

## ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ГЕОХОДА НА ЕГО СИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Д.А. Пашков

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, Кемерово, Россия  
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,  
Кемерово, Россия, e-mail: pashkov.d.a@inbox.ru

**Аннотация:** Обоснована актуальность развития геолоходной технологии, особое внимание уделено силовым параметрам ножевых исполнительных органов геолохода. Представлены отличительные особенности работы исполнительных органов проходческих подземных аппаратов класса «Геолоход». Приведена математическая модель взаимодействия ножевого исполнительного органа (ИО) геолохода с породой забоя. В соответствии с ней проведено исследование влияния геометрических параметров конструктивных решений ножевых ИО геолохода на проекции полной силы сопротивления породы резанию на ось вращения геолохода (РО), а также проекции на плоскость, перпендикулярную оси вращения геолохода (РИО) и момент сопротивления резанию (МИО) для острых ножей. В результате исследования было выявлено, что увеличение радиуса геолохода увеличивает значения силовых параметров взаимодействия ножевого ИО геолохода с породой забоя; проекции полной силы сопротивления резанию на ось вращения геолохода и на плоскость, перпендикулярную оси вращения геолохода, а также момент сопротивления резанию, уменьшаются с увеличением радиуса образующей; увеличение шага внешнего двигателя приводит к увеличению значений проекций полной силы сопротивления резанию на ось вращения геолохода и на плоскость, перпендикулярную оси вращения геолохода, а также момента сопротивления резанию для острых ножей; увеличение количества лучей, установленных на ИО геолохода, в диапазоне от 2 до 8 шт. уменьшают силы резания до 8% при  $\beta = 3^\circ$ ; при  $\beta = 6^\circ$  — до 16% и при  $\beta = 9^\circ$  — до 20%. Дальнейшее увеличение числа лучей не влияет на силовые параметры взаимодействия ножевого ИО геолохода с породой забоя при принятых параметрах геолохода.

**Ключевые слова:** подземные сооружения, горные машины, геолоход, геолоходная технология, особенности работы, математическая модель, исполнительный орган, нож.

**Для цитирования:** Пашков Д. А. Влияние геометрических параметров исполнительного органа геолохода на его силовые параметры // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6. – С. 109–120. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_6\_0\_109.

### Influence of effector geometry on performance of all-purpose mobile subterrene

D.A. Pashkov

Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch  
of Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russia,

T. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia e-mail: pashkov.d.a@inbox.ru

---

**Abstract:** The article proves the currentness of advancement in subterrain heading engineering with focusing on power capacities of cutting effectors of a geo-rover — an all-purpose mobile subterrene (Russian term is ‘geokhod’). The distinctive features of effectors of the all-purposed underground heading machines of the Geokhod class are described. The mathematical model of the rock mass–geo-rover cutting effector interaction is presented. The model is used to analyze the influence exerted by the cutting effector geometrics of a geo-rover on the projection of the overall cutting resistance of rock on the geo-rover roll axis (PO) as well as on the projection on the plane perpendicular to the geo-rover roll axis (RIO), and on the cutting resistance moment for sharp cutters (MIO). The studies show that when the radius of the geo-rover is increased: the force of the rock–cutting effector interaction is enhanced. The projections of the overall cutting resistance of rock on the geo-rover roll axis and on the plane perpendicular to the geo-rover roll axis as well as the cutting resistance moment are decreased at the increased radius of the generatrix. Furthermore, the increased pitch of the outboard mover results in the increased values of the projections of the overall cutting resistance of rock on the geo-rover roll axis and on the plane perpendicular to the geo-rover roll axis, as well as in the higher cutting resistance moment for sharp cutters. The increase in the number of cutting arms of the geo-rover effector from 2 to 8 decreases the cutting forces by 8, 16 and 20% at  $\beta = 3^\circ$ ,  $\beta = 6^\circ$  and at  $\beta = 9^\circ$ , respectively. The further increase in the number of cutting arms has no influence on the power capacity of the geo-rover effector in its interaction with rock mass at the assumed parameters of a geo-medium.

**Key words:** underground structures, mining machine, geo-rover, all-purpose mobile subterrene, subterrain heading technology, operating features, mathematical model, effector, cutter.

**For citation:** Pashkov D. A. Influence of effector geometry on performance of all-purpose mobile subterrene. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(6):109-120. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_6\_0\_109.

---

## Введение

Численность населения планеты Земля с каждым годом увеличивается на 1% [1–5] и, как следствие, интенсивно осваиваются новые территории, а также ведутся поиски новых мест для ведения хозяйственной деятельности человека, к которым относится подземное пространство. Освоение подземного пространства связано со строительством подземных сооружений.

В результате ряда исследований, направленных на увеличение производительности, сформирован новый подход к строительству подземных сооружений — геоходная технология, базовым элементом которой является новый класс

горнопроходческой техники — геоход [6–9].

При проходке подземных сооружений геоходом, в отличие от проходки щитами, полностью совмещены во времени разработка забоя и крепление выработки, что значительно повышает скорость строительства подземных сооружений [6–9]. Для увеличения напорных усилий при щитовой и комбайновой проходке необходимо наращивать вес горной машины, в геоходной технологии вес машины не влияет на напорные усилия [6–12].

При строительстве подземных сооружений в технологическом цикле одним из основных является процесс отделе-

ния горных пород от массива. Данный процесс осуществляется ИО проходческого агрегата [10–12].

При разработке и проектировании исполнительного органа учитываются силовые параметры, воздействующие на него. Вследствие этого работа, направленная на обоснование силовых параметров ножевых исполнительных органов геолода, является актуальной.

### Особенности работы ИО геолода

Работа ИО геолода отличается рядом особенностей [13–15]:

- Не имеет аналогов среди существующих ГПС.
- Размещение рабочих механизмов в условиях ограниченного пространства на вращающейся несущей конструкции.
- Необходимость приема энергоносителей от энергосиловой установки, расположенной на не вращающейся стабилизирующей секции.
- Необходимость разрушения забоя на полное сечение проводимой выработки и на значительное расстояние за один оборот секции.
- Сложный характер перемещения разрушающих инструментов на забой.
- Необходимость формирования и разрушения уступа;
- Необходимость обеспечения соответствия параметрам внешнего движителя и жесткой кинематической связи с ним.
- Размещение и одновременная согласованная работа большого числа разрушающих инструментов (ножей, шнеков, барабанов, баров и т.п.).

Математическая модель взаимодействия ножевого ИО геолода с породой забоя. Для ножевого ИО геолода полная проекция силы сопротивления резанию на ось вращения геолода ( $P_o$ ) и плоскость, перпендикулярную оси вращения ( $R_{и.о}$ ), а также полный момент сопротивления резанию ( $M_{и.о}$ ), соответственно, равны [16–18]:

$$P_o = n (P_{о.св} + P_{бок}); \quad (1)$$

$$R_{и.о} = n (R_{и.о.св} + R_{и.о.бок}); \quad (2)$$

$$M_{и.о} = n (M_{и.о.св} + M_{и.о.бок}), \quad (3)$$

где  $n$  – количество лучей на ИО геолода;  $P_{о.св}$  – проекция составляющей силы сопротивления резанию, зависящая от ширины среза, на ось вращения геолода;  $P_{бок}$  – проекция составляющей силы сопротивления резанию, независящая от ширины среза, на ось вращения геолода;  $R_{и.о.св}$  – проекция составляющей силы сопротивления резанию, зависящая от ширины среза, на плоскость, перпендикулярную оси вращения;  $R_{и.о.бок}$  – проекция составляющей силы сопротивления грунта резанию, независящая от ширины среза, на плоскость, перпендикулярную оси вращения;  $M_{и.о.св}$  – момент сопротивления резанию, зависящий от ширины среза;  $M_{и.о.бок}$  – момент сопротивления резанию, независящий от ширины среза.

Проекции составляющей силы сопротивления резанию на ось вращения геолода и плоскость, перпендикулярную оси вращения, независящие от ширины среза, а также момент сопротивления резанию от этой составляющей будут определяться выражениями [16–18]:

$$P_{о.бок} = \frac{h_a}{n} \sum_{i=1}^2 \left( m_{бок} \frac{h_a}{n} \cos \beta_i + m_{бок.ср} \right) \left( \frac{\sin 2\beta_i}{2} - ctg(\delta + \varphi_{mp}) \cos^2 \beta_i \right); \quad (4)$$

$$R_{\text{и.о.бок}} = \frac{h_{\text{в}}}{n} \sum_{i=2}^2 \left( m_{\text{бок}} \frac{h_{\text{в}}}{n} \cos \beta_i + m_{\text{бок.ср}} \right) \left( \cos^2 \beta_i + \text{ctg}(\delta + \varphi_{\text{мп}}) \frac{\sin 2\beta_i}{2} \right); \quad (5)$$

$$M_{\text{и.о.бок}} = \frac{h_{\text{в}} r_{\text{г}}}{n} \left( m_{\text{бок}} \frac{h_{\text{в}}}{n} \cos \beta_1 + m_{\text{бок.ср}} \right) \left( \cos^2 \beta_1 + \text{ctg}(\delta + \varphi_{\text{мп}}) \frac{\sin 2\beta_1}{2} \right) + \frac{h_{\text{в}} r_{\text{о}}}{n} \left( m_{\text{бок}} \frac{h_{\text{в}}}{n} \cos \beta_2 + m_{\text{бок.ср}} \right) \left( \cos^2 \beta_2 + \text{ctg}(\delta + \varphi_{\text{мп}}) \frac{\sin 2\beta_2}{2} \right). \quad (6)$$

где  $h_{\text{в}}$  – шаг внешнего движителя;  $m_{\text{бок}}$  – коэффициент, характеризующий силу разрушения грунта в боковых частях прорези;  $\beta_i$  – угол перемещения  $i$ -точки ножа ИО геохода;  $\beta_1$  – угол перемещения точки ножа ИО геохода, расположенной на расстоянии  $r_{\text{г}}$ ;  $m_{\text{бок.ср}}$  – коэффициент, характеризующий удельную силу среза одним из боковых ребер ножа;  $\delta$  – угол резания;  $\varphi_{\text{тр}}$  – угол трения грунта о нож;  $\beta_2$  – угол перемещения точки ножа ИО геохода, расположенной на расстоянии  $r_{\text{о}}$ ;  $r_{\text{г}}$  – радиус головной секции геохода;  $r_{\text{о}}$  – радиус образующей.

Проекции составляющей силы сопротивления резанию на ось вращения геохода и плоскость, перпендикулярную оси вращения, зависящие от ширины среза, а также момент сопротивления резанию от этой составляющей будут определяться по выражениям [16 – 18]:

$$P_{\text{о.св}} = \varphi m_{\text{св}} \frac{h_{\text{в}}}{n} \left( \frac{h_{\text{в}}}{2\pi} \ln \left( \frac{\sin \beta_2}{\sin \beta_1} \right) - \text{ctg}(\delta + \varphi_{\text{мп}}) \left( r_{\text{г}} - r_{\text{о}} + \frac{h_{\text{в}}}{2\pi} (\beta_1 - \beta_2) \right) \right); \quad (7)$$

$$R_{\text{и.о.св}} = \varphi m_{\text{св}} \frac{h_{\text{в}}}{n} \left( \left( r_{\text{г}} - r_{\text{о}} + \frac{h_{\text{в}}}{2\pi} (\beta_1 - \beta_2) \right) + \text{ctg}(\delta + \varphi_{\text{мп}}) \frac{h_{\text{в}}}{2\pi} \ln \left( \frac{\sin \beta_2}{\sin \beta_1} \right) \right); \quad (8)$$

$$M_{\text{и.о.св}} = \varphi m_{\text{св}} \frac{h_{\text{в}}^2}{2\pi n} \left( \frac{h_{\text{в}}}{2\pi} \left( \frac{\sin^2 \beta_2 - \sin^2 \beta_1}{2 \sin^2 \beta_1 \sin^2 \beta_2} + \ln \left( \frac{\sin \beta_1}{\sin \beta_2} \right) \right) + \text{ctg}(\delta + \varphi_{\text{мп}}) \left( (r_{\text{г}} - r_{\text{о}}) + \frac{h_{\text{в}}}{2\pi} (\beta_1 - \beta_2) \right) \right). \quad (9)$$

где  $\varphi$  – коэффициент, учитывающий влияние угла резания;  $m_{\text{св}}$  – удельная сила резания для преодоления сопротивлений грунта передней гранью при угле резания  $45^\circ$ .

### Исходные данные для исследования влияния геометрических параметров ножевых ИО геохода на силовые параметры

Ножевые ИО применяются для резания пород с коэффициентом крепости до  $f = 1$  по шкале профессора М.М. Протоdjаконова. Для исследования зависимостей силовых параметров взаимодействия ножевого ИО геохода с породой забоя от геометрических параметров конструктивных решений выбран слабый песчаник.

Для слабого песчаника В.Ю. Ветровым определены величины удельной силы резания и коэффициентов условия работы острыми ножами [19]. Значения этих параметров представлены в таблице.

К геометрическим параметрам конструктивных решений ИО геохода относятся радиус геохода  $r_{\text{г}}$ , радиус образующей  $r_{\text{о}}$ , шаг внешнего движителя  $h_{\text{в}}$ , количество лучей на ИО геохода  $n$  [20].

**Величины удельной силы резания и ее коэффициентов  
для условий работы острыми ножами  
Specific cutting force and its coefficients in operation of sharp cutters**

Наименование	Обозначение	Единица измерения	Значение
Коэффициент, учитывающий влияние угла резания	$\varphi$		0,59
Удельная сила резания в лобовой части прорези при угле резания $45^\circ$	$m_{св}$	Н/м <sup>2</sup>	97 000
Сила разрушения в боковых частях прорези	$m_{бок}$	Н/м <sup>2</sup>	36 000
Удельная сила среза одним из боковых ребер ножа	$m_{бок.ср}$	Н/м	8490
Угол резания	$\delta$	град	25
Угол трения	$\varphi_{тр}$	град	31,4
Коэффициент глубины расширяющей части прорези	$k_{бок}$		0,9
Угол наклона расширяющей части прорези к горизонту	$\gamma_{пр}$	град	30

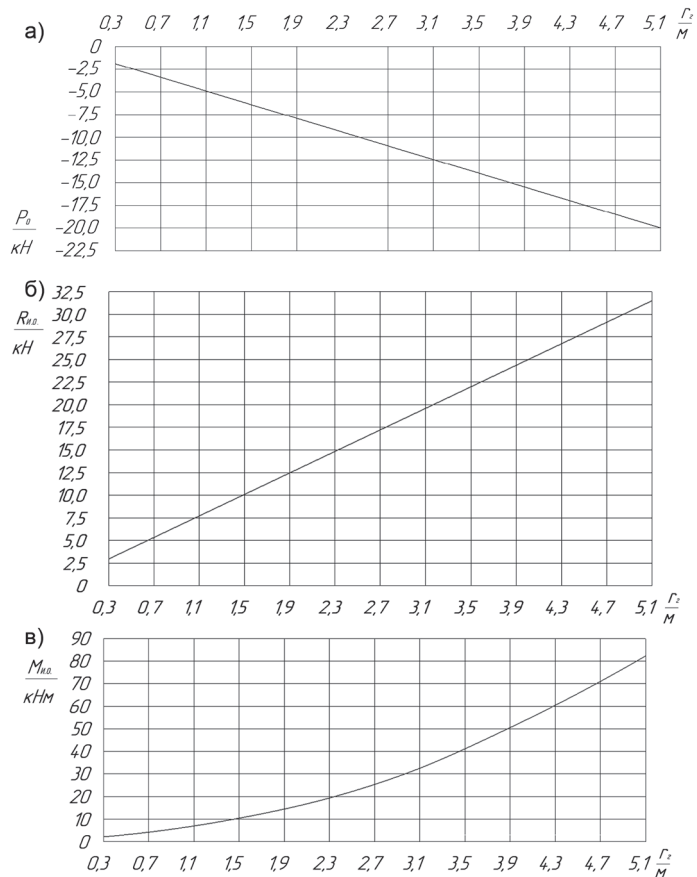


Рис. 1. Зависимость сил сопротивления резанию  $P_o$  (а),  $R_{ио}$  (б) и момента сопротивления  $M_{ио}$  (в) от радиуса геохода

Fig. 1. Cutting resistance force  $P_o$  (a),  $R_{ио}$  (b) and cutting resistance moment  $M_{ио}$  (v) versus geo-rover radius

Повыражениям(1) – (9)определяют-ся зависимости проекции полной силы сопротивления породы резанию на ось вращения геогода ( $P_0$ ), а также проекции на плоскость, перпендикулярную оси вращения геогода ( $R_{и0}$ ) и момент сопротивления резанию ( $M_{и0}$ ) для острых ножей от геометрических параметров конструктивных решений ИО геогода.

### Результаты исследования влияния геометрических параметров ножевых ИО геогода на усилия резания

На рис. 1 представлены результаты исследований влияния радиуса геогода на силовые показатели его работы.

Отрицательные значения проекции силы сопротивления резанию на ось вращения геогода  $P_0$  (см. рис. 1, а) показывают, что усилия направлены в массив горных пород. Из графика видно, что проекция силы резания на ось вращения геогода  $P_0$  с увеличением радиуса геогода по абсолютной величине увеличивается линейно. Следует отметить, что увеличение радиуса геогода приводит к увеличению втягивания геогода

в массив горных пород. Это негативно сказывается на работе машины и может привести к заклиниванию ИО в забое.

Проекция силы резания на плоскость, перпендикулярную оси вращения  $R_{и0}$ , с увеличением радиуса геогода увеличивается линейно (см. рис. 1, б). Это связано с увеличением ширины резания и возрастанием сопротивления резанию передней гранью ножа.

При увеличении радиуса геогода значение момента  $M_{и0}$  увеличивается нелинейно, образуя параболическую зависимость (см. рис. 1, в). Связано это с увеличением плеча вращения, а также значения сопротивления резанию передней гранью ножа.

Результаты исследования влияния радиуса образующей при  $h_b = 0,1$  м и  $n = 2$  шт. представлены на рис. 2.

Зависимость проекции силы сопротивления резанию на ось вращения геогода  $P_0$  (см. рис. 2, а) от радиуса образующей является параболической с точкой экстремума при  $r_0 = 0,12$  м.

В результате анализа зависимости установлено, что при увеличении радиуса образующей происходит:

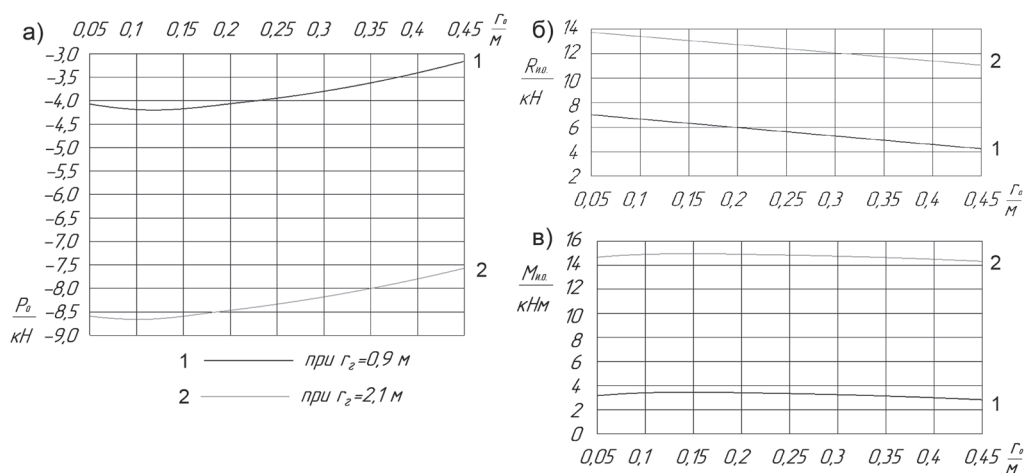


Рис. 2. Зависимость сил сопротивления резанию  $P_0$  (а),  $R_{и0}$  (б) и момента сопротивления  $M_{и0}$  (в) от радиуса образующей

Fig. 2. Cutting resistance force  $P_0$  (a),  $R_{и0}$  (b) and cutting resistance moment  $M_{и0}$  (v) versus generatrix radius

- увеличение затягивания ножевого ИО гехода в массив при значениях  $r_o$  от 0,05 м до 0,12 м на 3%;

- уменьшение затягивания ножевого ИО гехода в массив при значениях  $r_o$  от 0,12 м до 0,45 м на 24% при  $r_r = 0,9$  м и на 12% при  $r_r = 2,1$  м.

Следовательно, возможность заклинивания гехода в выработке при больших значениях радиуса образующей будет меньше, чем при  $r_o < 0,12$  м. Однако большие значения  $r_o$  приведут к неразрушенному забою в центре.

Проекция силы резания на плоскость, перпендикулярную оси вращения гехода  $R_{ио}$ , с увеличением радиуса образующей уменьшается (см. рис. 2, б). Связано это с уменьшением ширины резания.

Зависимость момента сопротивления резанию  $M_{ио}$  (см. рис. 2, в) от радиуса образующей является параболической с точкой экстремума при  $r_o = 0,12$  м.

При увеличении радиуса образующей до 0,12 м, усилия увеличиваются на 220 Нм, но при значениях  $r_o$  от 0,12 м до 0,45 м момент сопротивления резанию начинает уменьшаться с увеличением радиуса образующей на 1050 Нм при любом радиусе гехода.

Таким образом, существует граничное значение радиуса образующей. При отдалении от оси вращения гехода до граничного значения радиуса образующей происходит увеличение проекции силы сопротивления резанию на ось вращения гехода по модулю и момента сопротивления резанию при уменьшении ширины резания. После перехода граничной отметки усилия уменьшаются в связи с уменьшением ширины резания.

На рис. 3 представлены результаты исследования влияния шага внешнего движителя гехода. Исследования выполнены при  $r_r = 0,3$  м;  $r_o = 0,05$  м и  $n = 2$  шт.

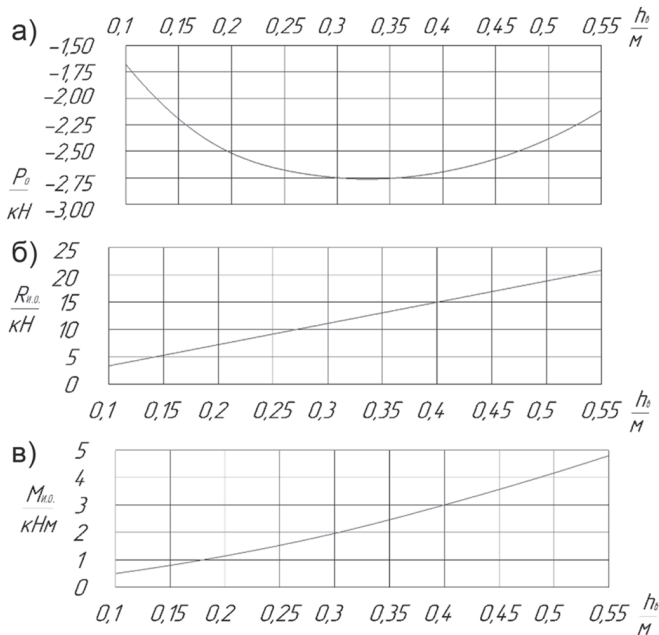


Рис. 3. Зависимость сил сопротивления резанию  $P_o$  (а),  $R_{ио}$  (б) и момента сопротивления  $M_{ио}$  (в) от шага внешнего движителя

Fig. 3. Cutting resistance force  $P_o$  (a),  $R_{ио}$  (b) and cutting resistance moment  $M_{ио}$  (v) versus outboard mover pitch

Энергоемкость перемещения геододела делает целесообразным применение угла подъема винтовой линии движителя  $3^\circ < \beta < 16^\circ$  [21]. Следовательно целесообразное значение шага внешнего движителя для принятых условий будет находиться в интервале от 0,1 м до 0,55 м.

Из рис. 3, а видно, что зависимость проекции силы сопротивления резанию на ось вращения геододела  $P_o$  от шага внешнего движителя является параболической с точкой экстремума при  $h_b = 0,33$  м. В интервале от 0,1 м до 0,33 м усилие уменьшится на 61 %, при значениях  $0,33 < h_b < 0,55$  м проекция силы сопротивления резанию на ось вращения геододела увеличится на 23%. С увеличением шага внешнего движителя геодо-

хода до 0,33 м происходит увеличение стягивание геододела в массив горных пород, однако дальнейшее увеличение приводит к уменьшению этого эффекта в связи с увеличением сопротивлений резанию в боковых расширениях прорезы.

Зависимость проекции силы сопротивления резанию на плоскость, перпендикулярную оси вращения  $R_{ио}$ , от шага внешнего движителя (см. рис. 3, б) — линейная. С увеличением шага внешнего движителя проекция силы сопротивления резанию на плоскость, перпендикулярную оси вращения, увеличивается. В интервале  $0,1 < h_b < 0,55$  м увеличение происходит в среднем на 18 кН. Увеличение шага внешнего движителя геододела приводит к увеличению толщи-

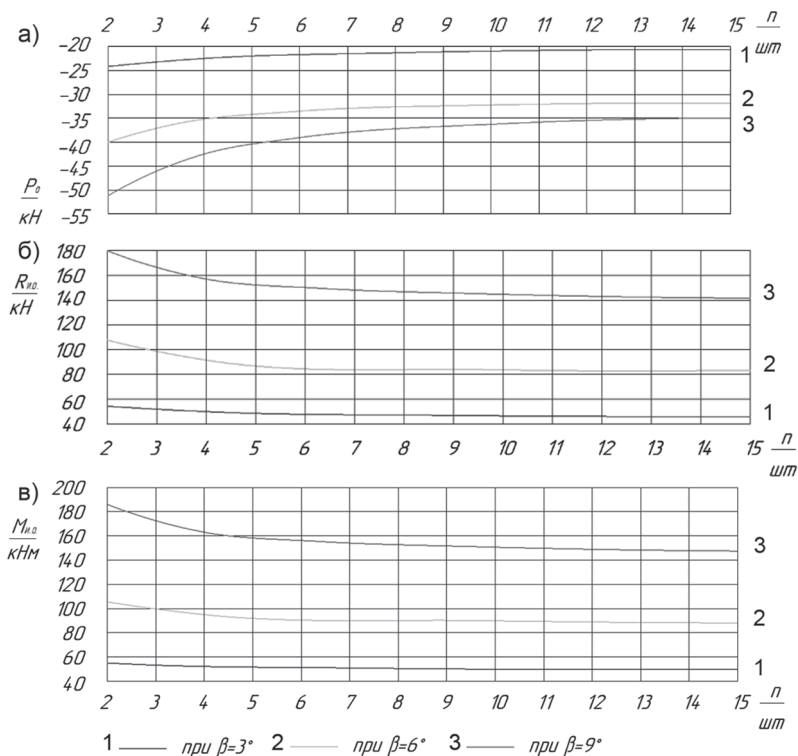


Рис. 4. Зависимость сил сопротивления резанию  $P_o$  (а),  $R_{ио}$  (б) и момента сопротивления  $M_{ио}$  (в) от количества лучей

Fig. 4. Cutting resistance force  $P_o$  (a),  $R_{ио}$  (b) and cutting resistance moment  $M_{ио}$  (v) versus number of cutting arms



ны среза, которая влияет на сопротивление резанию передней гранью ножа.

В результате анализа зависимости, показанной на рис. 3, *в*, установлено, что при увеличении шага внешнего движителя значение момента сопротивления резанию увеличится на 4,3 кН в интервале  $0,1 \text{ м} < h_b < 0,55 \text{ м}$ . Рассматриваемая зависимость изменяется нелинейно.

На рис. 4 показаны результаты исследования влияния количества лучей на силовые показатели работы геодола. Исследования выполнены при  $r_r = 1,5 \text{ м}$  и  $r_o = 0,05 \text{ м}$ .

Анализ результатов исследований (см. рис. 4) показывает, что увеличение числа лучей от 2 до 8 шт. при  $\beta = 3^\circ$  приводит к уменьшению значений величин  $P_o$ ,  $R_{\text{ио}}$  и  $M_{\text{ио}}$  до 8%, при  $\beta = 6^\circ$  до 16% и при  $\beta = 9^\circ$  до 20%. При этом увеличение количества лучей больше 8 шт. не оказывает влияния на силовые показатели работы геодола.

Стоит отметить, что увеличение количества лучей одинаково влияет на усилия резания ножевым ИО геодола. Уменьшение значений усилий связано с уменьшением толщины резания каждым лучом. Большее количество лучей соответствует меньшему значению толщины резания. Однако при увеличении количества лучей больше 8 штук, их влияние на суммарные усилия резания ножевым ИО геодола становится незначительным.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chen S. L., Chiu P. C.* Three dimensional analysis of earth pressure balance (EPB) shield tunneling in soft bedrock / Conference Proceedings. Seventh International Conference on Advances in Civil, Structural and Mechanical Engineering – CSM 2018. DOI: 10.15224/978-1-63248-163-4-18.
2. *Dziuban B., Ling H. I., Li L.* Failure mechanisms of shallow tunnel in sandy ground / Transportation Infrastructure Geotechnology. 2018, vol. 5, pp. 318–331. DOI: 10.1007/s40515-018-0062-1.
3. *Lee C. J., Jeon Y. J., Kim S. H., Park I. J.* The influence of tunneling on preexisting piled foundation in weathered soil // Geomechanics and Engineering. 2016, vol. 11, no. 4, pp. 553–570. DOI: 10.12989/gae.2016.11.4.553.

## Закключение

С увеличением радиуса геодола численные значения силовых параметров взаимодействия ножевого ИО геодола с породой забоя увеличиваются.

Проекции полной силы сопротивления резанию на ось вращения геодола и на плоскость, перпендикулярную оси вращения геодола, а также момент сопротивления резанию уменьшаются с увеличением радиуса образующей.

С увеличением шага внешнего движителя проекции полной силы сопротивления резанию на ось вращения геодола и на плоскость, перпендикулярную оси вращения геодола, а также момент сопротивления резанию для острых ножей увеличиваются.

С увеличением количества лучей, установленных на ИО геодола, в диапазоне от 2 до 8 шт. силы резания уменьшаются до 8% при  $\beta = 3^\circ$ ; при  $\beta = 6^\circ$  до 16% и при  $\beta = 9^\circ$  до 20%. Дальнейшее увеличение числа лучей не влияет на силовые параметры взаимодействия ножевого ИО геодола с породой забоя при принятых параметрах геореды.

Результаты исследования должны учитываться при разработке нового класса горных машин «Геодола», а также могут быть использованы в проектно-конструкторских организациях, занимающихся разработкой горнопроходческой техники.

4. *Raid R. A., Madhat S. A., Osamah I. A.* Effect of tunnel progress on the settlement of existing piled foundation // *Studia Geotechnica et Mechanica*. 2019, vol. 41, no. 2, pp. 102–113. DOI: 10.2478/sgem-2019-0008.

5. *Waad A. Z., Qasim A. M., Halah H. M.* Prediction of stresses and settlement for TBM tunnel surrounding soil // *Diyala Journal of Engineering Sciences*. 2019, vol. 12, no. 4, pp. 50–59. DOI: 10.26367/DJES/VOL.12/NO.4/5.

6. *Горбунов В. Ф., Аксенов В. В., Эллер А. Ф. и др.* Проектирование и расчет проходческих комплексов. — Новосибирск: Наука, 1987. — 192 с.

7. *Walter A. V., Aksekov V. V.* Determining deviations in geometry of the geokhod shells // *Applied Mechanics and Materials*. 2015, vol. 770, pp. 439–444.

8. *Sadovets V. Yu., Beglyakov V. Yu., Aksekov V. V.* Development of math model of geokhod bladed working body interaction with geo-environment // *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*. 2015, vol. 91, no. 1, article 012085. DOI: 10.1088/1757-899X/91/1/012085.

9. *Аксенов В. В., Бегляков В. Ю., Блащук М. Ю., Ефременков А. Б., Казанцев А. А., Хорешок А. А., Вальтер А. В.* Геоход: задачи, характеристики, перспективы // *Горное оборудование и электромеханика*. — 2016. — № 8(126). — С. 3–8.

10. *Аксенов В. В., Хорешок А. А., Ананьев К. А., Ермаков А. Н.* Разработка схемных решений исполнительных органов геоходов // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. — 2014. — № 3. — С. 73–76.

11. *Аксенов В. В., Садовец В. Ю., Пашков Д. А.* Обоснование необходимости создания исполнительного органа геохода для разрушения пород малой крепости // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. — 2016. — № 6 (118). — С. 8–15.

12. *Горбунов В. Ф., Аксенов В. В., Садовец В. Ю.* Экспертная оценка влияния особенностей нового класса горнопроходческой техники на методику расчета его параметров // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. — 2004. — № 6-1(43). — С. 43–45.

13. *Аксенов В. В., Хорешок А. А., Бегляков В. Ю.* Концепция создания перспективного технологического уклада формирования (освоения) подземного пространства на базе опережающего развития новых подходов в строительной геотехнологии и геотехнике. Ч. 1. Предпосылки и основные положения // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. — 2018. — № 4(128). — С. 105–114. DOI: 10.26730/1999-4125-2018-4-105-113.

14. *Аксенов В. В., Хорешок А. А., Бегляков В. Ю.* Концепция создания перспективного технологического уклада формирования (освоения) подземного пространства на базе опережающего развития новых подходов в строительной геотехнологии и геотехнике. Ч. 2 // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. — 2018. — № 5(129). — С. 43–52. DOI: 10.26730/1999-4125-2018-5-43-51.

15. *Аксенов В. В., Бегляков В. Ю., Коперчук А. В., Блащук М. Ю., Садовец В. Ю., Пашков Д. А.* Создание проходческих подземных аппаратов, взаимодействующих с геосредой. Области исследований // *Горное оборудование и электромеханика*. — 2020. — № 2(148). — С. 3–12. DOI: 10.26730/1816-4528-2020-2-3-12.

16. *Садовец В. Ю., Аксенов В. В., Бегляков В. Ю.* Разработка модели взаимодействия ножевого исполнительного органа геохода с геосредой // *Технологии и материалы*. — 2015. — № 1. — С. 36–41.

17. *Аксенов В. В., Ефременков А. Б., Садовец В. Ю., Резанова Е. В.* Формирование нового подхода к синтезу технических и конструктивных решений геоходов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2010. — № S3. — С. 194–210.

18. *Аксенов В. В., Садовец В. Ю.* Моделирование особенностей кинематики геохода // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. — 2006. — № 6-2 (58). — С. 37–39.

19. Ветров Ю. А. Расчет сил резания и копания грунтов. — Киев: Изд-во Киев. Ун-та, 1985. — 251 с.
20. Aksenov V. V., Efremkov A. B., Sadovets V. Yu., Pashkov D. A., Efremkov V. A. Influence of the knife shape on the operating body cutting force // IOP Conference Series. Materials Science and Engineering. 2020, vol. 939, no. 1, article 012004. DOI: 10.1088/1757-899X/939/1/012004.
21. Костинiec И. К. Обоснование параметров опорной поверхности внешнего движителя геохода: автореф. дис. ... кан-та техн. наук. — Кемерово, 2018. — 24 с. **ПАБ**

## REFERENCES

- Chen S. L., Chiu P. C. Three dimensional analysis of earth pressure balance (EPB) shield tunneling in soft bedrock. *Conference Proceedings. Seventh International Conference on Advances in Civil, Structural and Mechanical Engineering – CSM 2018*. DOI: 10.15224/978-1-63248-163-4-18.
- Dziuban B., Ling H. I., Li L. Failure mechanisms of shallow tunnel in sandy ground. *Transportation Infrastructure Geotechnology*. 2018, vol. 5, pp. 318–331. DOI: 10.1007/s40515-018-0062-1.
- Lee C. J., Jeon Y. J., Kim S. H., Park I. J. The influence of tunneling on preexisting piled foundation in weathered soil. *Geomechanics and Engineering*. 2016, vol. 11, no. 4, pp. 553–570. DOI: 10.12989/gae.2016.11.4.553.
- Raid R. A., Madhat S. A., Osamah I. A. Effect of tunnel progress on the settlement of existing piled foundation. *Studia Geotechnica et Mechanica*. 2019, vol. 41, no. 2, pp. 102–113. DOI: 10.2478/sgem-2019-0008.
- Waad A. Z., Qasim A. M., Halah H. M. Prediction of stresses and settlement for TBM tunnel surrounding soil. *Diyala Journal of Engineering Sciences*. 2019, vol. 12, no. 4, pp. 50–59. DOI: 10.26367/DJES/VOL.12/NO.4/5.
- Gorbunov V. F., Aksenov V. V., Eller A. F., etc. *Proektirovanie i raschet prokhodcheskikh kompleksov* [Design and calculation of tunneling complexes], Novosibirsk, Nauka, 1987, 192 p.
- Walter A. V., Aksenov V. V. Determining deviations in geometry of the geokhod shells. *Applied Mechanics and Materials*. 2015, vol. 770, pp. 439–444.
- Sadovets V. Yu., Beglyakov V. Yu., Aksenov V. V. Development of math model of geokhod bladed working body interaction with geo-environment. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*. 2015, vol. 91, no. 1, article 012085. DOI: 10.1088/1757-899X/91/1/012085.
- Aksenov V. V., Beglyakov V. Yu., Blashchuk M. Yu., Efremkov A. B., Kazantsev A. A., Khoreshok A. A., Valter A. V. Geokhod: objectives, characteristics, and prospects. *Mining equipment and electromechanics*. 2016, no. 8(126), pp. 3–8. [In Russ].
- Aksenov V. V., Khoreshok A. A., Anan'yev K. A., Ermakov A. N. Development of circuit solutions for executive bodies of geokhod. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2014, no. 3, pp. 73–76. [In Russ].
- Aksenov V. V., Sadovets V. Yu., Pashkov D. A. Justification of the need to create an executive body of the geokhod for the destruction of rocks of the small fortress. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2016, no. 6 (118), pp. 8–15. [In Russ].
- Gorbunov V. F., Aksonov V. V., Sadovets V. Yu. Expert assessment of the influence of the features of a new class of mining equipment on the method of calculating its parameters. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2004, no. 6-1 (43), pp. 43–45. [In Russ].
- Aksenov V. V., Khoreshok A. A., Beglyakov V. Yu. The concept of creating a promising technological structure for the formation (development) of underground space on the basis of the advanced development of new approaches in construction geotechnology and geotechnics. Part 1. Background and main provisions. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2018, no. 4(128), pp. 105–114. [In Russ]. DOI: 10.26730/1999-4125-2018-4-105-113.

14. Aksenov V. V., Khoreshok A. A., Beglyakov V. YU. The concept of creating a promising technological structure for the formation (development) of underground space on the basis of the advanced development of new approaches in construction geotechnology and geotechnics. Part 2. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2018, no. 5(129), pp. 43–52. [In Russ]. DOI: 10.26730/1999-4125-2018-5-43-51.

15. Aksenov V. V., Beglyakov V. Yu., Koperchuk A. V., Blashchuk M. Yu., Sadovets V. Yu., Pashkov D. A. The creation of the sinking of lifting devices that interact with the geomedium. Research areas. *Mining equipment and electromechanics*. 2020, no. 2(148), pp. 3–12. [In Russ]. DOI: 10.26730/1816-4528-2020-2-3-12.

16. Sadovets V. Yu., Aksenov V. V., Beglyakov V. Yu. Development of a model of interaction of the knife executive body of the geokhod with the geomedium. *Tekhnologii i materialy*. 2015, no. 1, pp. 36–41. [In Russ].

17. Aksenov V. V., Efremenkov A. B., Sadovets V. Yu., Rezanova E. V. The formation of a new approach to the synthesis of technical and constructive solutions geokhod. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2010, no. S3, pp. 194–210. [In Russ].

18. Aksenov V. V., Sadovets V. Yu. Modelling features of the kinematics of the geokhod. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2006, no. 6-2 (58), pp. 37–39. [In Russ].

19. Vetrov Yu. A. *Raschet sil rezaniya i kopaniya gruntov* [Calculation of cutting and digging forces], Kiev, 1985, 251 p.

20. Aksenov V. V., Efremenkov A. B., Sadovets V. Yu., Pashkov D. A., Efremenkov V. A. Influence of the knife shape on the operating body cutting force. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 939, no. 1, article 012004. DOI: 10.1088/1757-899X/939/1/012004.

21. Kostinets I. K. *Obosnovanie parametrov opornoj poverkhnosti vneshnego dvizhitelya geokhoda* [Justification of the parameters of the reference surface of the external geokhod mover], Candidate's thesis, Kemerovo, 2018, 24 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Пашков Дмитрий Алексеевич — аспирант,  
Федеральный исследовательский центр  
угля и углехимии Сибирского отделения РАН;  
научный сотрудник научного центра  
«Цифровые технологии»,  
Кузбасский государственный технический университет  
имени Т.Ф. Горбачева,  
e-mail: pashkov.d.a@inbox.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

D.A. Pashkov, Graduate Student,  
Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry,  
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,  
650065, Kemerovo, Russia,  
Researcher, Engineer Research Center  
«Digital Technologies»,  
T. Gorbachev Kuzbass State Technical University,  
650000, Kemerovo, Russia;  
e-mail: pashkov.d.a@inbox.ru.

Получена редакцией 26.02.2021; получена после рецензии 05.03.2021; принята к печати 10.05.2022.  
Received by the editors 26.02.2021; received after the review 05.03.2021; accepted for printing 10.05.2022.