

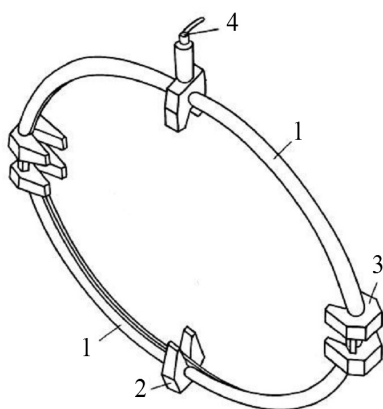
## ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ ПРИВодОВ ПОДАЧ МАШИНЫ ДЛЯ БЕЗОГНЕВОЙ РЕЗКИ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

*Б.А. Лопатин, Т.Р. Хазиев*

Проведены исследования нагруженности приводов подач машины безогневой резки труб (МРТ) новой конструкции. В ходе исследований получены необходимые зависимости для расчета мощности приводов. Новая конструкция машины позволяет исключить поломку инструмента и элементов машины, повышает безопасность работы оператора при врезании инструмента. Результаты исследования использованы при проектировании опытного образца новой конструкции МРТ.

*Ключевые слова:* нефтегазопровод, машина для резки труб, сила резания, мощность.

При ремонте трубопроводов для вырезки дефектного участка применяются два метода резки труб: с использованием энергии взрыва – кумулятивными труборезами (рис. 1) и безогневым методом – с применением машин для резки труб (далее МРТ) (рис. 2) [1].



**Рис. 1.** Труборез кумулятивный кольцевой наружный (ТрККН): 1 – полукольцо с бризантным ВВ; 2 – фиксатор; 3 – замок; 4 – электродетонатор

амортизаторы 1, рычаги 2 с натяжной звездочкой 3. МРТ работает следующим образом. Вращение от вала двигателя 4 через ременную передачу передается на ведущий вал редуктора 5. На выходном валу 6 этого редуктора установлена фреза 7. Врезание режущего инструмента производится винтовым механизмом подачи врезания 8, путем поворота редуктора на цапфах, установленных в корпусе тележки 9.

Подача инструмента (перемещение тележки 9 по трубе) производится приводом круговой подачи, который получает движение от выходного вала редуктора 5 привода вращения инструмента. Вращение от этого вала передается на приводную звездочку 10. Звездочка 10, находясь в зацеплении с неподвижной цепью, охватывающей разрезаемую трубу, приводит в движение тележку 9 и вместе с ней – режущий инструмент 7. Включение круговой подачи (перемещение машины по трубе) осуществляется механизмом включения 11. Резка осуществляется за счет перемещения машины по поверхности трубы. Машина позволяет осуществить резку труб диаметром 320..1440 мм при толщине стенки 30 мм.

Анализ рынка машин МРТ показал, что все машины имеют два существенных недостатка:

- жесткая кинематическая связь привода перемещения и привода вращения инструмента;
- ручное врезание инструмента (фрезы).

Отсутствие регулировки режимов резания из-за жесткой кинематической цепи в приводе перемещения машины приводит к преждевременному износу инструмента, соответственно проис-

ходит увеличение силы резания, вследствие чего возрастает нагруженность привода, а в случае внезапной поломки инструмента возникают ударные нагрузки, что вызывает разрушение элементов машины.

Ручное врезание инструмента является опасным, потому что оператор осуществляет работу вблизи зоны резания. Особенно опасно – первое врезание инструмента, так как в трубопроводе могут присутствовать горючие остатки нефтепродуктов.

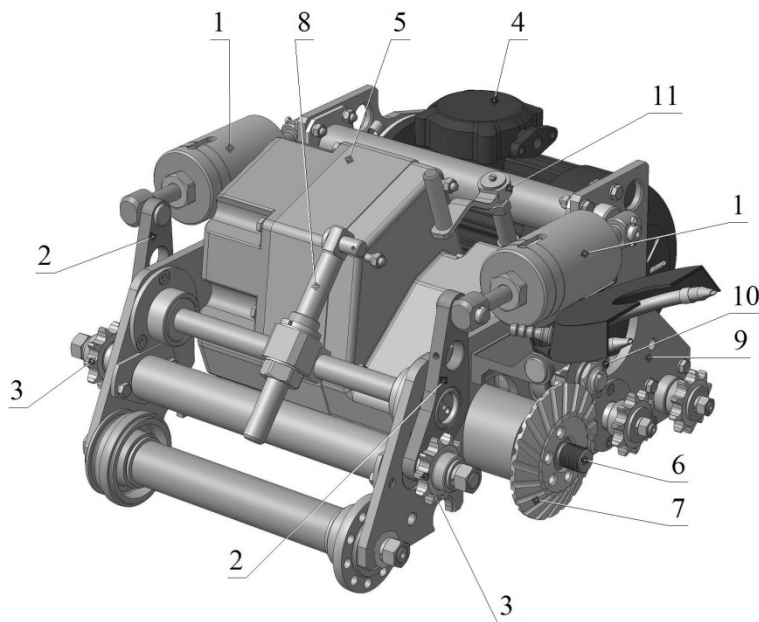


Рис. 2. Машина безогневой резки труб «Волжанка 3М»

В связи с вышеизложенным, актуальной задачей являлось совершенствование машины МРТ «Волжанка 3М», направленное на устранение указанных недостатков.

Первым этапом процесса совершенствования машины являлось построение кинематической схемы с независимыми приводами подачи инструмента (рис. 3). В отличие от кинематической схемы машины «Волжанка 3М», где вращение инструмента и перемещение машины по трубе осуществлялось от одного электродвигателя при ручном врезании инструмента, предложенная схема включает в себя три независимых электромеханических привода, а именно: привод главного движения I, привод круговой подачи II и привод подачи врезания инструмента III. Привод главного движения осуществляет вращение фрезы с постоянной скоростью. Он включает в себя электродвигатель, ременную передачу и зубчатые передачи. Привод круговой подачи служит для перемещения машины по трубе, он состоит из электродвигателя, трех последовательно расположенных планетарных передач и ведущей звездочки цепной передачи. Привод подачи врезания, необходимый для перемещения фрезы перпендикулярно оси трубы, содержит мотор – редуктор и передачу винт – гайка. Применение независимых приводов подачи инструмента позволяет использовать в них вентильные электродвигатели с системой управления, исключающей перегрузки приводов подачи, поломку инструмента и элементов машины при резке труб.

Одной из основных задач проектирования новой конструкции МРТ являлся расчет мощности двигателей приводов подачи. При проектировании привода подачи врезания был проведен анализ возможных эксплуатационных нагрузок, возникающих в процессе врезания инструмента. В процессе резания труб разного диаметра и толщины стенки наблюдается значительное изменение усилий действующих на машину. В первоначальный момент резания фреза располагается в верхнем положении, вследствие чего между трубопроводом и фрезой существует зазор  $Y_0$ , необходимый для безопасного подвода инструмента (рис. 4). Величина зазора зависит как от диаметра трубы, так и от диаметра фрезы. С увеличением диаметра трубопровода зазор  $Y_0$  увеличивается, в свою очередь увеличение диаметра фрезы приводит к уменьшению зазора  $Y_0$ . В этом случае возникает необходимость подбора инструмента при резании труб определенного диаметра и

## Расчет и конструирование

толщины стенки. Величина зазора определяется как:  $Y_0 = DO - R_{фр} - R_{Тр}$ , где  $R_{фр}$  – радиус фрезы,  $R_{Тр}$  – радиус трубы,  $DO$  – расстояние между осями трубы и фрезы. Из рис. 4 следует:

$$Y_0 = DO - R_{фр} - R_{Тр} = \sqrt{(\sqrt{(R_{фр} + r)^2 - (0,5L)^2} + b)^2 + a^2} - R_{фр} - R_{Тр}. \quad (1)$$

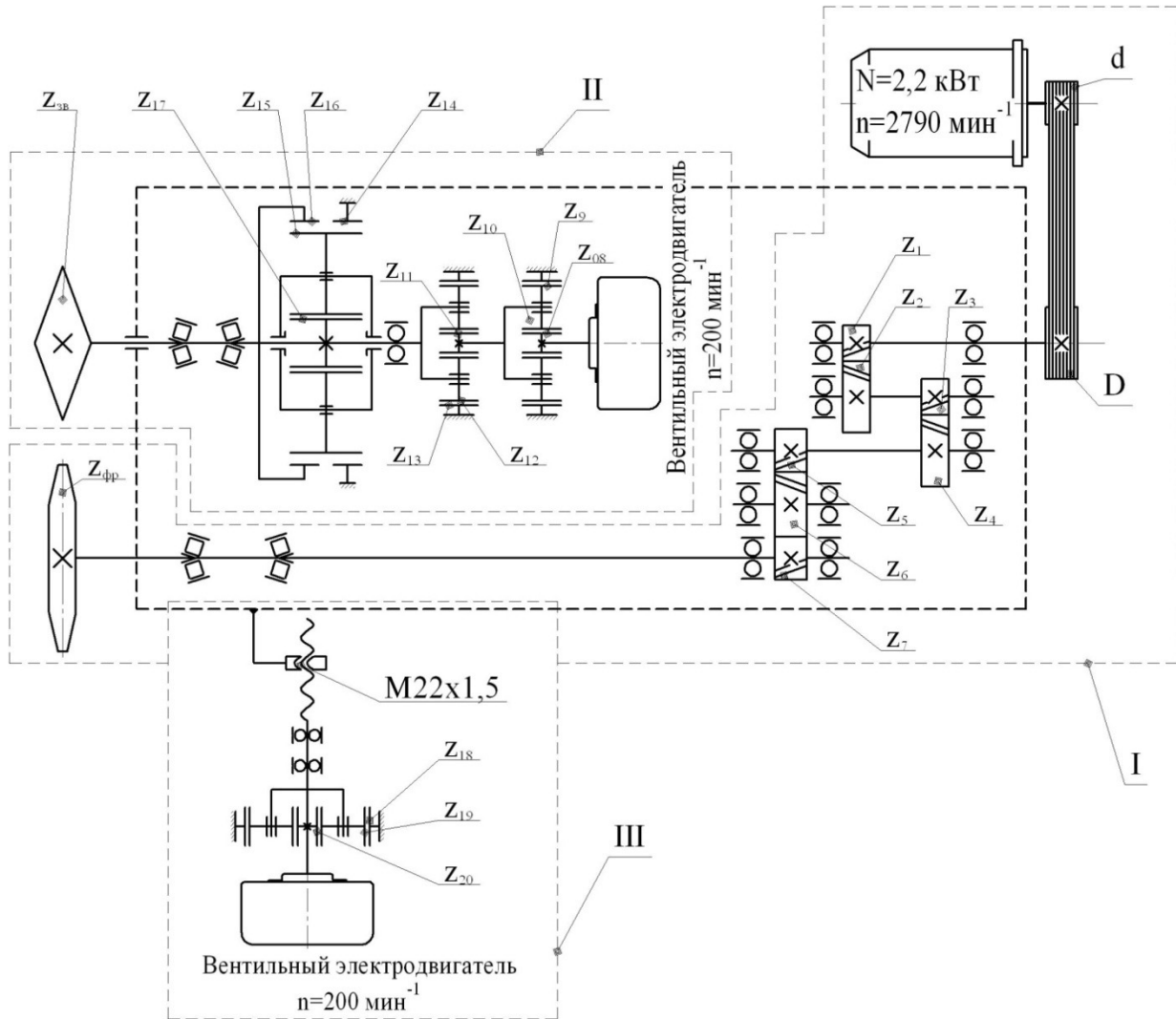


Рис. 3. Кинематическая схема машины новой конструкции

Таким образом, из условия существования гарантированного зазора  $Y_0$  по выражению (1) можно определить максимальный диаметр фрезы при заданном диаметре разрезаемой трубы. Это позволит исключить проблему установки инструмента при монтаже машины на трубопроводе.

Рабочая нагрузка привода подачи врезания обусловлена силой резания, которая в процессе врезания возрастает с увеличением глубины и ширины фрезерования. На рис. 5 изображены последовательные положения фрезы при ее врезании. В начальном положении и при холостом ходе сила резания  $P_z = 0$ , так как между фрезой и трубопроводом существует зазор. По мере перемещения происходит врезание фрезы на расстояние  $h = Y_1 - Y_0$ , где  $Y_0$  – расстояние от трубопровода до фрезы в ее начальном положении,  $Y_1$  – величина перемещения фрезы от ее начального положения. Ширина фрезерования определяется перемещением  $h$  и геометрическими параметрами фрезы, таким образом, на рабочей поверхности фрезы с углом профиля  $\alpha_1$  ширина фрезерования  $B_1 = b_1 + 2h / \operatorname{tg} \alpha_1$ , а при угле  $\alpha_2$  ширина  $B_2 = b_2 + 2h / \operatorname{tg} \alpha_2$  (см. рис. 5).

Глубина фрезерования  $t$  зависит не только от перемещения  $h$  и радиуса фрезы  $R_{фр}$ , но и от

радиуса разрезаемой трубы  $R_{Тр}$ . По теореме косинусов в треугольнике ABC (рис. 6) имеем:  
 $\alpha = \arccos\left[\frac{R_{Фр}^2 + c^2 - R_{Тр}^2}{2R_{Фр}c}\right]$ , где  $c = R_{Фр} + R_{Тр} - h$ , а глубина резания рассчитывается по выражению

$$t = 2R_{Фр} \sin \alpha. \tag{2}$$

Подача инструмента при врезании определяется скоростью перемещения инструмента перпендикулярно оси трубы. Следовательно, минутная подача  $S_M = h/t_{Вр}$ , где  $t_{Вр}$  – время врезания инструмента, тогда подача на зуб  $S_Z = S_M / zn$ , где  $z$  – число зубьев фрезы,  $n$  – частота вращения фрезы, об/мин. Расчет силы резания  $P_Z$  при резке осуществлялся по известным формулам теории резания. Главная составляющая силы резания при фрезеровании – окружная сила,  $P_Z$  [2]:

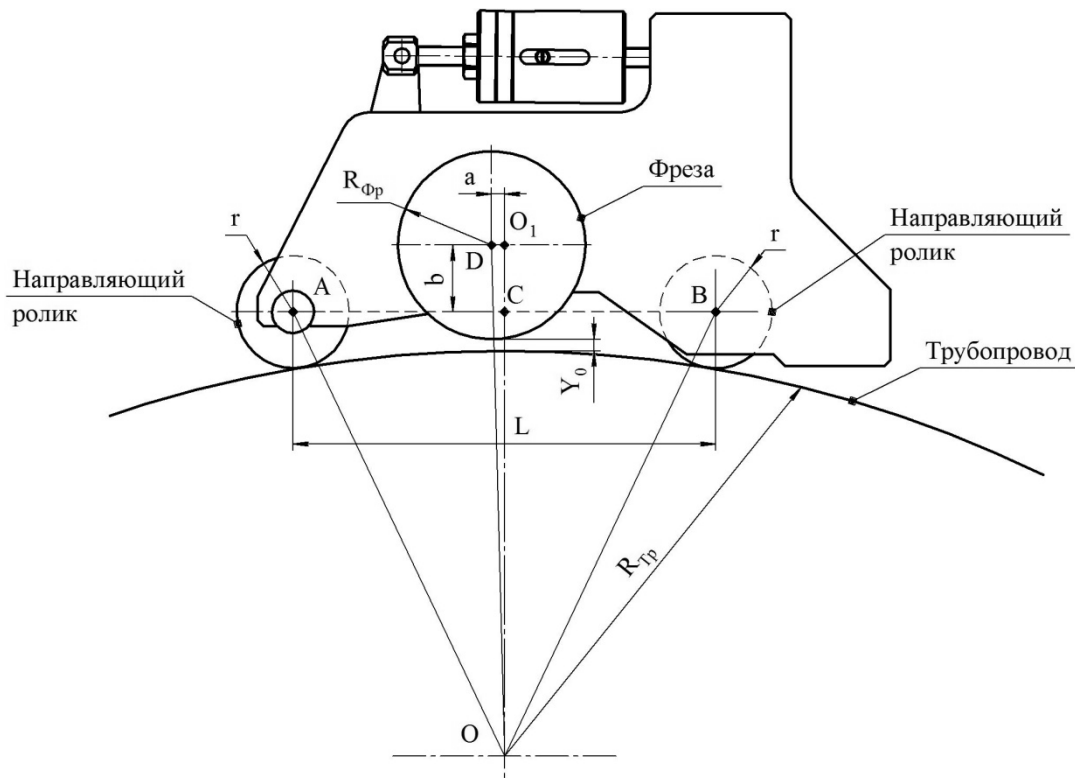


Рис. 4. К определению зазора  $Y_0$

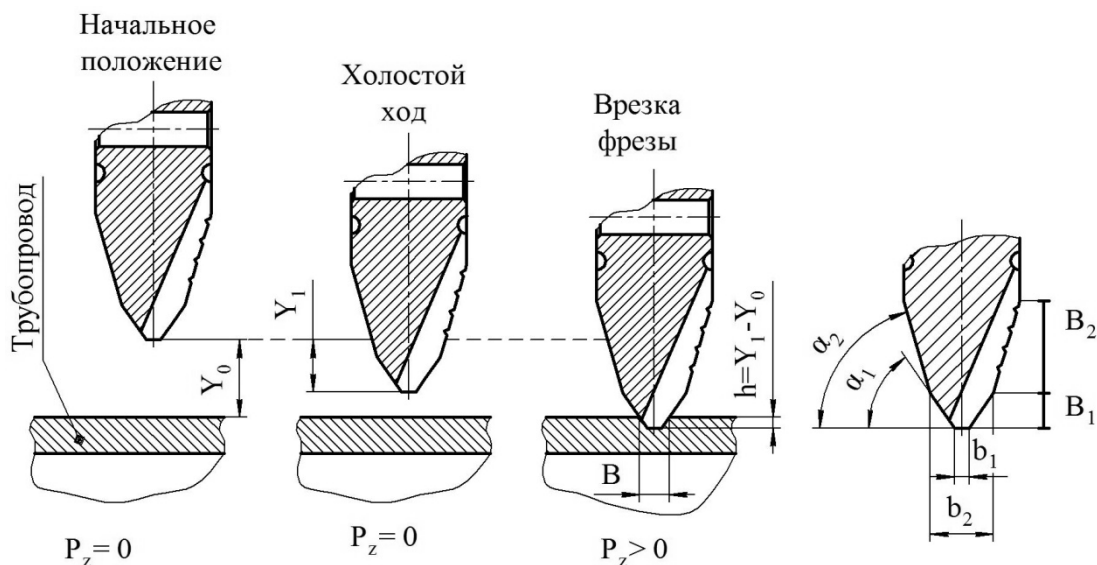


Рис. 5. Характерные положения фрезы

## Расчет и конструирование

$$P_Z = \frac{10 C_p t^x S_Z^y B^u Z}{D^q n^w} K_{MP}, \quad (3)$$

где  $C_p$  – коэффициент в формуле окружной силы  $P_Z$ ;  $x, y, u, q, w$  – показатели степени в формуле окружной силы  $P_Z$ ;  $K_{MP}$  – поправочный коэффициент на качество обрабатываемого материала.

Радиальная сила  $P_Y$  [4]:

$$P_Y = (0,4 \div 0,6) P_Z. \quad (4)$$

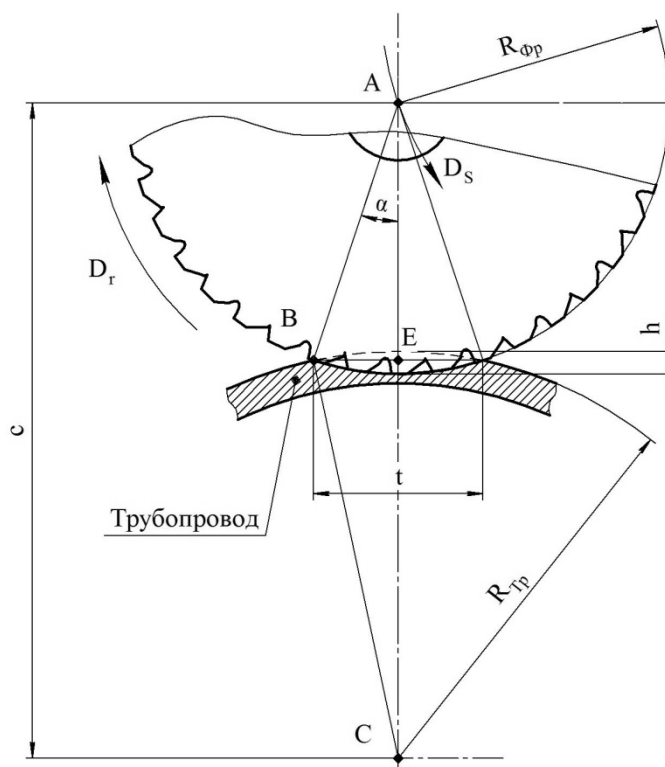


Рис. 6. К определению глубины фрезерования

На рис. 7 представлена схема привода подачи врезания инструмента. Для определения усилий в узлах машины привод разбит в точке В на две части. Для определения мощности мотор редуктора привода подачи врезания необходимо было оценить осевую силу винта механизма врезания  $P_{oc}$ , для чего составлено уравнение равновесия относительно точки С, из которого

$$P_{oc} = \frac{P_Z(0,5 l_2 \cos \beta - l_2 \cos(90^\circ - \beta) R_{Фр})}{l_2 \cos \theta}. \quad (5)$$

Для обеспечения требуемой осевой силы к винту механизма врезания необходимо приложить вращающий момент  $M_{B,B}$ :

$$M_{B,B} = P_{oc} \frac{d}{2} \operatorname{tg}(\delta + \gamma), \quad (6)$$

где  $d$  – номинальный диаметр резьбы,  $\delta$  – угол подъема витков резьбы,  $\gamma$  – приведенный угол трения.

Требуемая мощность мотор – редуктора определяется по выражению:

$$P_{M,p} = M_{B,B} \cdot \omega_{B,B}, \quad (7)$$

где  $\omega_{B,B}$  – угловая скорость вращения винта механизма врезания.

С помощью математического редактора VisSim были построены графики требуемой мощности привода подачи врезания инструмента при врезании в трубу диаметром 720 мм и толщиной стенки 30мм с пределом прочности  $\sigma_b = 600$  МПа отрезной и фасонной фрезами (рис. 8). Из графиков видно, что при холостом ходе (интервал времени от 0 до 30 с) потребляемая мощность постоянна, а с момента врезания и до выхода инструмента во внутреннюю полость трубы, потребляемая мощность плавно увеличивается (интервал времени от 30 до 95 с), после чего происходит остановка привода.

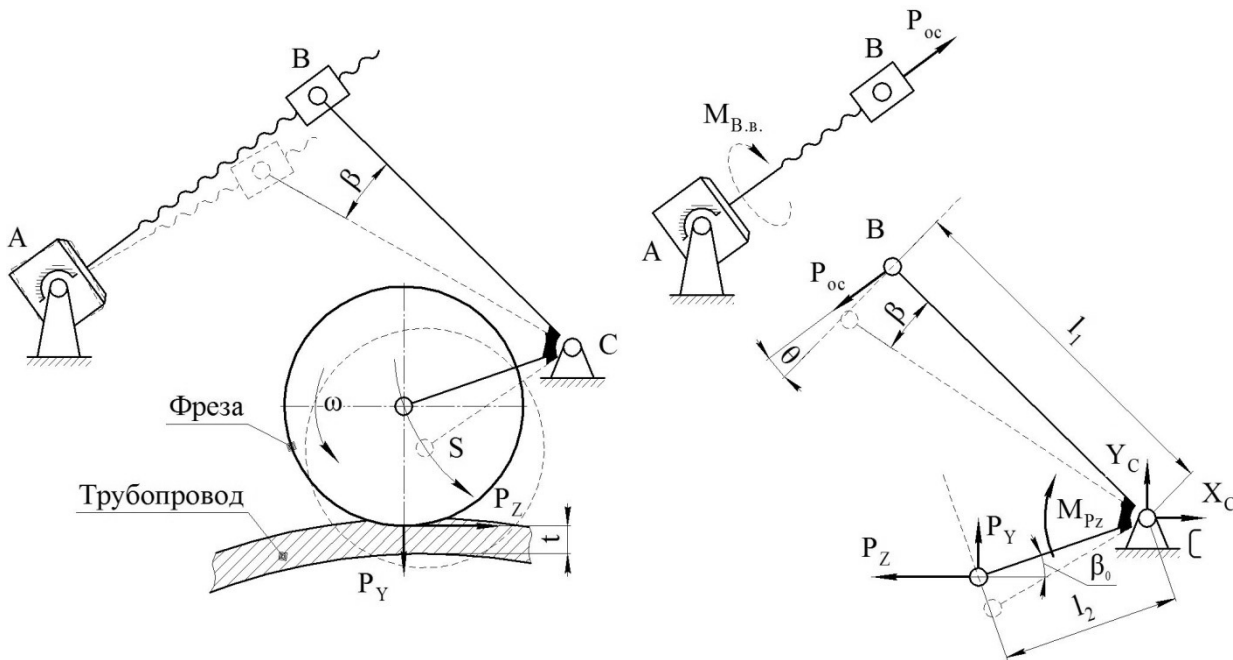


Рис. 7. Схема привода подачи врезания инструмента

Перемещение машины по трубе осуществляется с помощью привода круговой подачи инструмента. Проведенный анализ внешних факторов, определяющих мощность привода, показал [5], что мощность привода круговой подачи равна

$$P_{П.п} = M_{ЗВ} \cdot \omega, \tag{8}$$

где  $M_{ЗВ}$  – приведенный момент на ведущей звездочке привода круговой подачи инструмента,  $\omega$  – угловая скорость вращения ведущей звездочки привода круговой подачи инструмента. Приведенный момент на ведущей звездочке привода круговой подачи инструмента  $M_{ЗВ}$  равен сумме следующих моментов:  $M_{Тр}$  – момент от сил трения в кинематических парах узлов трения,  $M_{P_{YZ}}$  – момент от силы резания  $P_{YZ}$ , а также  $M_G$  – момент от веса машины  $G$ . Таким образом, искомый момент будет равен

$$M_{ЗВ} = M_{Тр} + M_{Pz} + M_G. \tag{9}$$

Результирующий момент от сил трения вычисляется как сумма моментов в элементарных узлах трения скольжения и качения:

$$M_{Тр} = \sum N_i \cdot r_i \cdot f + \sum R_i \cdot k, \tag{10}$$

где  $N_i$  – нормальная сила в паре трения скольжения,  $r_i$  – радиус в паре трения скольжения,  $f$  – коэффициент трения скольжения,  $R_i$  – сила реакции в опорных роликах машины,  $k$  – коэффициент трения качения. В качестве примера приведен график (рис. 9, а) зависимости момента  $M_{Тр}$  от положения машины на трубе при резке трубы  $\varnothing 720$  мм с толщиной стенки 30 мм фасонной фрезой  $\varnothing 170$  и затяжке натяжителей-амортизаторов с усилием  $P_1 = 6600$  Н.

Момент для преодоления сил резания находится по формуле

$$M_{Pz} = P_z \cdot r_\phi, \tag{11}$$

где  $P_z$  – окружная сила резания;  $r_\phi$  – радиус фрезы.

Существенное влияние на перемещение машины по трубе оказывает ее вес, значение момен-

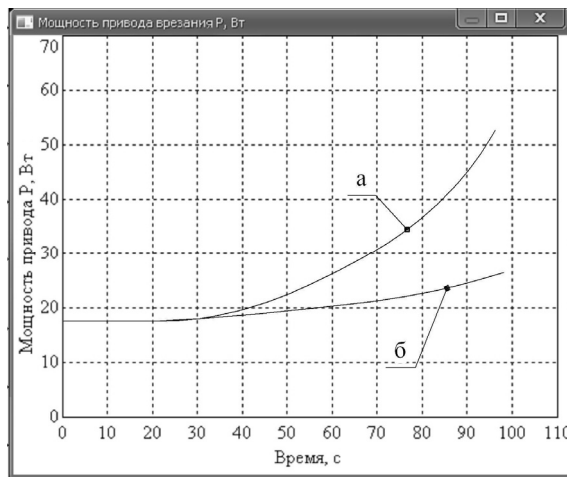


Рис. 8. Графики требуемой мощности привода подачи врезания инструмента: а – при резке фасонной фрезой  $\varnothing 170 \times 32$ ; б – при резке отрезной фрезой  $\varnothing 170 \times 6$

## Расчет и конструирование

та от веса машины меняет знак в зависимости от углового положения на трубе и находится по формуле

$$M_G = G \cdot \sin \varphi \cdot r_{вз}, \quad (12)$$

где  $G$  – вес машины,  $r_{вз}$  – делительный радиус звездочки,  $\varphi$  – угол положения машины на трубе. График зависимости момента силы тяжести машины от ее углового расположения на трубе при затяжке натяжителей-амортизаторов с усилием  $P_1 = 6600$  Н на трубе  $\varnothing 720$  мм приведен на рис. 9, б.

Совокупность выражений (8)–(12) позволяет определить необходимую мощность привода круговой подачи с учетом регламентированной величины скорости перемещения при резке труб.

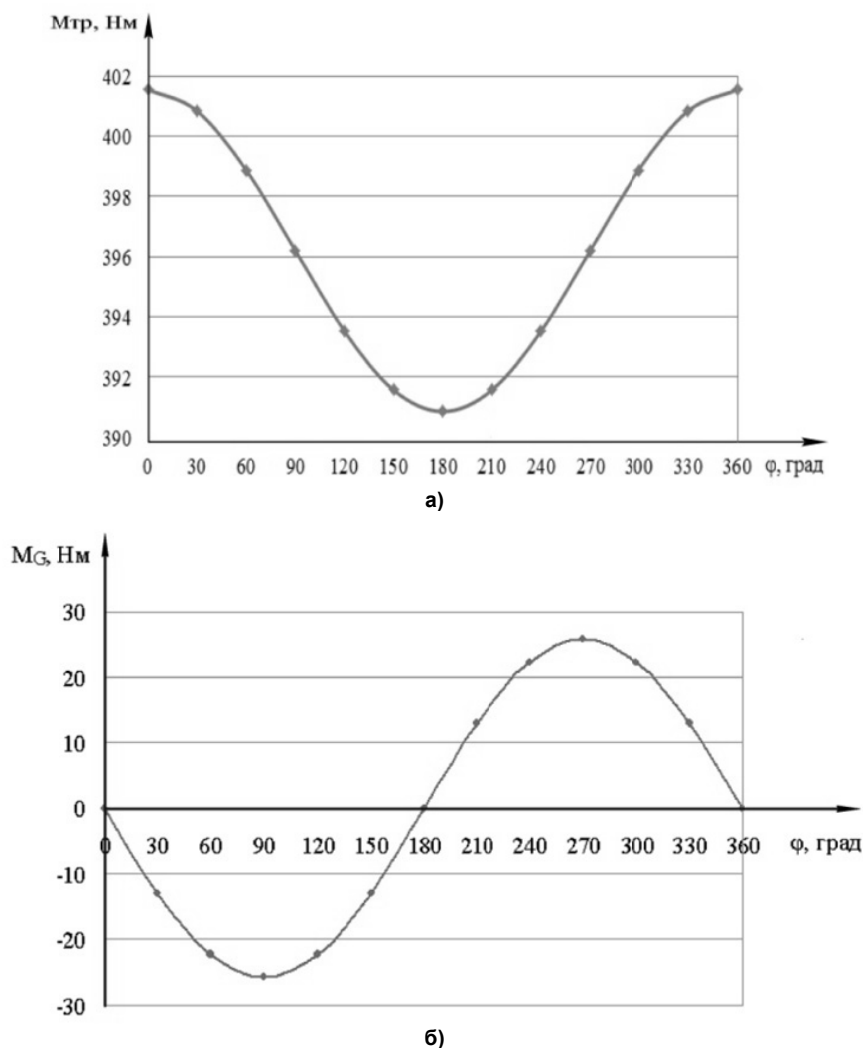


Рис. 9. Графики моментов: а – момент трения  $M_{тр}(\varphi)$ ; б – момент от веса машины  $M_G(\varphi)$

### Заключение

Исследование нагруженности приводов подачи инструмента новой конструкции МРТ, проведенные на основе анализа возможных нагрузок при резании труб различного диаметра и толщины стенки, позволили получить необходимые данные для расчета мощности приводов.

Предложенная конструкция МРТ дает возможность исключить поломку инструмента и элементов машины на приводах подачи, повысить безопасность работы оператора.

Результаты исследования использованы при проектировании опытного образца предложенной конструкции МРТ.

### Литература

1. Правила производства работ при капитальном ремонте магистральных газопроводов: ВСН 51-1-97: утв. РАО «Газпром» 20.02.97: введ. в действие с 01.05.97. – М.: ЭНАС, 1997. – 85 с.

2. Пат. 94497 Российская Федерация, МПК В 23 D21/06. Устройство для резки труб / Б.А. Лопатин, Д.Б. Лопатин, Е.А. Полуэктов, Т.Р. Хазиев. – № 2010104653/22; заявл. 10.02.2010; опубл. 27.05.2010, Бюл. № 15. – 3 с.

3. Грешняев, В.А. Машина для безогневой резки труб «Волжанка – 3М» / В.А. Грешняев // Трубопроводный транспорт нефти. – 2009. – № 8. – С. 18–20.

4. Косилова, А.Г. Справочник технолога машиностроителя: в 2 ч. / А.Г. Косилова, Р.К. Мещеряков. – М.: Машиностроение, 1985. – Ч. 2. – 655 с.

5. Хазиев, Т.Р. Оценка мощности привода перемещения отрезной машины в процессе резания труб большого диаметра / Т.Р. Хазиев, Д.Г. Абузьяров // Наука ЮУрГУ: материалы 63-й науч. конф. Секция техн. наук. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2011. – Т. 2. – С. 322–326.

**Лопатин Борис Александрович.** Доктор технических наук, профессор, почетный работник науки и техники Р.Ф., заведующий кафедрой «Техническая механика», Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте. Область научных интересов – машиноведение и детали машин, технология машиностроения, зубчатые передачи. E-mail: lopatinba@rambler.ru

**Хазиев Тимур Равилович.** Аспирант кафедры «Техническая механика», Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте. Область научных интересов – машиноведение, детали машин и системы приводов. E-mail: 89090692210@mail.ru

---

## INVESTIGATION CAPACITIES OF FEED DRIVES MACHINE COLD CUTTING OF LARGE DIAMETER PIPES

*B.A. Lopatin, T.R. Khaziev*

Capacities of the new construction of pipes cold cutting machine feed are investigated. Capacities of milling machine cutting and movement drives for big diameter pipes cold cutting under loading have been investigated. In the process of the research useful data for calculating drives capacity were obtained. The new structure of the machine eliminates machine tools breakage and improves operator's safety. The results of the investigation are used for projecting an experimental structure of the cold pipe cutting machine.

*Keywords: pipelines, pipe cutting machine, cutting force, power.*

**Boris A. Lopatin.** The doctor of technical sciences, professor, honored worker of Science and Technology in Russia, head of the «Technical mechanics», South Ural State University branch in Zlatoust. The area of scientific interests – machine science, machine components, manufacturing engineering and gears. E-mail: lopatinba@rambler.ru

**Timur R. Khaziev.** Post – graduate student of the «Technical mechanic», South Ural State University branch in Zlatoust. The area of scientific interests – machine science, machine components and system of drives. E-mail: 89090692210@mail.ru

*Поступила в редакцию 29 января 2013 г.*