УДК 622.23.05

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ НОЖЕВОГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ГЕОХОДА ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ ПОРОД МАЛОЙ КРЕПОСТИ

DETERMINATION OF FORCE PARAMETERS OF GEOHOD CUTTING BODY BLADE FOR DESTRUCTION OF STRATA OF LOW HARDNESS

Аксенов Владимир Валерьевич[1,3],
доктор техн. наук, e-mail: 55vva42@mail.ru
Aksenov Vladimir V.[1,3], Dr. Sc.
Садовец Владимир Юрьевич[2,3],
кандидат техн. наук, доцент, e-mail: vsadovec@yandex.ru
Sadovets Vladimir Yu.[2,3],
C. Sc. (Engineering), Associate professor
Пашков Дмитрий Алексеевич[2],
студент, e-mail: haltver@mail.ru
Pashkov Dmitriy A.[2], student

[1] Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, 652065, Кемерово, Россия, просп. Ленинградский, 10
[1] Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the RAS. Russia, Kemerovo, Leningradskiy ave., 10
[2] Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28
[2]T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation
[3] Юргинский технологический институт филиал Томского политехнического университета, 652052, Россия, г. Юрга, ул. Ленинградская, д. 26
[3] Yurga Technological Institute, Branch of Tomsk Polytechnic University, 26 Leningradskay street, Yurga, 652052, Russia

Аннотация. *В статье представлены полученные зависимости для определения сил резания ножевым исполнительным органом геохода для разрушения пород малой крепости. Представлены геометрические и силовые особенности ножевого исполнительного органа геохода. Силовые зависимости получены на основе методики расчета землеройных машин, с учетом особенностей ножевого исполнительного органа геохода. Полученные выражения позволяют определить проекции составляющих сил резания на ось геохода и плоскость перпендикулярную оси геохода, а так же момент сил сопротивления резанию.*

Abstract. *The article presents the obtained dependences for determining cutting forces of geohod cutting body blade for destruction of strata of low hardness. Presented are the geometric features and force parameters of the geohod cutting body blade. Force dependences were obtained based on the methodology of calculation for earth-moving machines taking into consideration the specific features of geohod cutting body blade. These expressions allow us to determine the projection of cutting forces on geohod axis and the plane perpendicular to the axis of geohod, as well as the moment of cutting resistance forces.*

Ключевые слова: *горные машины, геоход, ножевой исполнительный орган, силы резания.*
Keywords: *mining machines, geohod, geohod cutting body blade, the cutting forces.*

Введение. В последние годы в большинстве крупных городов отмечается повышенный интерес к широкому использованию подземного пространства. Это связано с увеличением количества наземного транспорта, дефицитом городской территории и усилием урбанизации. Интенсивное освоение подземного пространства в городах является непременным условием развития современного градостроительства. Это направление предоставляет возможность эффективного использования городской территории, улучшения

состояния внешней среды, сохранения архитектурно-пространственной целостности исторически сложившихся зон города, а также решения комплекса многих других, в том числе социально-экономических задач [1, 2, 3, 4].

В связи с этим встают задачи разработки новых подходов, технологий, и машин, которые позволят уменьшить затраты на образования полости в подземном пространстве, строительства подземных сооружений на небольших глубинах [].

Существующие горнопроходческие системы и технологии проведения горных выработок плохо адаптированы, а в большинстве случаев не способны решать задачи по образованию полости в подземном пространстве на небольших глубинах [5, 6].

Перспективным направлением развития технологий образования полости в подземном пространстве является применение геоходной технологии, базовым элементом которой является – геоход. В настоящее время создан опытный образец геохода с исполнительным органом для разрушения пород средней крепости, принципиальный вид которого представлен на рис. 1 [7, 8, 9].

Сдерживающим фактором применения геоходов для образования полости в подземном пространстве на небольших глубинах, является отсутствие обоснованных технических и конструктивных решений, методик расчета и проектирования исполнительных органов для разрушения пород малой крепости [10].

Поэтому работы, направленные на обоснование конструктивных и силовых параметров исполнительных органов геоходов для разрушения пород малой крепости, являются актуальными.

Особенности исполнительного органа геохода. Своеобразный характер перемещения геохода на забой обуславливает формирование сложной формы поверхности не только самого забоя, но и исполнительного органа (ИО). Поверхность забоя, при разрушении его ИО геохода, имеет вид нескольких геликоидных поверхностей с уступами.

Любая точка ножа расположенная на расстоянии x (рис. 2) от оси вращения геохода, перемещается на забой под углом [2]:

$$\beta_x = arctg\frac{h_B}{2\pi x}. \quad (1)$$

Точки ножа, находящиеся ближе к оси вращения геохода перемещаются на забой под большим углом, чем точки находящиеся на периферии ножа. Таким образом, при винтовом перемещении ножевого ИО геохода на забой точки ножа образуют геликоидную (винтовую) поверхность. Следовательно, участок поверхности забоя в секторе между смежными ножами после их прохода принимает вид винтовой поверхности.

Каждая точка ножа за один оборот геохода должна переместиться на забой выработки на величину равную шагу внешнего движителя геохода $h_{в.д}$. При этом длинна пути для каждой точки в процессе пере-

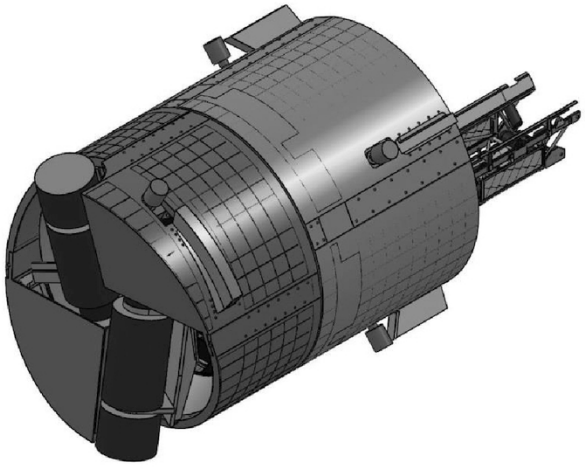

Рис. 1. Принципиальный вид геохода для разрушения пород средней крепости
Fig. 1. Schematic view of geohod for destruction rocks of medium strength

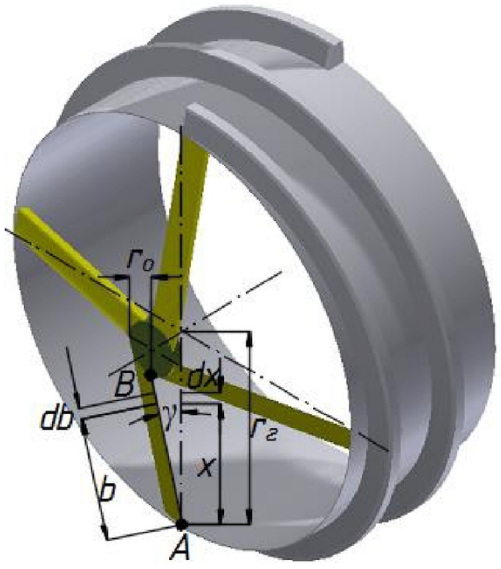

Рис. 2. Схема ножевого исполнительного органа
Fig. 2. Scheme of geohod cutting body blade

мещения будет зависеть от радиуса расположения на ноже ИО геохода. Точки ножа, находящиеся ближе

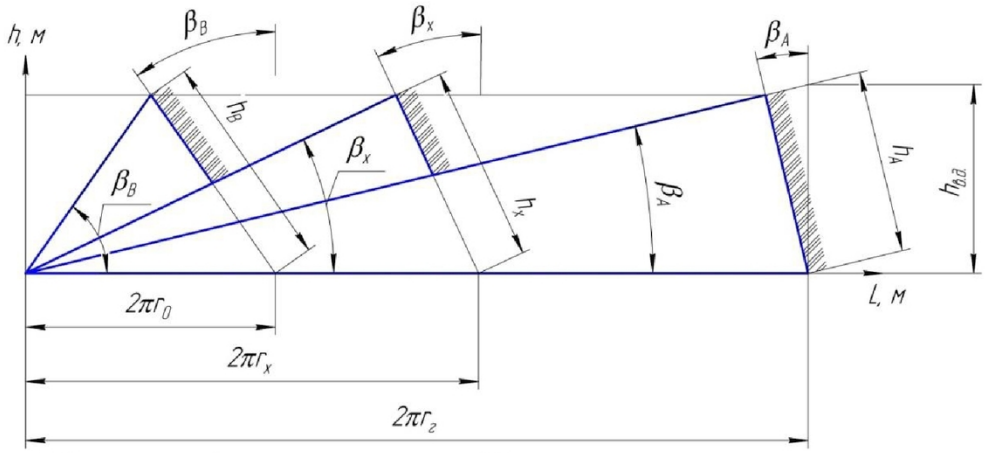

Рис. 3. Направление движения точек ножа ИО, в зависимости от расположения на ноже по радиусу геохода
Fig. 3. The direction of movement of geohod cutting body blade point depending on the location on the blade along the radius of geohod

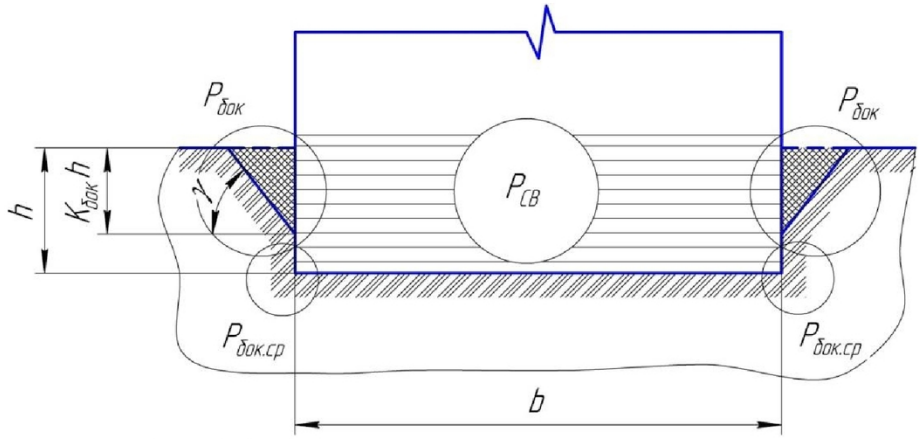

Рис. 4 Зоны действия составляющих силы резания острым ножом
Fig. 4 Zones of action of cutting forces with a sharp blade

к оси вращения геохода перемещаются на забой под большим углом (точка *B* под углом β_B), чем точки находящиеся на периферии ножа (точка *A* под углом β_A) (рис. 3). Величина срезаемого слоя для каждой точки ножа ИО геохода будет зависеть от угла перемещения точки на забой выработки.

Таким образом, высота формируемого уступа *h* зависит от шага винтовой лопасти, количества радиальных ножей и угла перемещения точки ножа ИО геохода на забой выработки [2]:

$$h = \frac{h_B}{n}\cos\beta_x, \tag{2}$$

где n – количество ножей на ИО.

Методика расчета ножевого исполнительного органа геохода.

При резании одним радиальным ножом ИО геохода всю силу блокированного резания можно представить в виде суммы трех сотавляющих сил (рисунок 4) [11, 12, 13]:

Расчетная схема для определения составляющих сил резания представлена на рис. 5.

Вся сила блокированного резания простым острым ножом [12, 13]:

$$P_{ср} = \varphi m_{св} bh + 2m_{бок}h^2 + 2m_{бок.ср}h, \tag{3}$$

где $\varphi\ m_{св}bh$ - силы преодоления лобовых сопротивлений ножу (на рисунке 5 обозначено $P_{св}$), Н;

$2m_{бок}h^2$ - вся сила разрушения грунта в боковых расширениях прорези ($P_{бок}$ на рис.5), Н;

$2m_{бок.ср}h$ - силы бокового среза ($P_{бок.ср}$ на рис. 5), Н;

φ - коэффициент, учитывающий влияние угла резания;

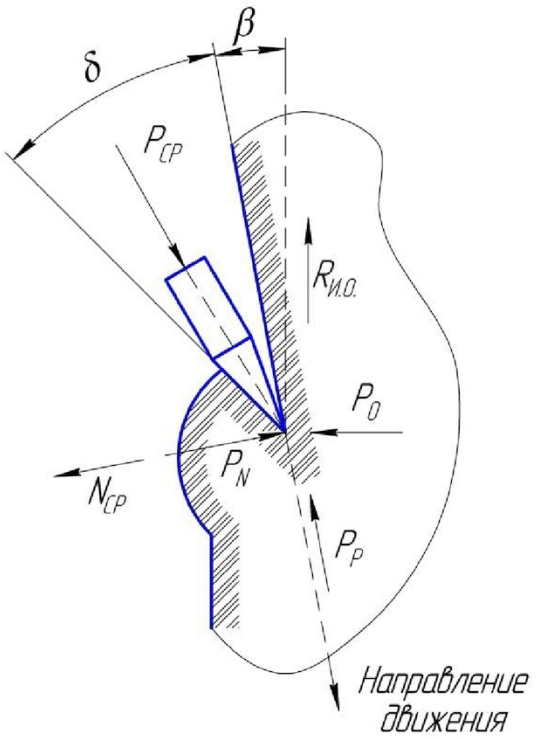

Рис. 5. Расчетная схема к определению полной силы сопротивления грунта резанию ножевым исполнительным органом
Fig. 5. The calculation scheme for determining full forces of ground resistance to cutting by cutting body blade

$m_{св}$ - удельная сила резания для преодоления сопротивлений грунта передней гранью при угле резания 45^0, Па;

b - ширина ножа, м;

h - глубина резания, м;

$m_{бок}$ - коэффициент, характеризующий силу разрушения грунта в боковых частях прорези, Па;

$m_{бок.ср}$ - коэффициент, характеризующий удельную силу среза одним из боковых ребер ножа, Н/м.

Разделим силу блокированного резания на две составляющие, одна из которых зависит от ширины среза (ножа) b, а другая нет. Первую обозначим $P_{св}$, вторую - $P_{бок}$. Тогда на основании (3)

$$P_{св} = \varphi m_{св} hb; \quad (4)$$

$$P_{бок} = 2h\left(m_{бок} h + m_{бок.ср}\right). \quad (5)$$

Составляющая усилия резания, зависящая от ширины среза, для элементарного участка ножа ИО (*db* на рисунке 2) определяется выражением

$$dP_{св} = \varphi m_{св} hdb. \quad (6)$$

Дополнительная сила резания, которую необходимо прикладывать к элементарному участку *db* ножа с площадкой износа или затуплением

$$dP_{пл.изн} = P_{изн} db; \quad (7)$$

$$P_{изн} = p_o + p_{усл}\frac{h}{\left(h + h_{усл}\right)}, \quad (8)$$

где p_o, $p_{усл}$, $h_{усл}$ - параметры, характеризующие сопротивление упругопластическому сжатию. С учетом $db = \frac{dx}{\cos\gamma}$ получим

$$dP_{св} = \frac{\varphi m_{св} h dx}{\cos\gamma} \quad (9)$$

Нормальная сила резания для одного острого ножа определяется по касательной силе резания, углам резания и трения. Для обеих составляющих будем иметь:

$$\begin{aligned} dN_{св} &= ctg\left(\delta + \varphi_{TP}\right)dP_{св} \\ N_{бок} &= ctg\left(\delta + \varphi_{TP}\right)P_{бок} \end{aligned}, \quad (10)$$

где δ - угол резания, град.

Подставив в (10) выражения (5), (9), получим

$$dN_{св} = ctg\left(\delta + \varphi_{TP}\right)\frac{\varphi m_{св} h}{\cos\gamma}dx; \quad (11)$$

$$N_{бок} = 2ctg\left(\delta + \varphi_{TP}\right)h\left(m_{бок} h + m_{бок.ср}\right). \quad (12)$$

При затупленных ножах нормальная составляющая силы резания с учетом выражений (7) и (10).

$$dN^{u}_{св} = ctg\left(\delta + \varphi_{TP}\right)\frac{\varphi m_{св} h}{\cos\gamma}dx - \frac{ctg\left(\delta_1 + \varphi_{TP}\right)}{\cos\gamma}P_{изн}dx. \quad (13)$$

Для второй составляющей нормальная сила резания определиться по формуле (12).

На рис. 5 показаны проекции полной силы сопротивления грунта резанию на ось вращения геохода (P_0) и на плоскость, перпендикулярную оси вращения геохода ($R_{ИО}$).

Проекции составляющей силы сопротивления грунта резанию, зависящей от ширины среза, на ось вращения и плоскость, перпендикулярную оси вращения геохода, а также момент сопротивления резанию от этой составляющей для острых ножей

$$dP_{о.св} = \sin\beta_x dP_{св} - \cos\beta_x dN_{св}; \quad (14)$$

$$dR_{и.о.св} = \cos\beta_x dP_{св} + \sin\beta_x dN_{св}; \quad (15)$$

$$dM_{и.о.св} = x dR_{и.о.св}. \quad (16)$$

Подставив в эти формулы выражения (9) и (11) с учетом (1) и (2) и затем, интегрируя по dx, получим

$$P_{о.св} = \frac{\varphi m_{св} h_B^2}{2\pi n \cos\gamma}\left[\ln\left|\frac{\sin\beta_2}{\sin\beta_1}\right| - ctg\left(\delta+\varphi_{тр}\right)\left(\frac{2\pi\left(r_г - r_ц\right)}{h_в} + \beta_1 - \beta_2\right)\right]; \quad (17)$$

$$R_{и.о.св} = \frac{\varphi m_{св} h_B^2}{2\pi n \cos\gamma}\left[\left(\frac{2\pi\left(r_г - r_ц\right)}{h_в} + \beta_1 - \beta_2\right) + ctg\left(\delta+\varphi_{тр}\right)\ln\left|\frac{\sin\beta_2}{\sin\beta_1}\right|\right]; \quad (18)$$

$$M_{и.о.св} = \frac{\varphi m_{св} h_B^3}{4\pi^2 n \cos\gamma_n}\left[\ln\left|\frac{\sin\beta_1}{\sin\beta_2}\right| + \frac{\left(\sin^2\beta_2 - \sin^2\beta_1\right)}{2\sin^2\beta_2 \cdot \sin^2\beta_1} + ctg\left(\delta+\varphi_{тр}\right)\left(\frac{2\pi\left(r_г - r_ц\right)}{h_в} + \beta_1 - \beta_2\right)\right] \quad (19)$$

Для ножей, имеющих площадку износа или затупления, эти составляющие будут иметь вид

$$dP^{и}_{о.св} = \sin\beta_x dP^{и}_{св} - \cos\beta_x dN^{и}_{св}; \quad (23)$$

$$dR^{и}_{о.св} = \cos\beta_x dP^{и}_{св} + \sin\beta_x dN^{и}_{св}; \quad (24)$$

$$dP^{и}_{св} = dP_{св} + dP_{пл.изн}; \quad (25)$$

$$dM_{и.о.св} = x dR_{и.о.св}. \quad (26)$$

Подставив в эти формулы выражения (13) и (8) с учетом (9) и затем проинтегрировав по dx, получим

$$P^{и}_{о.св} = \frac{\varphi m_{св} h_B^2}{2\pi n \cos\gamma}\left[ln\left|\frac{\sin\beta_2}{\sin\beta_1}\right| - ctg\left(\delta+\varphi_{тр}\right)\left(\frac{2\pi\left(r_г - r_ц\right)}{h_в} + \beta_1 - \beta_2\right)\right] +$$

$$+ \frac{p_0 h_в}{2\pi}\left[ln\left|\frac{tg\frac{\beta_2}{2}}{tg\frac{\beta_1}{2}}\right| + \frac{ctg\left(\delta+\varphi_{ТР}\right)}{\cos\gamma}\left(\frac{\sin\beta_2 - \sin\beta_1}{\sin\beta_1\sin\beta_2}\right)\right] +$$

$$+ \frac{p_{усл} h_в^2}{2\pi}\left[\frac{h_в}{n^2 h_{усл}^2 - h_в^2} ln\left|\frac{tg\frac{\beta_1}{2}}{tg\frac{\beta_2}{2}}\right| + \frac{nh_{усл}}{n^2 h_{усл}^2 - h_в^2} ln\left|\frac{(nh_{усл} + h_в\cos\beta_1)\sin\beta_2}{(nh_{усл} + h_в\cos\beta_2)\sin\beta_1}\right| +\right.$$

$$+ \frac{ctg\left(\delta+\varphi_{ТР}\right)}{\cos\gamma}\left(\frac{ctg\beta_1(h_в\cos\beta_2 + nh_{усл}) - ctg\beta_2(h_в\cos\beta_1 + nh_{усл})}{(h_в\cos\beta_1 + nh_{усл})(h_в\cos\beta_2 + nh_{усл})} +\right.$$

$$\left.\left. + \frac{h_в nh_{усл}\sin\beta_1(h_в\cos\beta_2 + nh_{усл}) - h_в nh_{усл}\sin\beta_2(h_в\cos\beta_1 + nh_{усл})}{(n^2 h_{усл}^2 - h_в^2)(h_в\cos\beta_1 + nh_{усл})(h_в\cos\beta_2 + nh_{усл})} +\right.\right.$$

$$+\frac{2h_в^2}{(n^2h_{усл}^2-h_в^2)^{\frac{3}{2}}}\left(arctg\left(\frac{\sqrt{n^2h_{усл}^2-h_в^2}\,tg\frac{\beta_2}{2}}{nh_{усл}+h_в}\right)-arctg\left(\frac{\sqrt{n^2h_{усл}^2-h_в^2}\,tg\frac{\beta_1}{2}}{nh_{усл}+h_в}\right)\right)+$$

$$+\frac{2}{\sqrt{n^2h_{усл}^2-h_в^2}}\left(arctg\left(\frac{\sqrt{n^2h_{усл}^2-h_в^2}\,tg\frac{\beta_2}{2}}{nh_{усл}+h_в}\right)-arctg\left(\frac{\sqrt{n^2h_{усл}^2-h_в^2}\,tg\frac{\beta_1}{2}}{nh_{усл}+h_в}\right)\right)\Bigg]; \quad (20)$$

$$R_{и.о.св}^{u}=\frac{\varphi m_{св}h_B^2}{2\pi n\cos\gamma}\Bigg[\left(\frac{2\pi\left(r_г-r_ц\right)}{h_в}+\beta_1-\beta_2\right)+ctg\left(\delta+\varphi_{тр}\right)\ln\left|\frac{\sin\beta_2}{\sin\beta_1}\right|\Bigg]$$

$$+\frac{p_0h_в}{2\pi}\left[\left(\frac{\sin\beta_2-\sin\beta_1}{\sin\beta_1\sin\beta_2}\right)-\frac{ctg\left(\delta+\varphi_{TP}\right)}{\cos\gamma}\ln\left|\frac{tg\frac{\beta_2}{2}}{tg\frac{\beta_1}{2}}\right|\right]+$$

$$+\frac{p_{усл}h_в^2}{2\pi}\Bigg[\frac{ctg\beta_1(h_в\cos\beta_2+nh_{усл})-ctg\beta_2(h_в\cos\beta_1+nh_{усл})}{(h_в\cos\beta_1+nh_{усл})(h_в\cos\beta_2+nh_{усл})}+$$

$$+\frac{h_вnh_{усл}\sin\beta_1(h_в\cos\beta_2+nh_{усл})-h_вnh_{усл}\sin\beta_2(h_в\cos\beta_1+nh_{усл})}{(n^2h_{усл}^2-h_в^2)(h_в\cos\beta_1+nh_{усл})(h_в\cos\beta_2+nh_{усл})}+$$

$$+\frac{2h_в^2}{(n^2h_{усл}^2-h_в^2)^{\frac{3}{2}}}\left(arctg\left(\frac{\sqrt{n^2h_{усл}^2-h_в^2}\,tg\frac{\beta_2}{2}}{nh_{усл}+h_в}\right)-arctg\left(\frac{\sqrt{n^2h_{усл}^2-h_в^2}\,tg\frac{\beta_1}{2}}{nh_{усл}+h_в}\right)\right)+$$

$$+\frac{2}{\sqrt{n^2h_{усл}^2-h_в^2}}\left(arctg\left(\frac{\sqrt{n^2h_{усл}^2-h_в^2}\,tg\frac{\beta_2}{2}}{nh_{усл}+h_в}\right)-arctg\left(\frac{\sqrt{n^2h_{усл}^2-h_в^2}\,tg\frac{\beta_1}{2}}{nh_{усл}+h_в}\right)\right)-$$

$$-\frac{ctg\left(\delta+\varphi_{TP}\right)}{\cos\gamma}\left(\frac{h_в}{n^2h_{усл}^2-h_в^2}\ln\left|\frac{tg\frac{\beta_1}{2}}{tg\frac{\beta_2}{2}}\right|+\frac{nh_{усл}}{n^2h_{усл}^2-h_в^2}\ln\frac{(nh_{усл}+h_в\cos\beta_1)\sin\beta_2}{(nh_{усл}+h_в\cos\beta_2)\sin\beta_1}\right)\Bigg] \quad (21)$$

$$M_{и.о.св}^{u}=\frac{\varphi m_{св}h_B^3}{4\pi^2n\cos\gamma_n}\Bigg[ln\left|\frac{sin\,\beta_1}{sin\,\beta_2}\right|+\frac{\left(sin^2\,\beta_2-sin^2\,\beta_1\right)}{2\,sin^2\,\beta_2\cdot sin^2\,\beta_1}+$$

$$+ ctg\left(\delta + \varphi_{тр}\right)\left(\frac{2\pi\left(r_г - r_ц\right)}{h_в} + \beta_1 - \beta_2\right)\Bigg] + \frac{p_0 h_в^2}{4\pi^2}\Bigg[ln\left|\frac{tg\frac{\beta_1}{2}}{tg\frac{\beta_2}{2}}\right| +$$

$$+ \frac{cos\,\beta_1 \sin^2\beta_2 - cos\,\beta_2 \sin^2\beta_1}{2\sin^2\beta_1 \sin^2\beta_2} - \frac{ctg\left(\delta + \varphi_{ТР}\right)}{cos\,\gamma}\left(\frac{\sin\beta_2 - \sin\beta_1}{\sin\beta_2 \sin\beta_1}\right)\Bigg] +$$

$$+ \frac{p_{усл} h_в^3}{4\pi^2}\Bigg[\frac{1}{8}\left(\frac{8n^3 h_{усл}^3}{(n^2 h_{усл}^2 - h_в^2)^2} ln\left|\frac{nh_{усл} + h_в\,cos\,\beta_2}{nh_{усл} + h_в\,cos\,\beta_1}\right| +\right.$$

$$+ \frac{\sin^2\frac{\beta_2}{2} - \sin^2\frac{\beta_1}{2}}{(nh_{усл} + h_в)\sin^2\frac{\beta_1}{2}\sin^2\frac{\beta_2}{2}} + \frac{\cos^2\frac{\beta_1}{2} - \cos^2\frac{\beta_2}{2}}{(nh_{усл} - h_в)\cos^2\frac{\beta_1}{2}\cos^2\frac{\beta_2}{2}} +$$

$$\left. + \frac{4(nh_{усл} + 2h_в)}{(nh_{усл} + h_в)^2} ln\left|\frac{\sin\frac{\beta_1}{2}}{\sin\frac{\beta_2}{2}}\right| + \frac{4(nh_{усл} - 2h_в)}{(nh_{усл} - h_в)^2} ln\left|\frac{\cos\frac{\beta_2}{2}}{\cos\frac{\beta_1}{2}}\right|\right) -$$

$$- \frac{ctg\left(\delta + \varphi_{ТР}\right)}{cos\,\gamma}\left(\frac{ctg\beta_1(h_в\,cos\,\beta_2 + nh_{усл}) - ctg\beta_2(h_в\,cos\,\beta_1 + nh_{усл})}{(h_в\,cos\,\beta_1 + nh_{усл})(h_в\,cos\,\beta_2 + nh_{усл})} +\right.$$

$$\left. + \frac{h_в nh_{усл}\sin\beta_1(h_в\,cos\,\beta_2 + nh_{усл}) - h_в nh_{усл}\sin\beta_2(h_в\,cos\,\beta_1 + nh_{усл})}{(n^2 h_{усл}^2 - h_в^2)(h_в\,cos\,\beta_1 + nh_{усл})(h_в\,cos\,\beta_2 + nh_{усл})}\right) +$$

$$+ \frac{2h_в^2}{(n^2 h_{усл}^2 - h_в^2)^{\frac{3}{2}}}\left(arctg\left(\frac{\sqrt{n^2 h_{усл}^2 - h_в^2}\,tg\frac{\beta_2}{2}}{nh_{усл} + h_в}\right) - arctg\left(\frac{\sqrt{n^2 h_{усл}^2 - h_в^2}\,tg\frac{\beta_1}{2}}{nh_{усл} + h_в}\right)\right) +$$

$$\left. + \frac{2}{\sqrt{n^2 h_{усл}^2 - h_в^2}}\left(arctg\left(\frac{\sqrt{n^2 h_{усл}^2 - h_в^2}\,tg\frac{\beta_2}{2}}{nh_{усл} + h_в}\right) - arctg\left(\frac{\sqrt{n^2 h_{усл}^2 - h_в^2}\,tg\frac{\beta_1}{2}}{nh_{усл} + h_в}\right)\right)\right)\Bigg]. \quad (22)$$

Проекции составляющей силы сопротивления грунта резанию, независящей от ширины среза, на ось вращения геохода и плоскость, перпендикулярную оси вращения, а также момент сопротивления резанию от этой составляющей

$$P_{о.бок} = \left(\sin\beta_1 + \sin\beta_2\right)\frac{P_{бок}}{2} - \left(\cos\beta_1 + \cos\beta_2\right)\frac{N_{бок}}{2}; \quad (23)$$

$$R_{и.о.бок} = \left(\cos\beta_1 + \cos\beta_2\right)\frac{P_{бок}}{2} + \left(\sin\beta_1 + \sin\beta_2\right)\frac{N_{бок}}{2}; \quad (24)$$

$$M_{и.о.бок} = \left(r_г\cos\beta_1 + r_o\cos\beta_2\right)\frac{P_{бок}}{2} + \left(r_г\sin\beta_1 + r_o\sin\beta_2\right)\frac{N_{бок}}{2}. \quad (25)$$

Подставив в полученные формулы выражения (5) и (12) и после некоторых преобразований получим

$$P_{о.бок} = \frac{h_B}{n}\left(m_{бок}\frac{h_B}{n}\cos\beta_1 + m_{бок.ср}\right)\left[\frac{\sin 2\beta_1}{2} - ctg(\delta+\varphi_{тр})\cos^2\beta_1\right] +$$
$$+\frac{h_B}{n}\left(m_{бок}\frac{h_B}{n}\cos\beta_2 + m_{бок.ср}\right)\left[\frac{\sin 2\beta_2}{2} - ctg(\delta+\varphi_{тр})\cos^2\beta_2\right]; \quad (26)$$

$$R_{и.о.бок} = \frac{h_B}{n}\left(m_{бок}\frac{h_B}{n}\cos\beta_1 + m_{бок.ср}\right)\left[\cos^2\beta_1 + ctg(\delta+\varphi_{тр})\frac{\sin 2\beta_1}{2}\right] +$$
$$+\frac{h_B}{n}\left(m_{бок}\frac{h_B}{n}\cos\beta_2 + m_{бок.ср}\right)\left[\cos^2\beta_2 + ctg(\delta+\varphi_{тр})\frac{\sin 2\beta_2}{2}\right]; \quad (27)$$

$$M_{и.о.бок} = \frac{h_B r_г}{n}\left(m_{бок}\frac{h_B}{n}\cos\beta_1 + m_{бок.ср}\right)\left[\cos^2\beta_1 + ctg(\delta+\varphi_{тр})\frac{\sin 2\beta_1}{2}\right] +$$
$$+\frac{h_B r_ц}{n}\left(m_{бок}\frac{h_B}{n}\cos\beta_2 + m_{бок.ср}\right)\left[\cos^2\beta_2 + ctg(\delta+\varphi_{тр})\frac{\sin 2\beta_2}{2}\right]; \quad (28)$$

Для ножевого ИО геохода полная проекция силы сопротивления грунта резанию на ось вращения геохода и плоскость, перпендикулярную оси вращения, а также полный момент сопротивления резанию, соответственно, равны

$$P_{о} = n\left(P_{о.св} + P_{бок}\right); \quad (29)$$

$$R_{и.о} = n\left(R_{и.о.св} + R_{и.о.бок}\right); \quad (30)$$

$$M_{и.о} = n\left(M_{и.о.св} + M_{и.о.бок}\right). \quad (31)$$

Выводы. Полученные выражения позволяют определить проекции составляющих сил резания на ось геохода и плоскость перпендикулярную оси геохода, а так же момент сил сопротивления резанию. Полученные зависимости учитывают особенности исполнительного органа и позволяет вести дальнейшую разработку ножевого исполнительного органа геохода. Эти зависимости отличаются от формул представленных в работах В.В. Аксенова и В.Ю. Садовца [14, 15].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов В.В., Ефременков А.Б., Бегляков В.Ю., Бурков П.В., Блащук М.Ю., Сапожкова А.В. Компоновочные решения машин проведения горных выработок на основе геовинчестерной технологии // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). -2009. - №. 1. С. 251-259.

2. Садовец В.Ю., Аксенов В.В. Ножевые исполнительные органы геоходов: монография / В.Ю. Садовец, В.В. Аксенов // Издательство: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG Heinrich-Böcking-Str. 6-8, 66121 Saarbrücken, Germany. 2011. -141 с.

3. Аксенов В.В., Садовец В.Ю., Резанова Е.В. Синтез технических решений нового класса горнопроходческой техники // Известия вузов. Горный журнал / Екатеринбург, 2009-№ 8. С. 56-63.

4. Аксенов В.В., Садовец В.Ю., Буялич Г.Д., Бегляков В.Ю. Влияние уступа на НДС призабойной части горной выработки // Горный информационный аналитический бюллетень. Горное машиностроение/Москва, МГГУ, 2011 -ОВ № 2. С. 55-67.

5. Физико-механические свойства горных пород малой крепости / В.Ю. Садовец, В.Ю. Бегляков, Д.А. Пашков // В сборнике: Перспективы инновационного развития угольных регионов России / Сборник трудов V Международной научно-практической конференции. Ответственные редакторы Пудов Е. Ю., Клаус О. А.. - 2016. - С. 102-107.

6. Аксенов В.В. Обоснование необходимости создания исполнительного органа геохода для разрушения пород малой крепости / В.В. Аксенов, В.Ю. Садовец, Л.А. Пашков // Вестник КузГТУ. - 2016. - №6. - С. 8-14.;

7. Аксенов В.В., Садовец В.Ю. Синтез технических решений ножевого исполнительного органа геохода // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2006. № 6. С. 33-37.

8. Влияние параметров образующей геликоида на форму ножевого исполнительного органа геохода / В.Ю. Садовец, Д.А. Пашков // В сборнике материалов XVI Международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2016» 23-24 ноября 2016 г./Кемерово, 2016 г. С 51.

9. Садовец В.Ю., Пашков Д.А. Последовательность операций возведения крепи в условиях геовинчестерной технологии//В сборнике: Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2014 Материалы XV международной научно-практической конференции. В.П. Тациенко (отв. редактор), В.А. Колмаков (зам. отв. редактора). 2014. С. 63.

10. Аксенов В.В. Создание нового инструментария для формирования подземного пространства/Хорешок А.А., Ефременков А.Б., Казанцев А.А., Бегляков В.Ю., Вальтер А.В.//Горная техника. 2015. № 1 (15). С. 24-26.

11. Зеленин А.М., Баловнев В.И., Керов И.П. Машины для земляных работ // Учебное пособие для вузов – М.: «Машиностроение», 1975. 424 с.

12. Ветров Ю.А. Расчет сил резания и копания грунтов. – Киев: Изд-во Киев. Ун-та, 1985. 251 с.

13. Ветров Ю.А., Баладинский В.Л. Машины для специальных земляных работ. – Киев: Изд-во Киев. ун-та, 1980. 308 с.

14. Формирование структурного портрета геохода / В.В. Аксенов , А.Б. Ефременков, В.Ю. Садовец , Е.В. Резанова // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2010. № 01. С. 35-41

15. Создание инновационного инструментария для формирования подземного пространства / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, В.Ю. Садовец, Е.В. Резанова // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2010. № 1. С. 42-47.

REFERENCES

1. Aksenov V.V., Efremenkov A.B., Beglyakov V.Yu., Burkov P.V., Blashchuk M.Yu., Sapozhkova A.V. Komponovochnye resheniya mashin provedeniya gornykh vyrabotok na osnove geovinchesternoy tekhnologii [The layout solutions of mining machines based on technology geovinchesternoy] Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal) [Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)]. -2009. No. 1. P. 251-259.

2. Sadovets V.Yu., Aksenov V.V. Nozhevye ispolnitel'nye organy geokhodov: monografiya [Cutlery executive bodies geohodov] Izdatel'stvo: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG Heinrich-Böcking-Str. 6-8, 66121 Saarbrücken, Germany. 2011. P. 141.

3. Aksenov V.V., Sadovets V.Yu., Rezanova E.V. Sintez tekhnicheskikh resheniy novogo klassa gornoprokhodcheskoy tekhniki [The synthesis of a new class of technical solutions mining heading equipment] Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal, Ekaterinburg [Proceedings of the universities. Mining Journal, Ekaterinburg], 2009. No. 8. P. 56-63.

4. Aksenov V.V., Sadovets V.Yu., Buyalich G.D., Beglyakov V.Yu. Vliyanie ustupa na NDS prizaboynoy chasti gornoy vyrabotki [Impact of VAT on the ledge of the bottom-hole excavation] Gornyy informa-tsionnyy analiticheskiy byulleten. Gornoe mashinostroenie. Moskva, MGGU [Mining information and analytical bulletin. Mining Engineering. Moscow State Mining University], 2011 OV. No. 2. P. 55-67.

5. Fiziko-mekhanicheskie svoystva gornykh porod maloy kreposti [Physical and mechanical properties of rocks small fortress] V.Yu. Sadovets, V.Yu. Beglyakov, D.A. Pashkov V sbornike: Perspektivy innovatsionnogo razvitiya ugol'nykh regionov Rossii / Sbornik trudov V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Otvetstvennye redaktory Pudov E. Yu., Klaus O. A. [In: Perspectives of innovative development of the coal regions of Russia / Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference. Responsible editors Pudov EY, Klaus O. A.]. 2016. P. 142-147.

6. Aksenov V.V., Sadovets V.Yu., Pashkov D.A., .Obosnovanie neobkhodimosti sozdaniya ispolnitel'nogo organa geokhoda dlya razrusheniya porod maloy kreposti [Rationale for the establishment of the executive body geohoda to break the rock small fortress], // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. [Bulletin of the Kuzbass State Technical University]. 2016. No. 06. P. 8-14.;

7. Aksenov V.V., Sadovets V.Yu. Sintez tekhnicheskikh resheniy nozhevogo ispolnitel'nogo organa geokhoda [The synthesis of technical solutions blade executive geohoda] Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Kuzbass State Technical University]. 2006. No. 6. P. 33-37.

8. Sadovets V.Yu., Pashkov D.A. Vliyanie parametrov obrazuyushchey gelikoida na formu nozhevogo ispolnitel'-nogo organa geokhoda [Influence of parameters of the helix forming the shape of the blade of the executive body geohoda] V sbornik materialov XVI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Prirodnye i intellektual'nye resursy Sibiri. Sibresurs 2016» [International scientific-practical conference "Natural and intellectual resources of Siberia. Sibresurs 2016"] 23-24 noyabrya 2016. P. 51.

9. Sadovets V.Yu., Pashkov D.A. Posledovatel'nost' operatsiy vozvedeniya krepi v uslo-viyakh geovichesternoy tekhnologii [The sequence of operations in the conditions of the construction of the lining geoviche Stern-technology] V sbornike: Prirodnye i intellektual'nye resursy Sibiri. Sibresurs 2014 Materialy XV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. V.P. Tatsienko (otv. redaktor), V.A. Kolmakov (zam. otv. redaktora) [In:

Natural and intelligence-cial resources of Siberia. Materials Sibresurs 2014 XV International Scientific and Practical Conference. VP Tatsienko (Resp. Editor), VA Kolmakov (deputy. Holes. Editorial-torus)]. 2014. P. 63.

10. Aksenov V.V. Khoreshok A.A., Efremenkov A.B., Kazantsev A.A., Beglyakov V.Yu., Val'ter A.V. Sozdanie novogo instrumentariya dlya formirovaniya podzemnogo prostranstva [Creating a new tool for the formation of an underground pro-space] Gornaya tekhnika [Mining Machinery]. 2015. No. 1 (15). P. 24-26.

11. Zelenin A.M., Balovnev V.I., Kerov I.P. Mashiny dlya zemlyanykh rabot [Earth moving] Uchebnoe posobie dlya vuzov [Textbook for high schools] M.: «Mashinostroenie», 1975. 424 s.

12. Vetrov Yu.A. Raschet sil rezaniya i kopaniya gruntov [Calculation of cutting forces and the digging of soil]. Kiev: Izd-vo Kiev. Un-ta, 1985. 251 s.

13. Vetrov Yu.A., Baladinskiy V.L. Mashiny dlya spetsial'nykh zemlyanykh rabot. [Machines for special earthworks] Kiev: Izd-vo Kiev. un-ta, 1980. 308 s.

14. Aksenov V.V., Efremenkov A.B., Sadovets V.Yu., Rezanova E.V. Formirovanie strukturnogo portreta geokhoda [Formation of the structural portrait geohoda] Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Kuzbass State Technical University]. 2010. No. 01. P. 35-41.

15. Aksenov V.V., Efremenkov A.B., Sadovets V.Yu., Rezanova E.V. Sozdanie innovatsionnogo instrumentariya dlya formirovaniya podzemnogo prostranstva [Development of innovative tools for the formation of underground space] Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Kuzbass State Technical University]. 2010. No. 01. P. 42-47.

Поступило в редакцию 28.03.2017
Received 28 March 2017