=40$  мм. Траектория (4) – правильный семиугольник с диаметром

описанной окружности  $d_4=20$  мм. Определить, сколько времени (сек.) займет у фрезы проход по всем траекториям, если известно, что фреза движется с постоянной скоростью  $V=0,01$  м/с, время перехода между траекториями не учитывать.

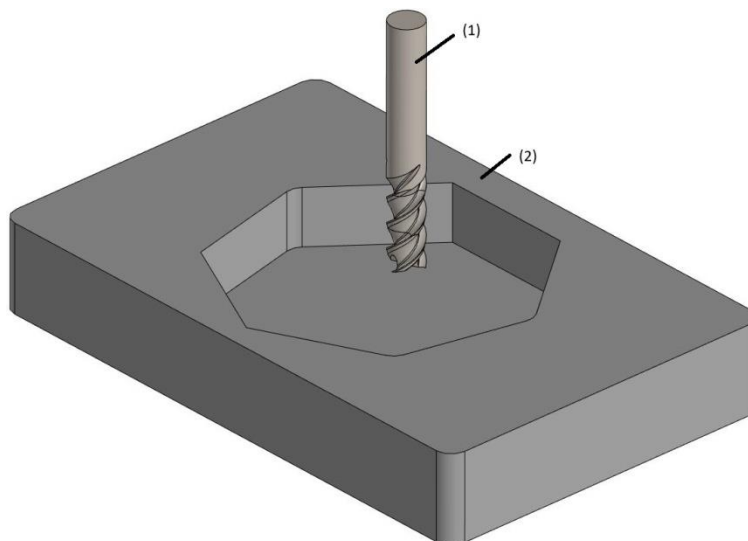


Рис. 5

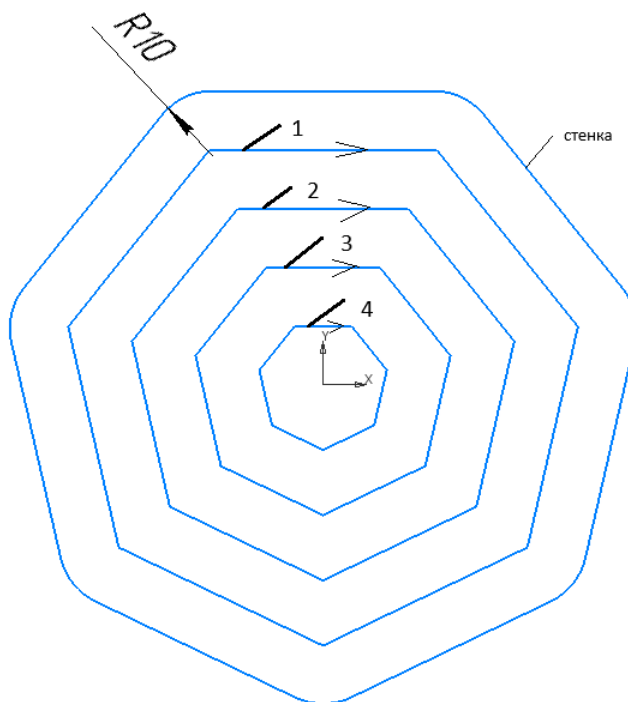


Рис. 6

**Решение.**

Длина траектории (1) равна периметру семиугольника (1):  $L_1=14d_1/2 \sin(\pi/7)=14 \cdot 40 \cdot \sin(3,14/7) \approx 242,5$  мм; длина траектории (2) равна  $L_2=14d_2/2 \sin(\pi/7)=14 \cdot 30 \cdot \sin(3,14/7) \approx 181,9$  мм; длина траектории (3) равна  $L_3=14d_3/2 \sin(\pi/7)=14 \cdot 20 \cdot \sin(3,14/7) \approx 121,2$  мм; длина траектории (4) равна  $L_4=14d_4/2 \sin(\pi/7)=14 \cdot 10 \cdot \sin(3,14/7) \approx 60,6$  мм. Суммарная длина всех траекторий равна  $L=L_1+L_2+L_3+L_4=242,5+181,9+121,2+60,6=606,2$  мм.

Искомое время обработки составит  $t=L/V=0,6062/0,01=60,62$  с.

**Ответ: 60,62 с.**

#### Задача № 4 (30 баллов)

Для перемещения и установки деталей на станок применяется робот-манипулятор. Рука такого робота представляет собой двухзвенный механизм. Координаты положения точки **A** робота, заданные в декартовой системе координат показаны на рис. 6. Робот работает только в плоскости XY. Требуется определить обобщенные координаты звеньев руки робота  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , требуемые для обеспечения такого положения точки **A**.

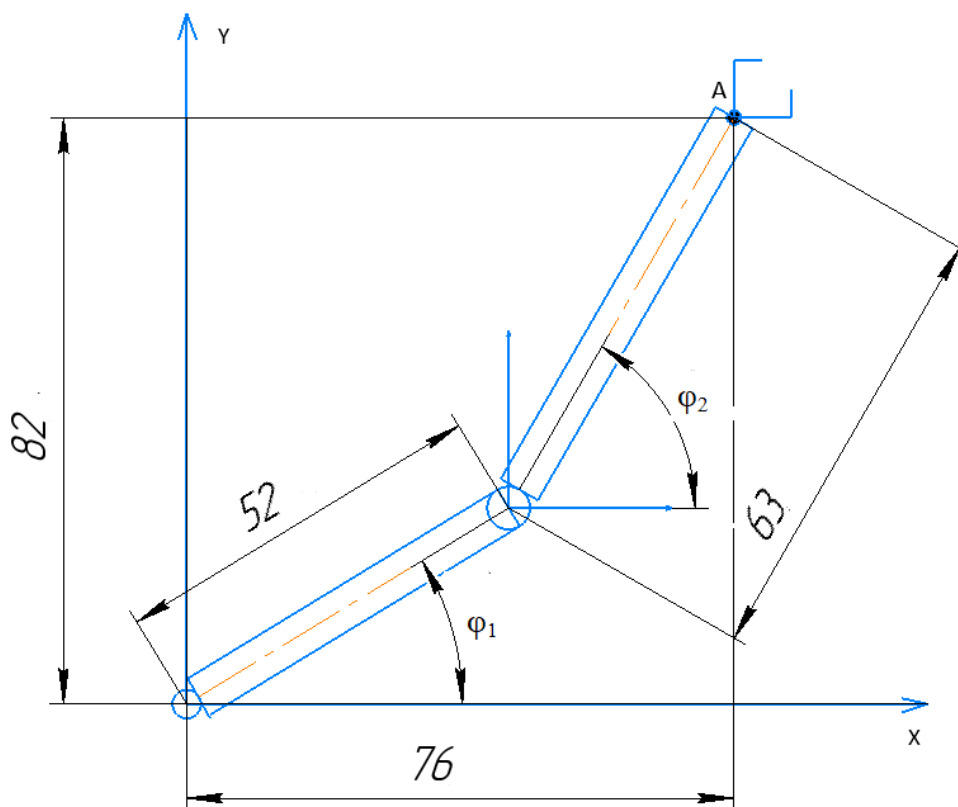
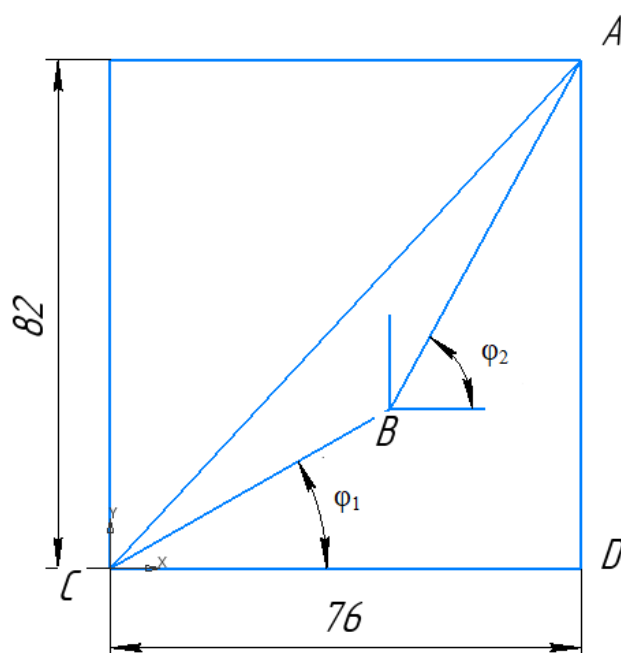


Рис. 7

Оценка за верный ответ 30 баллов.

Решение.



Углы  $\phi_1$  и  $\phi_2$  можно определить из расчетной схемы (рис. выше). Длина стороны AC равна  $AC = \sqrt{76^2 + 82^2} \approx 111,8$  см. Угол  $CBA = \arccos((52^2 + 63^2 - 111,8^2) / (2 \cdot 52 \cdot 63)) = \arccos(-0,8893) = 152,78^\circ$ . Угол  $ACB = \arccos((AC^2 + BC^2 - AB^2) / (2 \cdot AC \cdot BC)) = 14,98^\circ$ . Угол  $ACD = \arctg(82/76) = 47,173^\circ$ . Тогда угол  $\phi_1 = 47,173^\circ - 14,98^\circ = 32,19^\circ$ . Угол  $CAB = 180^\circ - (ACB + CBA) = 180^\circ - (14,98^\circ + 152,78^\circ) = 12,24^\circ$ . Угол  $CAD = 90^\circ - ACD = 90^\circ - 47,173^\circ = 42,827^\circ$ . Искомый угол  $\phi_2 = 90^\circ - (CAD - CAB) = 90^\circ - 30,587^\circ = 59,413^\circ$ .

**Ответ:  $32,19^\circ$  и  $59,41^\circ$ .**

### Задача № 5 (35 баллов)

Для участка сборки инженер получил чертеж одной из *деталей* 3D-принтера, которая без размеров изображена четырьмя проекциями, приведенными на рис. 8. Четыре проекции – это изображение четырех видов детали: спереди, сверху, слева и снизу. Нарисуйте **разрез** этой детали плоскостью А-А, параллельной виду спереди и проходящей ровно перпендикулярно детали. Для пояснения приведенных выше понятий на рис. 9 («Пример для пояснения») даны все виды и разрезы применительно к другой детали. На **разрезе** рисуются все кромки детали, которые попали в секущую плоскость и те, которые видны за ней.

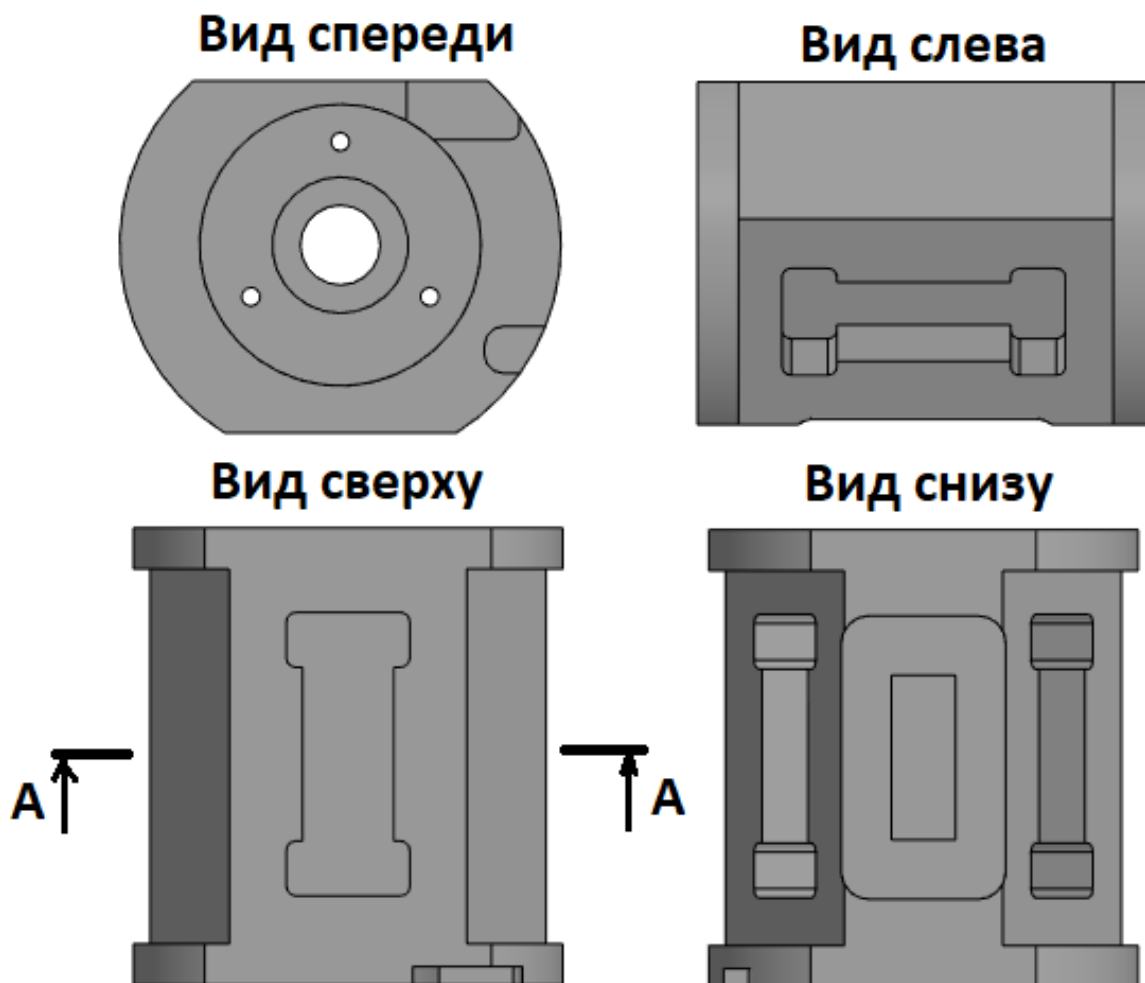


Рис. 8

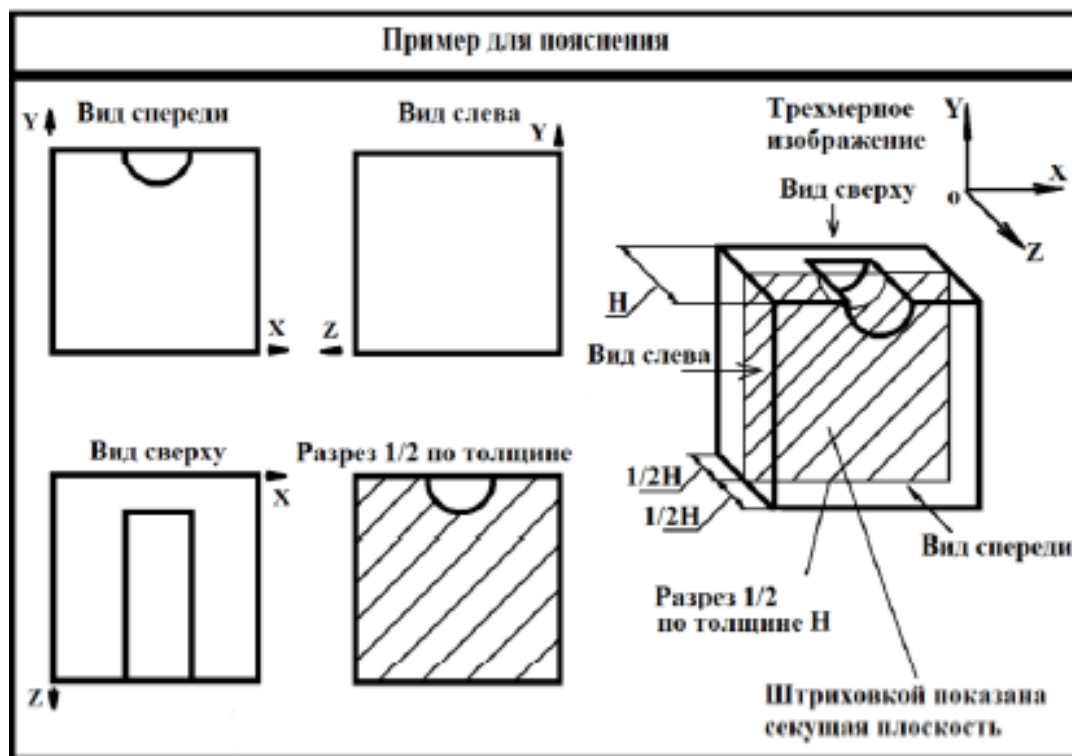
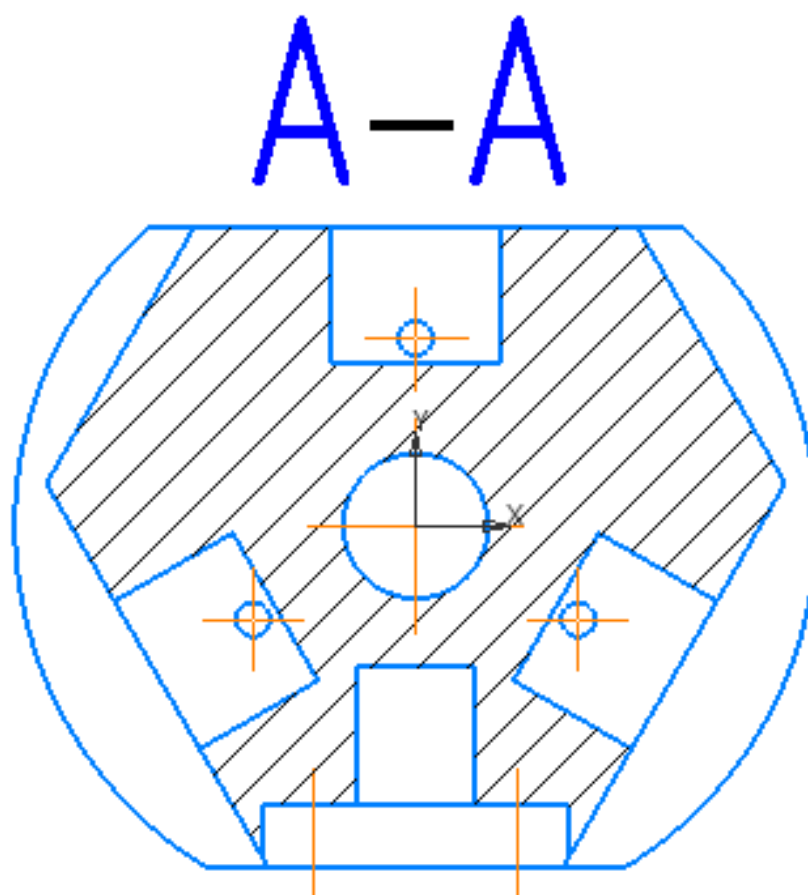


Рис. 9

Ответ:





### Задания, ответы и критерии оценивания

Выпускник университета решил организовать собственное малое инновационное предприятие. Взяв кредит в банке, он купил роботизированную производственную систему для изготовления станков аддитивного производства (3D принтеров) для изготовления из пластика моделей и прототипов машиностроительных изделий (рис. 1). Такой 3D принтер содержит несущую систему, приводы, узлы координатных перемещений, печатающую головку, линейные измерительные преобразователи (энкодеры). В цехе предприятия было установлено следующее оборудование: токарный и фрезерный обрабатывающие центры с компьютерным управлением, сварочный робот и робот-манипулятор. В процессе изготовления различных деталей молодой инженер столкнулся с рядом производственных задач, представленных ниже.



Рис. 1

#### Задача № 1 (5 баллов)

На фрезерном станке обрабатывается деталь (1) 3D принтера, заготовка которой закрепляется в зажимном приспособлении с пневмоприводом (рис. 2). Пневмопривод состоит из пневмокамеры двустороннего действия с резиновой диафрагмой (2), рычага (3), рычага (4) и тяги (5). Требуется определить, какая сила  $W$  будет приложена к детали, если диаметр диафрагмы пневмокамеры равен  $D=160$  мм, диаметр опорной шайбы  $d=150$  мм, КПД всего привода  $\eta=0,9$ , остальные параметры приведены на рис. 2.



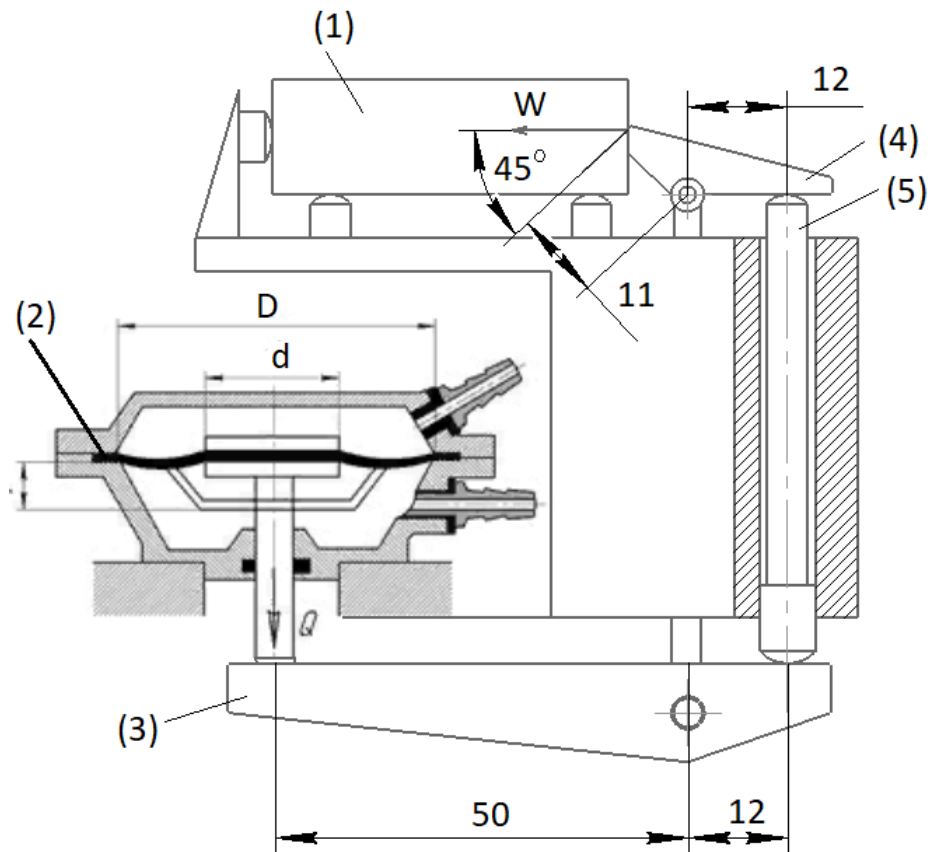


Рис. 2

**Решение.**

Эффективное усилие на штоке пневмокамеры определяется диаметром опорной шайбы и рабочим давлением воздуха:  
 $Q = p \cdot \pi \cdot d^2 / 4 = 400000 \cdot 3,14 \cdot 0,15^2 / 4 \approx 7065 \text{ Н.}$

Усилие зажима  $W$  определяется усилием  $Q$  и передаточным отношением исполнительного механизма:

$$W = Q \cdot 50 / 12 \cdot 12 / 11 \cdot \cos 45^\circ \cdot \eta = 7065 \cdot 4,17 \cdot 1,09 \cdot 0,71 \cdot 0,9 \approx 20519,9 \text{ Н.}$$

**Ответ: 20519,9 Н.**

**Задача № 2 (10 баллов)**

Для обработки на токарном станке тонкостенной цилиндрической детали используется жесткая цилиндрическая оправка (3). Заготовка (1) опоры насаживается на эту оправку с зазором и вращается вместе с ней в патроне токарного станка. Заготовка прижимается к торцу оправки с помощью прижимной гайки (2) (рис. 3). На заготовку диаметром  $D=52 \text{ мм}$  во время обработки от резца (4) действует тангенциальная сила  $P_z=500 \text{ Н}$ . Необходимо определить минимально достаточную силу прижима  $F$  гайки (без учета коэффициента запаса) при следующих исходных данных: наружный радиус левого опорного торца оправки и гайки  $R=25 \text{ мм}$ , внутренний радиус заготовки  $r=15 \text{ мм}$ , коэффициент трения между заготовкой и торцом оправки  $f_1=0,5$ , коэффициент трения между торцом заготовки и гайкой  $f_2=0,3$ . Трением на цилиндрических поверхностях пренебречь.

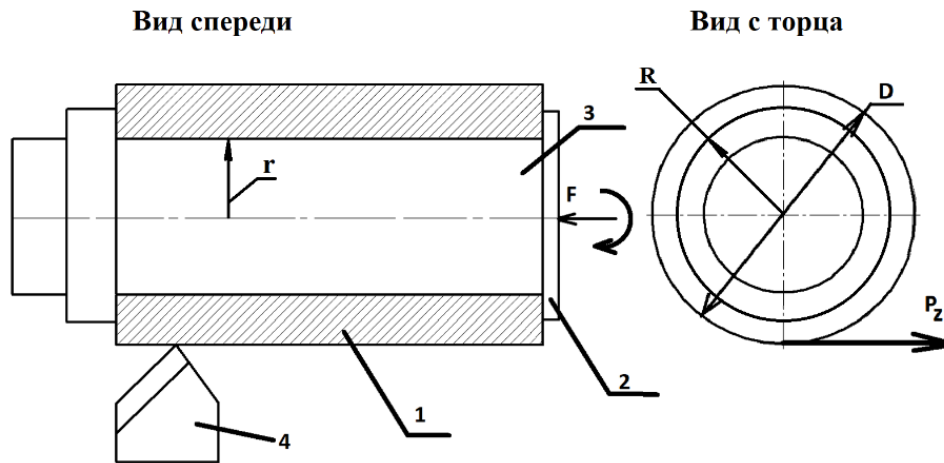


Рис. 3

**Решение.**

Для определения силы прижима  $F$  достаточно воспользоваться уравнением моментов – момент силы  $P_z$  должен быть уравновешен моментами сил трения заготовки о торец оправки и гайку:  $M_1=M_2$ . Поскольку в условии задачи ничего не сказано про характер контакта и распределения сил от гайки и торца оправки на заготовку, то с учетом, что контакт происходит по узкой полосе  $R-r=25-15=10$  мм, то обоснованно будет предположение, что итоговую силу трения можно приложить на окружности радиусом  $r+(R-r)/2=(r+R)/2=20$  мм.

Тогда:  $P_z \cdot D/2 = F \cdot f_1 \cdot (R+r)/2 + F \cdot f_2 \cdot (R+r)/2$ , отсюда находим  $F$ :

$$F = \frac{0,5 P_z D}{(f_1 + f_2) \left[ \frac{R+r}{2} \right]} = \frac{0,5 \cdot 500 \cdot 0,052}{(0,5 + 0,3) \left[ \frac{0,025 + 0,015}{2} \right]} = 812,5 \text{ Н.}$$

**Ответ: 812,5 Н.**

**Задача № 3 (20 баллов)**

На фрезерном станке концевой фрезой обрабатывается деталь 3D-принтера, имеющая углубление в виде правильного восьмиугольника (рис. 4). Траектория фрезы представляет собой пять правильных восьмиугольников без скруглений (рис. 5). Диаметр описанной окружности траектории (1) равен  $d_1=50$  мм, траектории (2) –  $d_2=40$  мм, траектории (3) –  $d_3=30$  мм, траектории (4) –  $d_4=20$  мм, траектории (5) –  $d_5=10$  мм соответственно. Определить **время** (сек.) прохождения фрезы по всем пяти траекториям, если известно, что линейная скорость перемещения фрезы составляет  $V=0,01$  м/с. Временем на переход между траекториями пренебречь.

**Решение.**

Длина траектории (1) равна периметру восьмиугольника (1):  $L_1=16d_1/2 \sin(\pi/8)=16 \cdot 40 \cdot \sin(3,14/8)=245,12$  мм; длина траектории (2) равна  $L_2=16d_2/2$

$\sin(\pi/8)=16 \cdot 30 \cdot \sin(3,14/8)=183,84$  мм; длина траектории (3) равна  $L_3=16d_3/2 \sin(\pi/8)=16 \cdot 20 \cdot \sin(3,14/8)=122,56$  мм; длина траектории (4) равна  $L_4=16d_4/2 \sin(\pi/8)=16 \cdot 10 \cdot \sin(3,14/8)=61,28$  мм;  $L_5=16d_5/2 \sin(\pi/8)=16 \cdot 5 \cdot 0,383=30,64$ .  
 Суммарная длина всех траекторий равна  $L=L_1+L_2+L_3+L_4+L_5=245,12+183,84+122,56+61,28+30,64=643,44$  мм.  
 Искомое время обработки составит  $t=L/V=0,64344/0,01=64,34$  с.  
**Ответ: 64,34 с.**

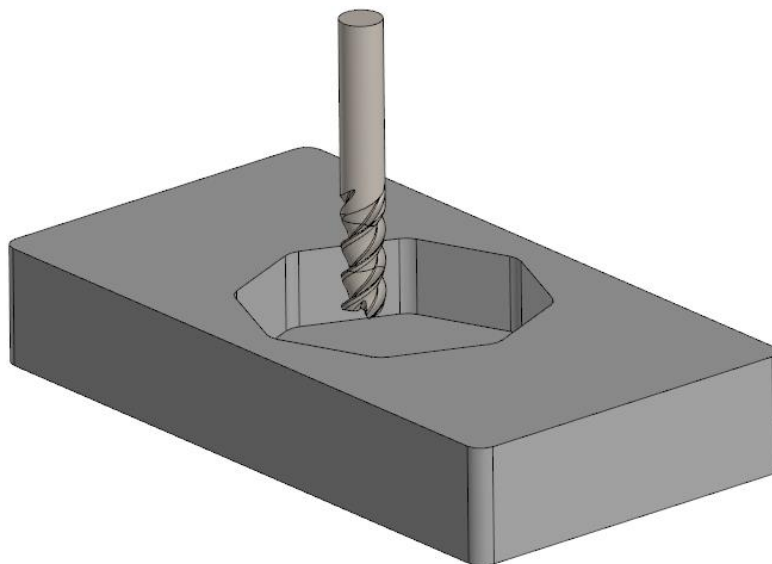


Рис. 4

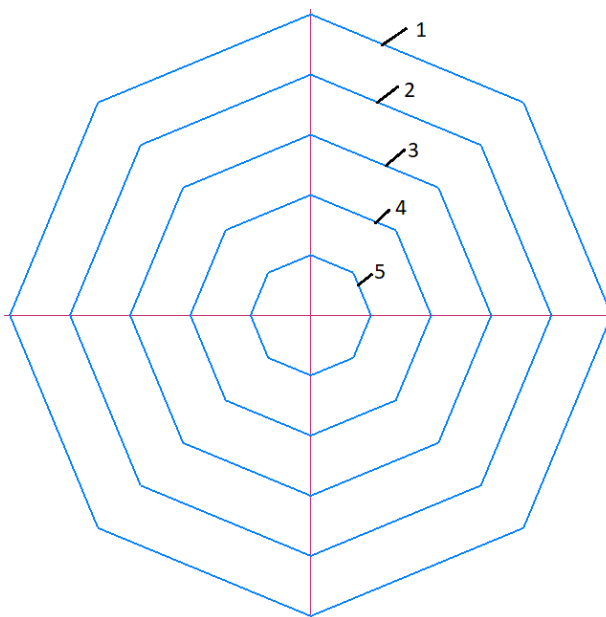


Рис. 5

**Задача № 4 (30 баллов)**

Рука сварочного робота представляет собой двухзвенный механизм, работающий в плоскости XY. Точка робота A находится в позиции с координатами (18; 59). Определить обобщенные координаты звеньев робота  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ , необходимые для обеспечения данного положения.

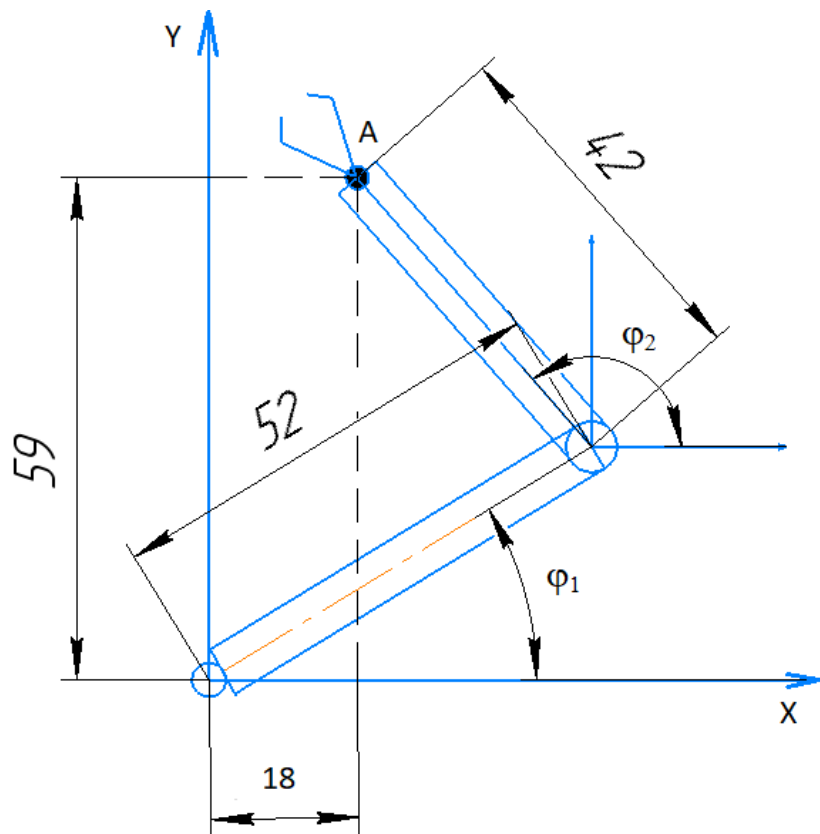


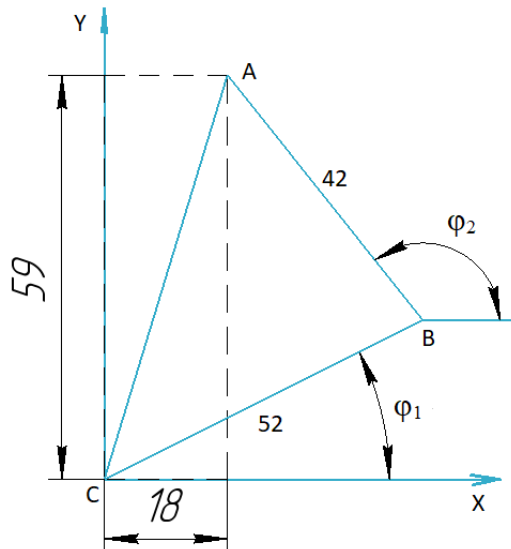
Рис. 6

**Решение.**

Решение можно найти из расчетной схемы (см. рис. ниже). Рассмотрим треугольник ABC.  $AC = \sqrt{18^2 + 59^2} \approx 61,68$ .  $\cos(\angle ACB) = (AC^2 + BC^2 - AB^2) / (2 \cdot BC \cdot AC) = (61,68^2 + 52^2 - 42^2) / (2 \cdot 61,68 \cdot 52) = 0,7397$ ; угол  $\angle ACB = \arccos(0,7397) = 42,29^\circ$ .  $\text{tg}(\angle ACX) = 59/18$ ; Угол  $\angle ACX = \arctg(59/18) \approx 73^\circ$ ; искомый угол  $\varphi_1 = \angle ACX - \angle ACB = 73^\circ - 42,29^\circ = 30,71^\circ$ .

$\cos(\angle ABC) = (AB^2 + BC^2 - AC^2) / (2 \cdot AB \cdot BC) = (42^2 + 52^2 - 61,68^2) / (2 \cdot 42 \cdot 52) = 0,15178$ ; Угол  $\angle ABC = \arccos(0,15178) = 81,27^\circ$ . Искомый угол  $\varphi_2 = 180^\circ - (\angle ABC - \varphi_1) = 180 - (81,27^\circ - 30,71^\circ) = 129,44^\circ$ .

**Ответ:**  $\varphi_1 = 30,71^\circ$ ;  $\varphi_2 = 129,44^\circ$ .



### Задача № 5 (35 баллов)

Для участка сборки инженер получил чертеж *детали* 3D-принтера, которая без размеров изображена четырьмя проекциями, приведенными на рис. 7. Четыре проекции – это изображение четырех видов конструкции: спереди, сверху, слева и снизу. Нарисуйте **сечение** этой детали плоскостью А-А, параллельной виду спереди и проходящей строго перпендикулярно детали. Для пояснения приведенных выше понятий на рис. 8 («Пример для пояснения») даны все виды и разрезы применительно к другой детали. На **сечении** рисуются только те кромки детали, которые лежат в секущей плоскости.

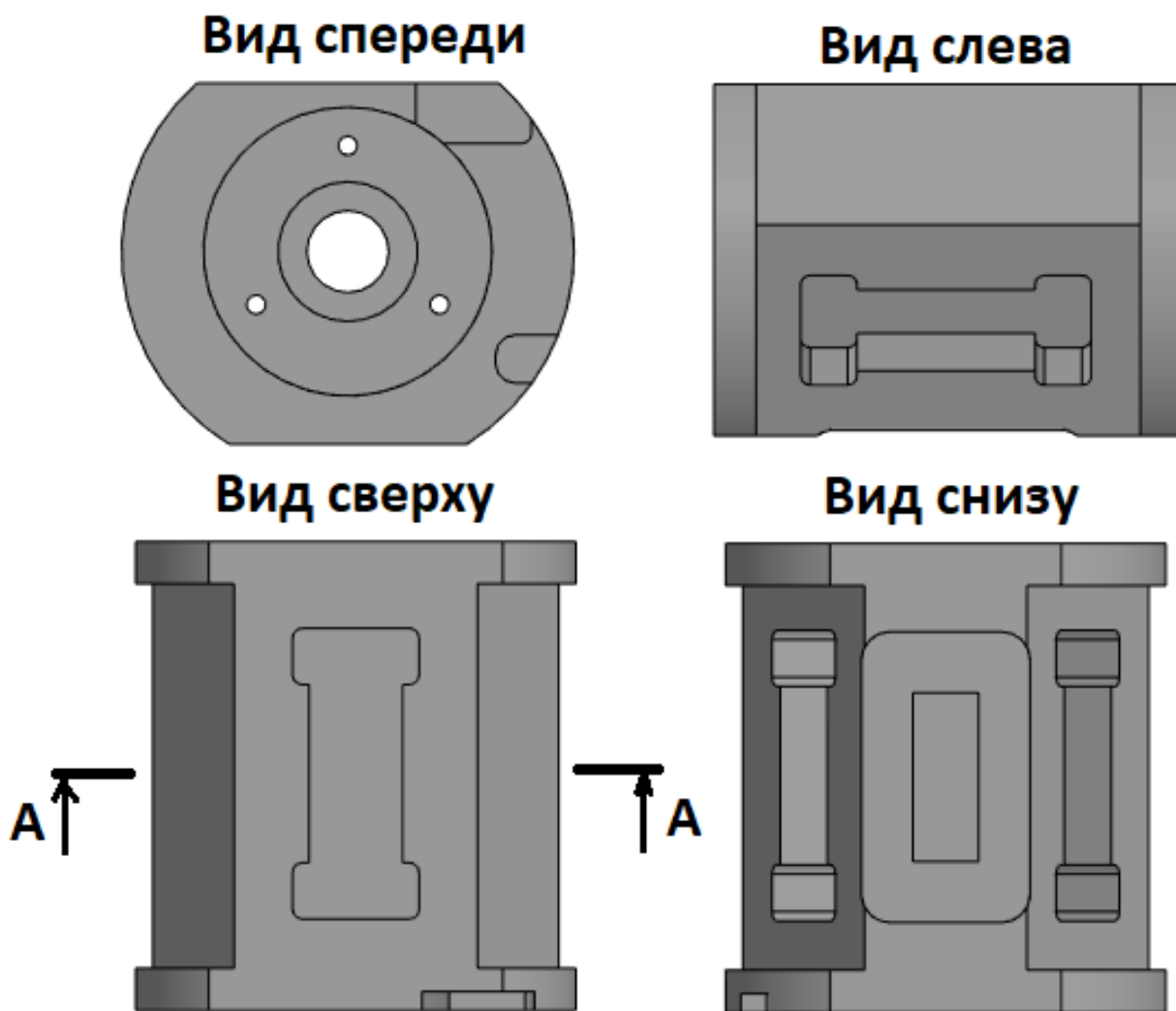


Рис. 7

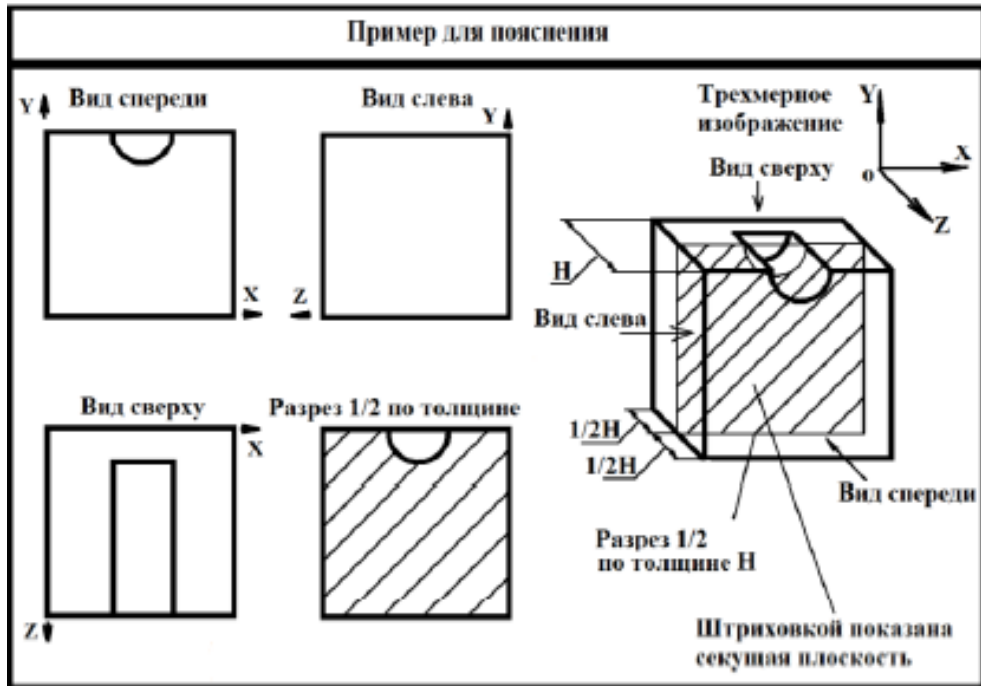


Рис. 8

**Решение.**

Искомое сечение представлено на рис. 9.

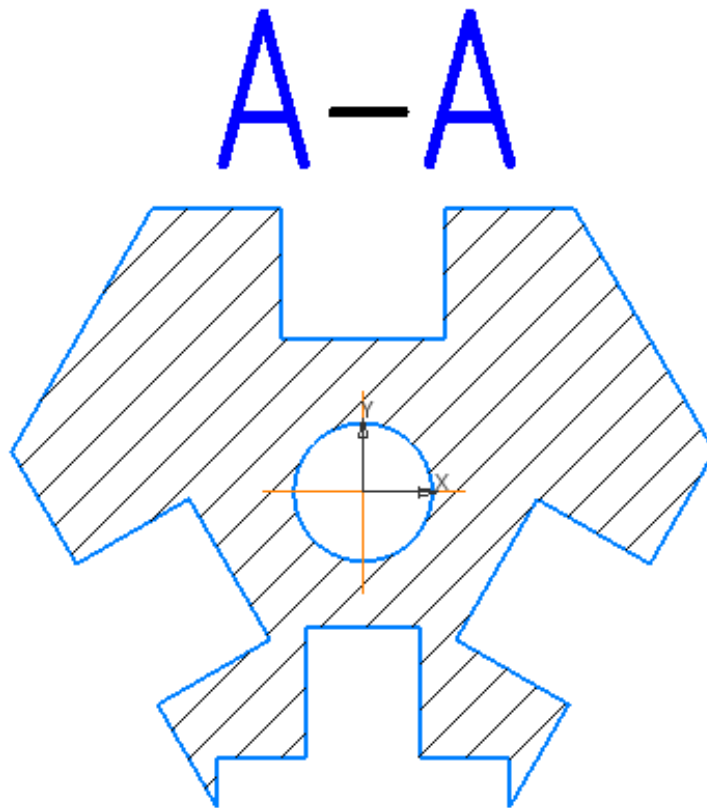


Рис. 9



### Задания, ответы и критерии оценивания

Выпускник технического университета решил организовать собственное малое инновационное предприятие. Взяв кредит в банке, он купил роботизированную производственную систему для изготовления станков аддитивного производства (3D принтеров) для изготовления из пластика моделей и прототипов машиностроительных изделий (рис. 1). Такой 3D принтер содержит несущую систему, приводы, узлы координатных перемещений, печатающую головку, линейные измерительные преобразователи (энкодеры). В цехе предприятия было установлено следующее оборудование: токарный и фрезерный обрабатывающие центры с ЧПУ, сварочный робот и робот-манипулятор. В процессе изготовления различных деталей молодой инженер столкнулся с рядом производственных задач, представленных ниже.



Рис. 1

#### Задача № 1 (5 баллов)

3D-принтер монтируется на неподвижной раме, профиль которой изображен на рис. 2. На виде спереди рама имеет вид квадрата с длиной стороны 108 см. Рама сваривается из труб переменного сечения и на виде слева имеет форму равнобокой трапеции с длиной большего основания 30 см. Сварочный робот должен сварить 4 трубы в четырех местах, как показано на рис. 2. Рама сваривается в три этапа. На первом этапе свариваются швы на лицевой поверхности (вид спереди), на втором – на оборотной, на третьем – снаружи и

изнутри рамы (вид слева). Определить, за **какое время** будет произведен процесс сварки всей рамы, если скорость  $V$  перемещения электрода равна 1 см/с (время перемещения электрода между швами и другие холостые перемещения не учитываются). Во время сварки электрод робота движется с постоянной скоростью.

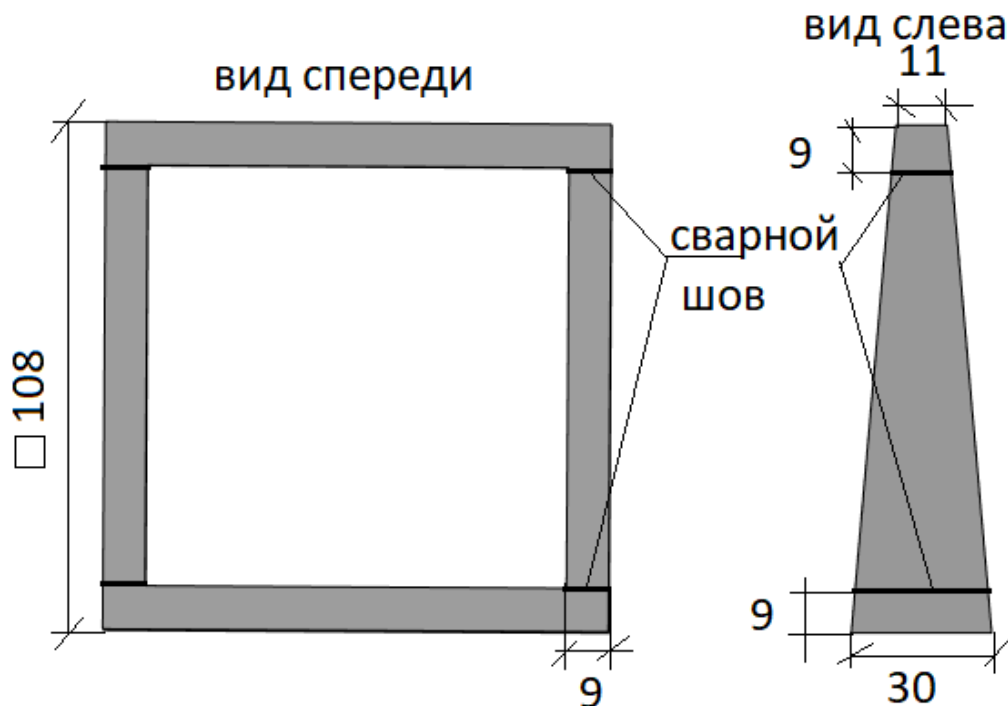


Рис. 2

### Решение.

Суммарная длина швов на виде спереди равна  $L_1=4 \cdot 9=36$  см. Суммарная длина швов на виде сзади аналогично равна  $L_2=36$  см, так как рама симметричная. На виде слева снаружи имеются два шва, аналогичные два шва имеются внутри. Высота достроенного треугольника  $h \approx 170,5$  см. Длина шва на расстоянии 9 см от меньшего основания равна  $L_3=11 \cdot (h-9)/h-108 \approx 12,6$  см. Длина шва на расстоянии 9 см от большего основания равна  $L_4=30 \cdot (h-9)/h \approx 28,4$  см. Суммарная длина всех швов равна  $L=L_1+L_2+4 \cdot L_3+4 \cdot L_4=36+36+4 \cdot 12,6+4 \cdot 28,4=236$  см. Основное время сварки составит  $t=L/V=236/1=236$  с.

**Ответ: 236 с.**

### Задача № 2 (10 баллов)

На металлообрабатывающем центре фрезеруется деталь (1) 3D принтера, которая закрепляется в зажимном приспособлении с пневмоприводом. Пневмопривод состоит из пневмокамеры двустороннего действия с резиноканевой диафрагмой (2), рычага (3), рычага (4) и тяги (5). Требуется определить, какая сила  $W$  будет приложена к детали, если диаметр диафрагмы пневмокамеры равен  $D=125$  мм, диаметр опорной шайбы  $d=88$  мм, рабочее давление воздуха, поступающего в пневмокамеру  $p=0,4$  МПа; КПД всего привода  $\eta=0,9$ , остальные параметры приведены на рис. 3.



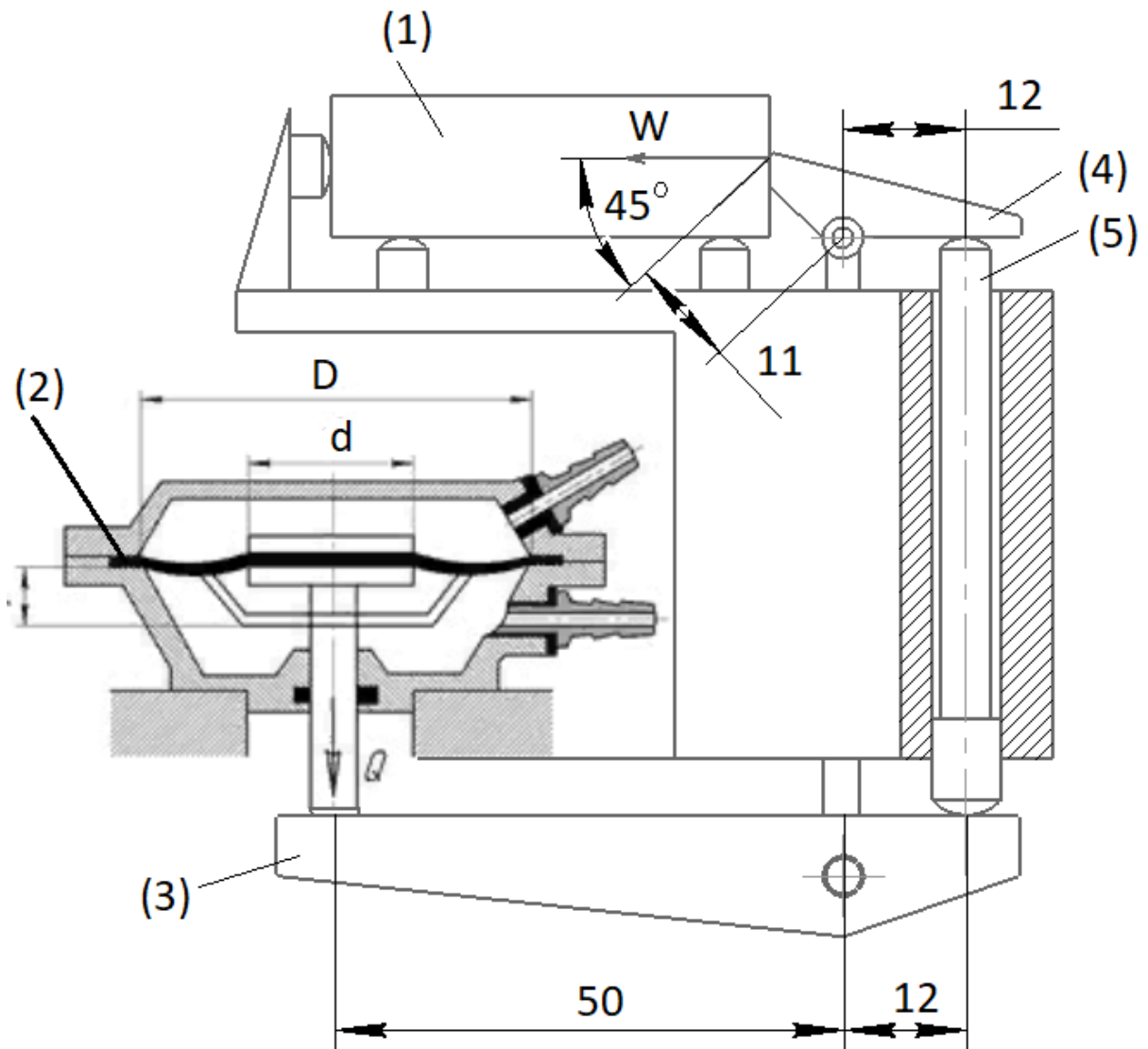


Рис. 3

**Решение.**

Эффективное усилие на штоке пневмокамеры определяется диаметром опорной шайбы и рабочим давлением воздуха:  $Q = p \cdot \pi \cdot d^2 / 4 = 400000 \cdot 3,14 \cdot 0,088^2 / 4 \approx 2432 \text{ Н}$ .

Усилие зажима  $W$  определяется усилием  $Q$  и передаточным отношением исполнительного механизма:

$$W = Q \cdot 50 / 12 \cdot 12 / 11 \cdot \cos 45^\circ \cdot \eta = 2432 \cdot 4,17 \cdot 1,09 \cdot 0,71 \cdot 0,9 \approx 7063,6 \text{ Н}.$$

**Ответ: 7063,6 Н.**

**Задача № 3 (20 баллов)**

Рама 3D-принтера сделана из легкого сплава, поэтому ее сварка производится в среде защитных газов *гелия и аргона*. Баллон для сварки объемом  $V$  должен быть заполнен смесью гелия и аргона в молярном отношении 9:1 при общем давлении 10 атм (1 атм=100 кПа). Аргон содержится в баллонах объемом  $V_1=1$  л при давлении  $P_1=300$  атм, гелий в баллонах  $V_2=2$  л при давлении  $P_2=50$  атм. Сколько баллонов гелия понадобится для того, чтобы полностью использовать один баллон аргона?

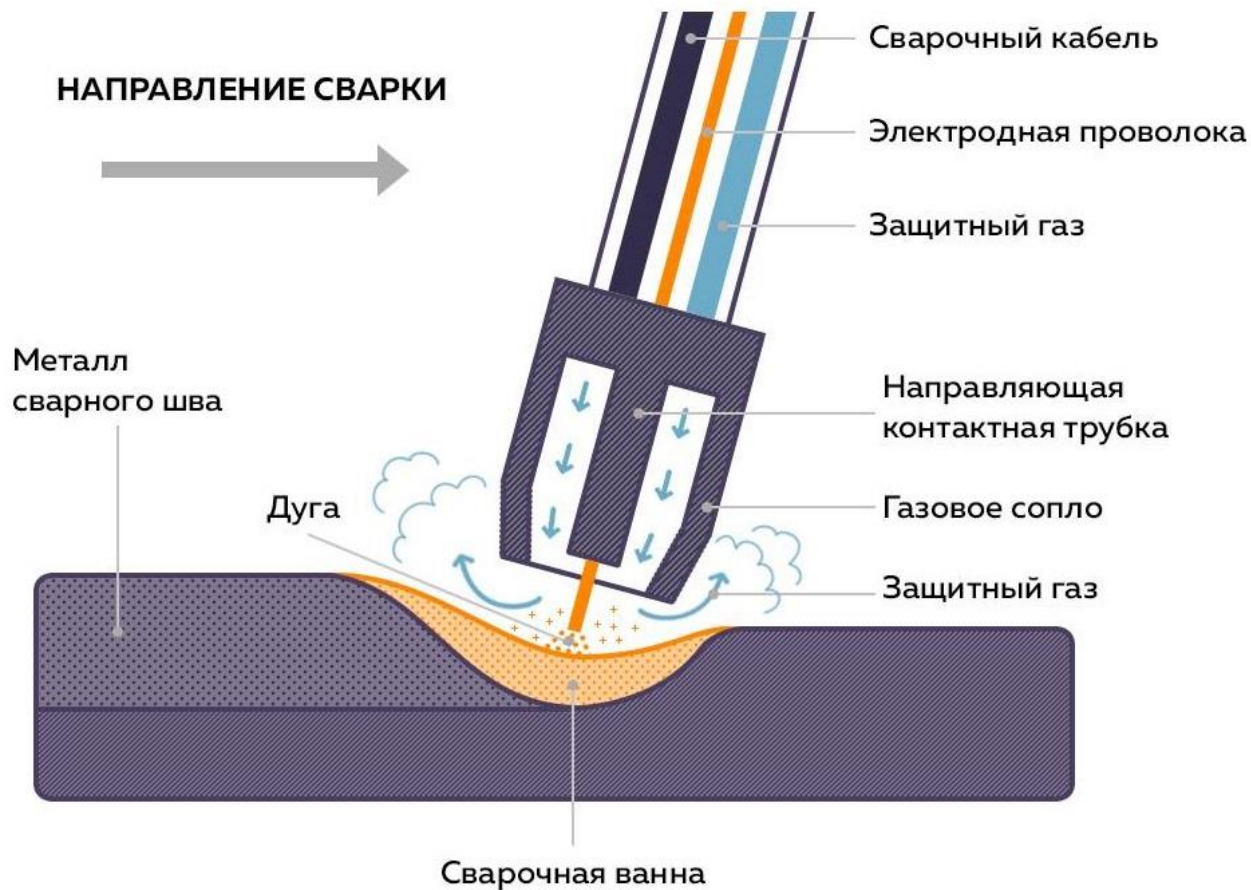


Рис. 4

**Решение.**

Отношение давлений гелия и аргона пропорционально отношению их молярных количеств  $P_{ге}/P_{ар}=v_{ге}/v_{ар}$ ;  $P_{ге}+ P_{ар}=10$  атм. Тогда парциальные давления гелия и аргона соответственно равны  $P_{ге}=9$  атм,  $P_{ар}=1$  атм. Если  $V$ -общий объем баллона для сварки, который надо заполнить, а  $N$ -число баллонов гелия, то по закону Бойля-Мариотта  $P_1V_1=P_{ар}(V+V_1+NV_2)$  для аргона;  $P_2 \cdot NV_2=P_{ге}(V+V_1+NV_2)$  для гелия. Разделив первое уравнение на второе найдем  $N=(P_1V_1P_{ге})/(P_2P_{ар}V_2)=300 \cdot 1 \cdot 9/50 \cdot 1 \cdot 2=27$  шт.

**Ответ: 27.**

**Задача № 4 (30 баллов)**

Для участка сборки инженер получил чертеж одной из *деталей* 3D-принтера, которая без размеров изображена четырьмя проекциями, приведенными на рис. 5. Четыре проекции – это изображение четырех видов конструкции: спереди, сверху, слева и снизу. Нарисуйте **разрез** этой детали плоскостью А-А, параллельной виду слева и проходящей ровно через ось симметрии детали. Для пояснения приведенных выше понятий на рис. 6 («Пример для пояснения») даны все виды и разрезы применительно к другой детали. На **разрезе** рисуются все кромки детали, которые попали в секущую плоскость и те, которые видны за ней.

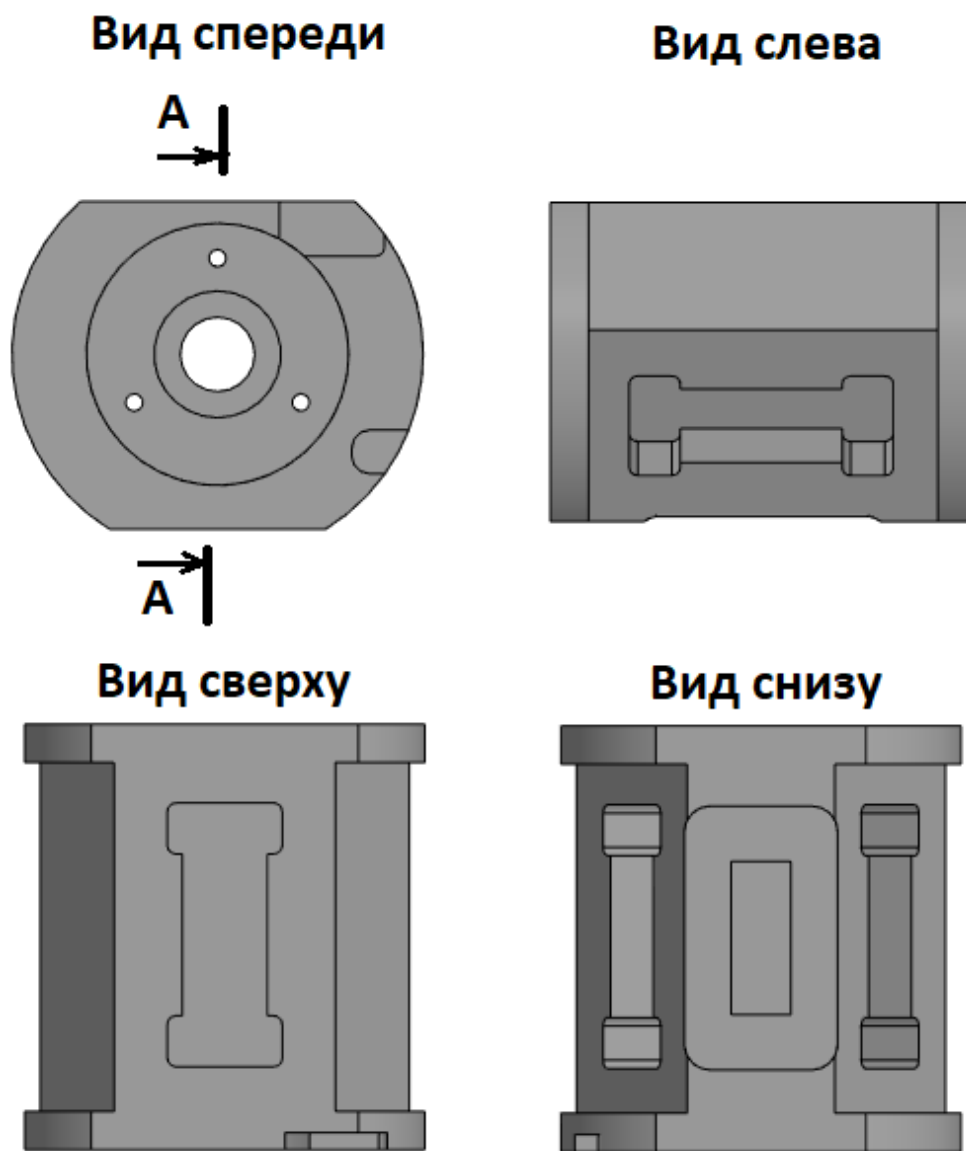


Рис. 5

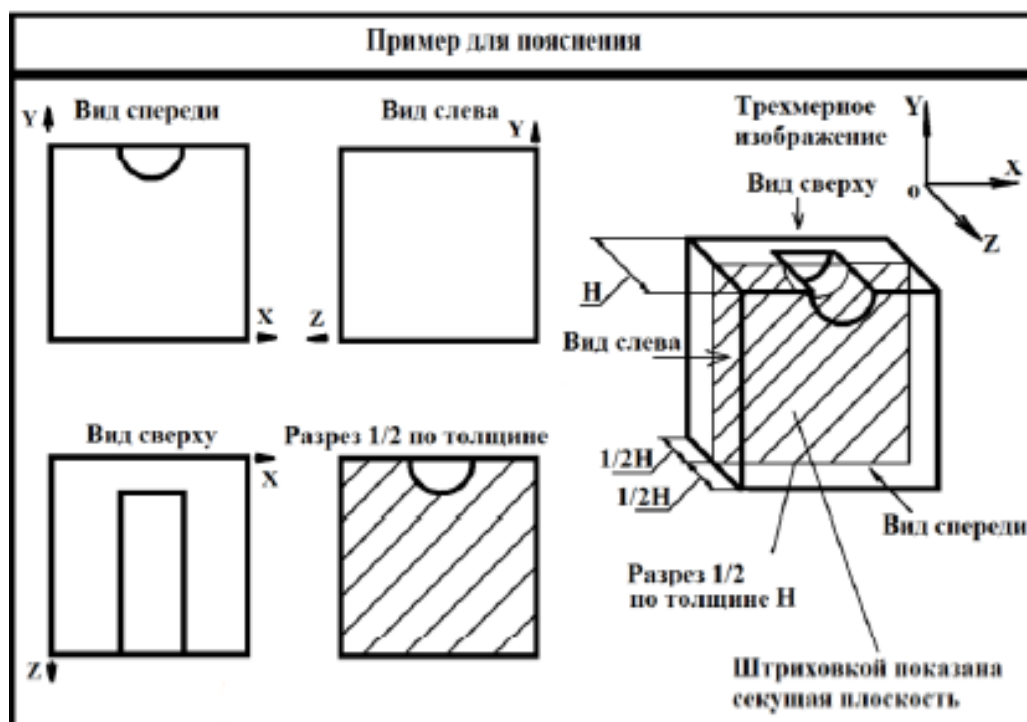
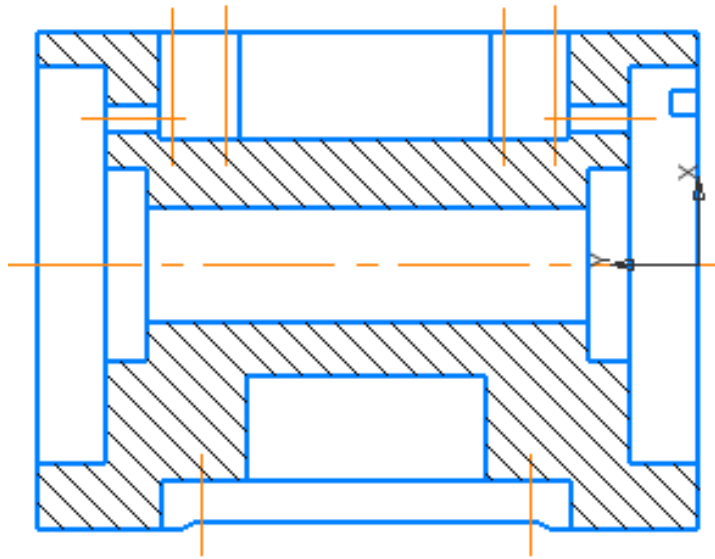


Рис. 6

Ответ:

A—A



#### Задача № 5 (35 баллов)

На участке обработки деталей для 3D-принтера, где работает выпускник, возникла проблема отказа конструктивных элементов режущего инструмента (рис 7). Высокие механические напряжения служили причиной разрушения режущей пластины токарного проходного резца, так как момент затяжки винта был чрезмерным. Сменная режущая пластина токарного проходного резца (2) крепится в державке резца (1) с помощью винта (3), который ввинчивается в державку. Прижим пластины к державке осуществляется за счет того, что головка винта имеет смещение (эксцентриситет)  $e$  относительно резьбовой части винта. Чем больше величина  $e$ , тем больше сила прижима пластины винтом к державке. Для определения величины смещения  $e$ , необходимо знать величину силы прижима винта к пластине. Упрощенная расчетная схема представлена на рис. 8. На пластину действует сила резания  $P_1$ , которая стремится опрокинуть пластину относительно точки С. Рассматривая пластину (2) как рычаг, качающийся относительно точки С, **требуется определить минимальную силу закрепления  $P_2$** , действующую со стороны винта на пластину, если известна сила резания  $P_1=500$  Н, а размеры плеч приложенных сил относительно точек С и В равны:

- $a = 0,00397$  м;
- $g = 0,00227$  м;
- $b = 0,00049$  м;
- $c = 0,00825$  м;
- $\alpha = 30^\circ$ ;
- $\beta = 30^\circ$ .

Коэффициент трения между пластиной и винтом равен  $f = 0,16$ . Трение между державкой и пластиной не учитывать.

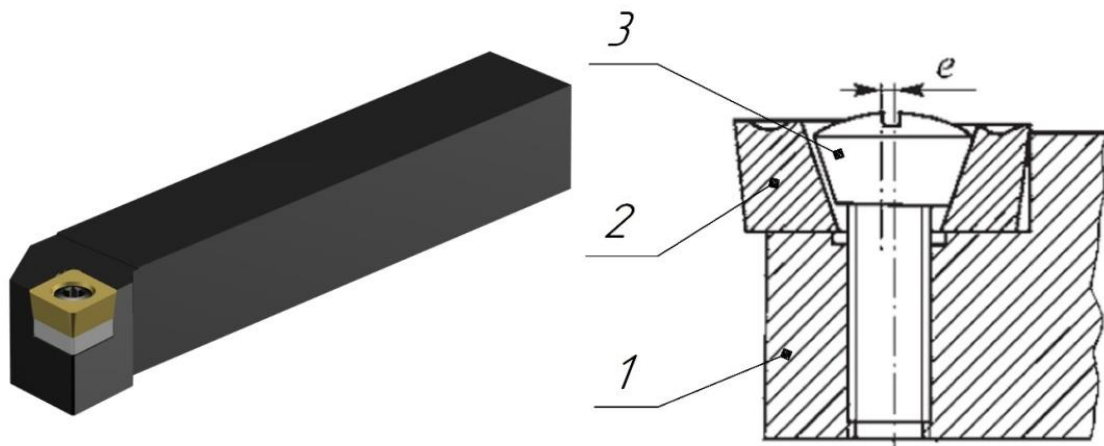


Рис. 7

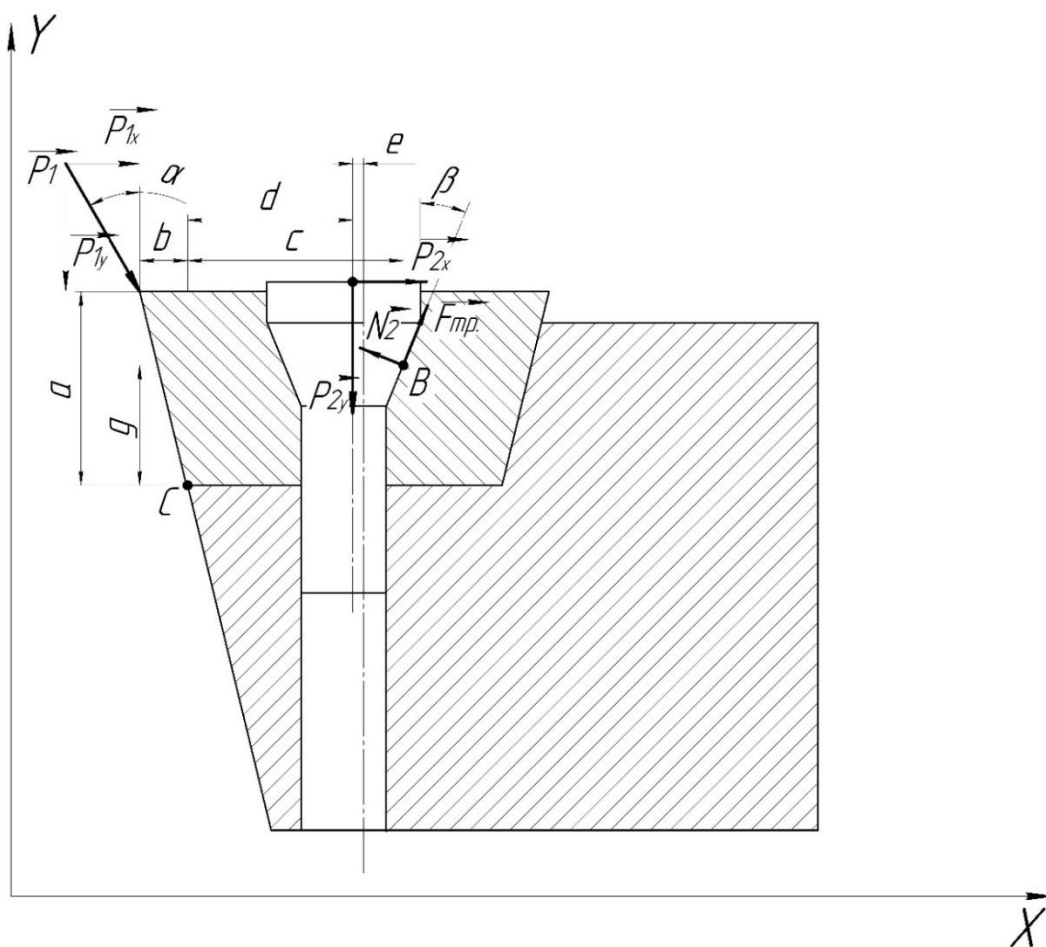


Рис. 8

**Решение.**

Запишем систему уравнений, описывающих статическое равновесие узла установки пластины:

$$\begin{aligned} \sum F_X = 0: & P_1 \sin(\alpha) + P_{2x} + N_2 \cos(\beta) + F_{\text{тр.}} \sin(\beta) = 0 \\ \sum F_Y = 0: & -P_1 \cos(\alpha) - P_{2y} - N_2 \sin(\beta) + F_{\text{тр.}} \cos(\beta) = 0 \\ \sum M_C = 0: & P_1 \cos(\alpha) b - P_{2x} a - P_{2y} d - P_1 \sin(\alpha) a - N_2 \cos(\beta) \frac{a}{2} - \\ & - N_2 \sin(\beta) c + F_{\text{тр.}} \cos(\beta) c - F_{\text{тр.}} \sin(\beta) \frac{a}{2} = 0 \end{aligned}$$

Так как для одного тела под действием плоской системы сил можно составить только три независимых уравнения равновесия, а в данном случае неизвестных больше, чем уравнений равновесия системы, то для их определения необходимо нужно разделить на 2 подсистемы (статическое равновесие пластины и статическое равновесие винта) (рис. 9, 10) и решить отдельно уравнения для винта и для пластины.

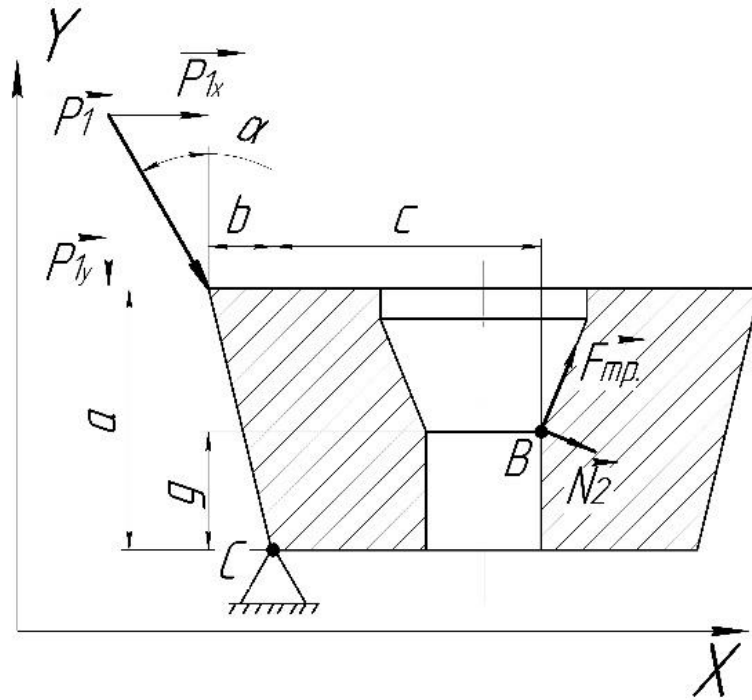


Рис. 9

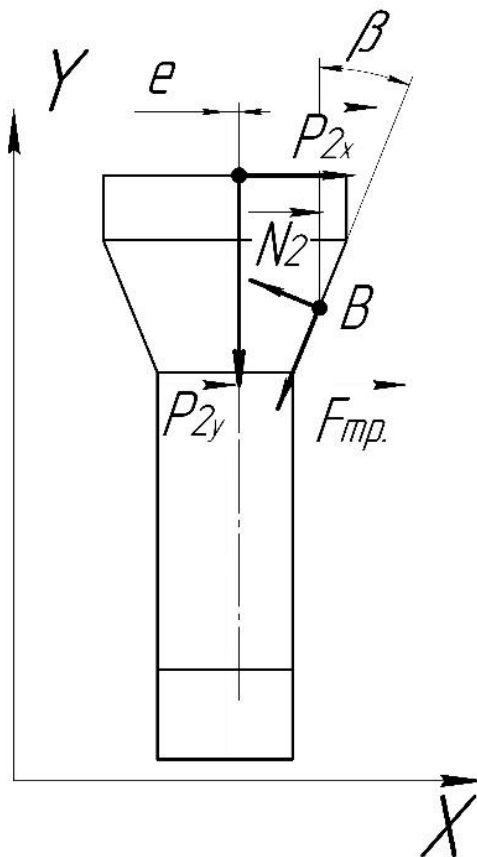


Рис. 10

Запишем систему уравнений, описывающих статическое равновесие пластины:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum F_X = 0: P_1 \sin(\alpha) + N_2 \cos(\beta) + F_{\text{тр.}} \sin(\beta) = 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum F_Y = 0: -P_1 \cos(\alpha) - N_2 \sin(\beta) + F_{\text{тр.}} \cos(\beta) = 0 \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum M_C = 0: P_1 \cos(\alpha) b - P_1 \sin(\alpha) a - N_2 \cos(\beta) \frac{a}{2} - N_2 \sin(\beta) c + \\ + F_{\text{тр.}} \cos(\beta) c - F_{\text{тр.}} \sin(\beta) \frac{a}{2} = 0 \end{array} \right. \quad (3)$$

Запишем систему уравнений, описывающих статическое равновесие винта:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum F_X = 0: P_{2x} - N_2 \cos(\beta) - F_{\text{тр.}} \sin(\beta) = 0 \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum F_Y = 0: -P_{2y} + N_2 \sin(\beta) - F_{\text{тр.}} \cos(\beta) = 0 \end{array} \right. \quad (5)$$

Так как  $F_{\text{тр.}} = f \cdot N_2$ , получаем уравнения:

$$\sum F_X = 0: P_1 \sin(\alpha) + N_2 \cos(\beta) + f N_2 \sin(\beta) = 0 \quad (6)$$

$$\sum F_Y = 0: -P_1 \cos(\alpha) - N_2 \sin(\beta) + f N_2 \cos(\beta) = 0 \quad (7)$$

$$\sum M_C = 0: P_1 \cos(\alpha) b - P_1 \sin(\alpha) a - N_2 \cos(\beta) \frac{a}{2} - N_2 \sin(\beta) c + \\ + f N_2 \cos(\beta) c - f N_2 \sin(\beta) \frac{a}{2} = 0 \quad (8)$$

$$\sum F_X = 0: P_{2x} - N_2 \cos(\beta) - f N_2 \sin(\beta) = 0 \quad (9)$$

$$\sum F_Y = 0: -P_{2y} + N_2 \sin(\beta) - f N_2 \cos(\beta) = 0 \quad (10)$$

Преобразуем уравнение (8):

$$\sum M_C = 0: P_1 (b \cos(\alpha) - a \sin(\alpha)) - N_2 \left( \frac{a}{2} \cos(\beta) + c \sin(\beta) \right) + \\ + f N_2 \left( c \cos(\beta) - \frac{a}{2} \sin(\beta) \right) = 0 \quad (11)$$

Выразим  $N_2$  из уравнения (11):

$$N_2 = \frac{P_1 (b \cos(\alpha) - a \sin(\alpha))}{\left( \frac{a}{2} \cos(\beta) + c \sin(\beta) \right) - f \left( c \cos(\beta) - \frac{a}{2} \sin(\beta) \right)} \quad (12)$$

Из (9) выразим  $P_{2x}$ :

$$P_{2x} = N_2 \cos(\beta) + f N_2 \sin(\beta) \quad (13)$$

Из (10) выразим  $P_{2y}$ :

$$P_{2y} = N_2 \sin(\beta) - f N_2 \cos(\beta) \quad (14)$$

Подставляя  $N_2$  в уравнения (13) и (14), находим  $P_{2x}$  и  $P_{2y}$ :

$$P_{2x} = \frac{P_1 (b \cos(\alpha) - a \sin(\alpha)) \cos(\beta)}{\left( \frac{a}{2} \cos(\beta) + c \sin(\beta) \right) - f \left( c \cos(\beta) - \frac{a}{2} \sin(\beta) \right)} +$$

$$(15) \quad + \frac{f P_1 (b \cos(\alpha) - a \sin(\alpha)) \sin(\beta)}{\left(\frac{a}{2} \cos(\beta) + c \sin(\beta)\right) - f \left(c \cos(\beta) - \frac{a}{2} \sin(\beta)\right)}$$

$$(16) \quad P_{2y} = \frac{P_1 (b \cos(\alpha) - a \sin(\alpha)) \sin(\beta)}{\left(\frac{a}{2} \cos(\beta) + c \sin(\beta)\right) - f \left(c \cos(\beta) - \frac{a}{2} \sin(\beta)\right)} - \frac{f P_1 (b \cos(\alpha) - a \sin(\alpha)) \cos(\beta)}{\left(\frac{a}{2} \cos(\beta) + c \sin(\beta)\right) - f \left(c \cos(\beta) - \frac{a}{2} \sin(\beta)\right)}$$

Плечи  $a$ ,  $b$ ,  $c$  известны из конструктивных параметров узла закрепления СМП винтом.

Подставляя известные параметры в уравнения (15) и (16) получим составляющие силы  $P_2$ :

$$P_{2x} \approx 173 \text{ Н}; P_{2y} \approx 55 \text{ Н}.$$

Тогда искомая сила  $P_2$  будет равна  $P_2 = \sqrt{173^2 + 55^2} \approx 181,5 \text{ Н}$ .

**Ответ: 181,5 Н.**