

БЕГЛЯКОВ В.Ю. (Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Юргинский технологический институт, Юрга, Россия)

АКСЕНОВ В.В. (Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, Кемерово, Россия)

КОСТИНЕЦ И.К. (Филиал Кузбасского государственного технического университета, имени Т.Ф. Горбачева, Белово, Россия)

ХОРЕШОК А.А. (Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Кемерово, Россия)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОСНОВНЫХ СИСТЕМ ГЕОХОДА С ГЕОСРЕДОЙ И МЕЖДУ СОБОЙ

Возникающие при геолодной проходке подземных выработок процессы характеризуются взаимодействием элементов геолода между собой и с геосредой. Процесс взаимодействия можно исследовать при математическом моделировании, решая задачи обоснования параметров приводов и взаимодействующих сил, обеспечения достаточной прочности элементов машины и несущей способности приконтурного массива. Предлагаемые блочно-модульные принципы построения математической модели позволяют решать частные задачи работы системы и ее отдельных элементов. От решения частных задач в настоящее время необходимо перейти к решению обобщенной модели, используя эквивалентные нагрузки и приведенные суммарные моменты (силы). Построение обобщенной модели требует ряд допущений, однако ее решение позволит выявить взаимодействие между элементами геолода и геосредой, что является весьма актуальным.

В качестве примера приведено решение частной задачи – определение значения сил, возникающих при взаимодействии лопасти внешнего двигателя со средой.

Сформулирован перечень допущений, которые позволяют описать обобщенную математическую модель взаимодействия геосреды и геолода, а также процессы, происходящие при геолодной проходке горных выработок.

Ключевые слова: Геолод, внешний движитель, математическое моделирование, процессы взаимодействия, опорная поверхность, геосреда.

При геолодной проходке подземной выработки происходят одновременные процессы взаимодействия нескольких систем геолода между собой и с геосредой [1-5]. Причем эти процессы взаимовлияющие [6-9].

Моделирование процессов, происходящих при геолодной проходке подземной выработки, преследует, на наш взгляд, три основные цели [8-14]:

Цель 1 Обоснование параметров приводов и сил возникающих при взаимодействии систем геолода с геосредой и между собой.

Цель 2 Обеспечение достаточной прочности элементов машины.

Цель 3 Обеспечение несущей способности прилегающего (приконтурного) массива горных пород.

Достижение первой цели, кроме того, позволяет сформировать исходные данные для решения задач, преследующих вторую и третью цели. Поэтому рассмотрим именно модель для определения сил взаимодействия систем геолода с геосредой и между собой.

В работах [12-14] обосновывается применение блочно-модульного принципа построения математической модели, что позволит решать частные задачи моделирования работы отдельной системы, используя результаты моделирования работы смежных систем в качестве исходных данных.

Поэтому необходимо абстрагироваться от частных конструктивных особенностей, и упростить задачу, заменив силовые схемы некоторых систем эквивалентными нагрузками и приведенными суммарными моментами и силами.

Для построения обобщенной модели были сделаны следующие допущения и введены приведенные нагрузки:

1) Все силы центрально симметричны относительно оси выработки z .

2) Со стороны главного забоя воздействие геосреды на геолод передается через исполнительный модуль (ИО ГЗ) и может быть приведено к суммарному моменту $M_{\text{ИОГЗ}}$ и суммарной силе $F_{\text{ИОГЗ}}$ (рис. 1). Момент $M_{\text{ИОГЗ}}$ направлен вокруг



оси выработки z , а сила $F_{\text{иогз}}$ направлена вдоль оси z .

3) Взаимодействие исполнительных органов внешнего движителя (ИО ВД) передается на корпус головной секции и может быть приведено к двум силам: подачи $F_{\text{иовд}}^{\text{П}}$, направленной вдоль направления подачи на забой канала и лежащей в плоскости, касательной к оболочке корпуса; и резания $F_{\text{иовд}}^{\text{Р}}$, направленной перпендикулярно к направлению подачи и лежащей в плоскости, касательной к оболочке корпуса. Крутящие моменты от ИО ВД уравниваются друг друга и могут не учитываться.

4) Взаимодействие исполнительных органов элементов противовращения (ИО ЭП) передается на корпус хвостовой секции и может быть приведено к двум силам: подачи $F_{\text{иоэп}}^{\text{П}}$, направленной вдоль направления подачи на забой канала и лежащей в плоскости, касательной к оболочке корпуса; и резания $F_{\text{иоэп}}^{\text{Р}}$, направленной перпендикулярно к направлению подачи и лежащей в плоскости, касательной к оболочке корпуса. Крутящие моменты от ИО ЭП уравниваются друг друга и могут не учитываться.

5) Взаимодействие лопастей внешнего движителя (ВД) передается на корпус головной секции и может быть приведено к двум силам: нормальной $F_{\text{ВД}}^{\text{N}}$, направленной по нормали к опорной поверхности лопасти и приложенной к точке на основании лопасти; и трения $F_{\text{ВД}}^{\text{ТР}}$, приложенной к основанию лопасти и направленной вдоль основания лопасти.

6) Взаимодействие лопастей элементов противовращения (ЭП) передается на корпус хвостовой секции и может быть приведено к двум силам: нормальной $F_{\text{ЭП}}^{\text{N}}$, направленной по нормали к опорной поверхности лопасти и приложенной к точке на основании лопасти; и трения $F_{\text{ЭП}}^{\text{ТР}}$, приложенной к основанию лопасти и направленной вдоль основания лопасти.

7) Взаимодействие оболочки головной секции с геосредой может быть приведено к силе трения $F_{\text{ГС}}^{\text{ТР}}$, равномерно распределенной по оболочке и направленной параллельно винтовой линии ВД.

8) Взаимодействие оболочки хвостовой секции с геосредой может быть приведено к силе трения $F_{\text{ХС}}^{\text{ТР}}$, равномерно распределенной по оболочке и направленной параллельно оси выработки.

9) Проявление горного давления может быть приведено к нормальной нагрузке $p_{\text{ГД}}$, равномерно распределенной по оболочкам корпусов.

10) Взаимодействие головной и хвостовой секций может быть приведено к суммарному приводному моменту $M_{\text{ПР}}$ и суммарной тяговой силе $F_{\text{ТЯГ}}$. Момент $M_{\text{ПР}}$ направлен вокруг оси выработки z , а сила $F_{\text{ТЯГ}}$ направлена вдоль оси z .

На рисунке 1 показана схема к модели силового взаимодействия основных систем геодохода с геосредой и между собой.

На рис. 2 показана схема приведения сил резанья и подачи на ИО ГЗ к суммарному моменту $M_{\text{иогз}}$ и суммарной силе $F_{\text{иогз}}$ (рис. 1).

Приведенный момент, действующий со стороны забоя, определяли по формуле:

$$M_{\text{иогз}} = 2F_{\text{иогз}}^{\text{П}} \frac{R_{\text{В}}}{2}, \quad (1)$$

где $R_{\text{В}}$ м – радиус выработки.

Приведенную суммарную силу, действующую со стороны забоя, определим по формуле:

$$F_{\text{иогз}} = 2F_{\text{иогз}}^{\text{Р}} \cos \alpha, \quad (2)$$

Приведенную силу трения, действующую на головную секцию и внешний (вращающийся) корпус модуля сопряжения, определяли по формуле:

$$F_{\text{ГС}}^{\text{ТР}} = p_{\text{ГД}} f_{\text{ТР}} 2\pi R_{\text{С}} L_{\text{ГС}}, \quad (3)$$

где $f_{\text{ТР}}$ – коэффициент трения металла по породе.

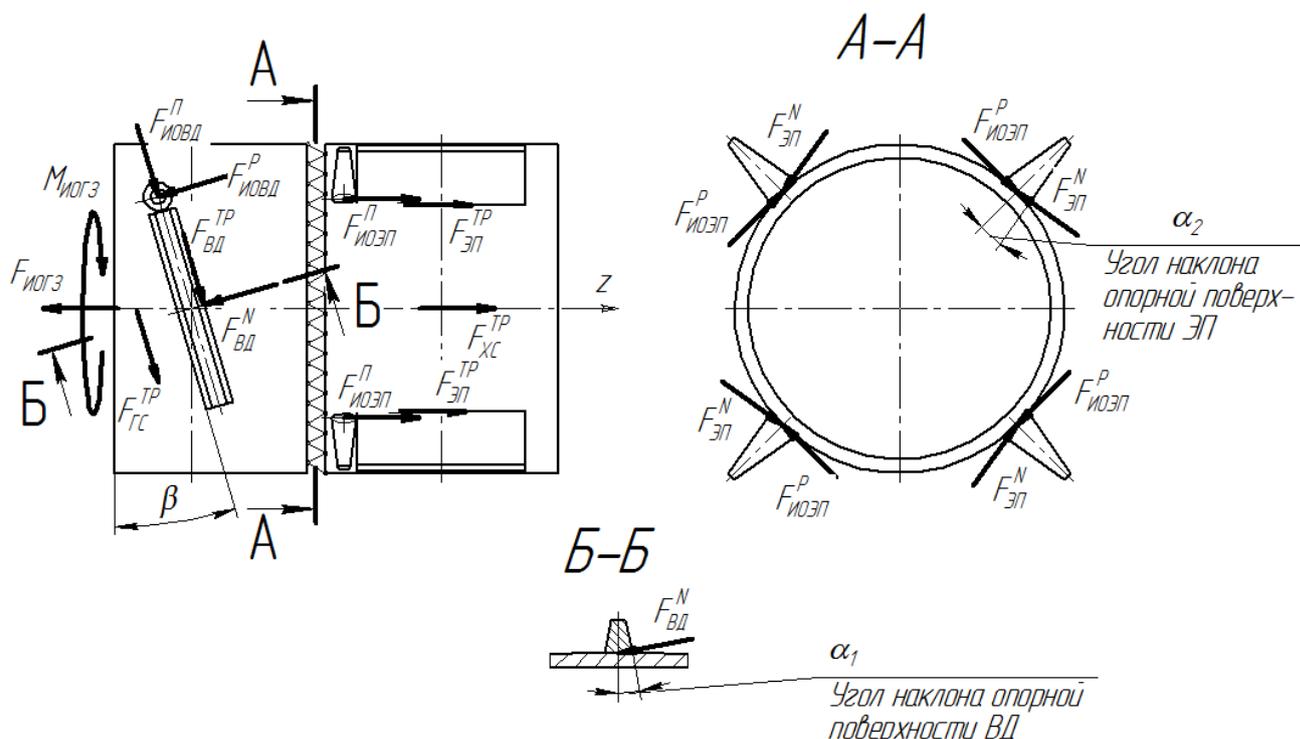


Рис. 1. Схема к модели взаимодействия геохода с геосредой

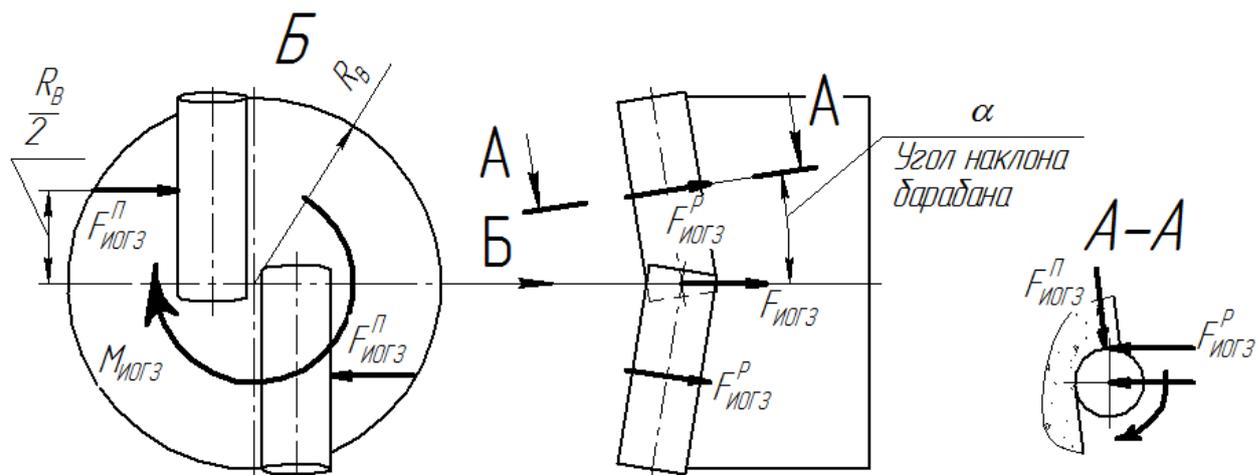


Рис. 2. Силы, действующие на ИО ГЗ со стороны геосреды

Приведенную силу трения, действующую на хвостовую секцию, определили по формуле:

$$F_{ХС}^{ТР} = \rho_{ГД} f_{тр} 2\pi R_C L_{ХС}, \quad (4)$$

Скорость движения геохода достаточно мала и силами инерции можно

пренебречь, поэтому сделаем допущение, что геоход движется равномерно и прямолинейно, это позволило составить систему уравнений равновесия.

Уравнение проекций сил на ось z:

$$\sum F_z = F_{ХС}^{ТР} + F_{ГС}^{ТР} \sin \beta - F_{иогз} + 2F_{иовд}^П \sin \beta - 2F_{иовд}^Р \cos \beta +$$

$$+ 4F_{иозп}^П - 2F_{вд}^Н \cos \beta \cos \alpha_1 + 2F_{вд}^{ТР} \sin \beta + 4F_{эл}^{ТР} = 0 \quad (5)$$

Уравнение моментов сил относительно оси z:



$$\begin{aligned} \sum M_z = & F_{ГС}^{TP} R_C \cos\beta + M_{иогз} + 2F_{иовд}^{II} R_C \cos\beta + 2F_{иовд}^P R_C \sin\beta - \\ & - 4F_{иоэп}^P R_C + 2F_{вд}^N R_C \sin\beta \cos\alpha_1 + 2F_{вд}^{TP} R_C \cos\beta - 4F_{эп}^N R_C \cos\alpha_2 = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Учитывая, что силы трения пропорциональны нормальным силам:

$$\begin{aligned} F_{вд}^{TP} &= f_{тр} \cdot F_{вд}^N \\ F_{эп}^{TP} &= f_{тр} \cdot F_{эп}^N \end{aligned} \quad (7)$$

уравнения равновесия можно привести к системе:

$$\left\{ \begin{aligned} & F_{ХС}^{TP} + F_{ГС}^{TP} \sin\beta - F_{иогз} + 2F_{иовд}^{II} \sin\beta - 2F_{иовд}^P \cos\beta + \\ & + 4F_{иоэп}^{II} - 2F_{вд}^N (\cos\beta \cos\alpha_1 - f_{тр} \sin\beta) - 4f_{тр} F_{эп}^N = 0 \\ & F_{ХС}^{TP} \cos\beta - \frac{M_{иогз}}{R_C} + 2F_{иовд}^{II} \cos\beta + 2F_{иовд}^P \sin\beta + \\ & + 4F_{иоэп}^P + 2F_{вд}^N (\sin\beta \cos\alpha_1 + f_{тр} \cos\beta) - 4F_{эп}^N \cos\alpha_2 = 0 \end{aligned} \right. \quad (8)$$

Силы, возникающие на исполнительных органах, могут быть предварительно определены исходя из типов исполнительных органов и заданных производительности машины и сечения выработки [15]. То же можно сказать про габаритные размеры геолода и его секций, а также силы проявления горного давления. Значение угла β наклона лопастей ВД лимитируется параметрами ИО ГЗ [2, 3]. То есть определение этих параметров, это частные задачи отдельных блоков, формирующих общую блочно-модульную модель. Значения сил резания и подачи напрямую не зависят от варьируемых геометрических параметров (α_1 и α_2), и их можно рассматривать как константы или независимые переменные.

Из сил, обозначенных на схеме взаимодействия геолода с геосредой (рис. 1), от варьируемых геометрических параметров (α_1 и α_2) напрямую зависят

только силы, действующие на лопасти внешнего движителя ($F_{вд}^N$ и $F_{вд}^{TP}$) и элементов противовращения ($F_{эп}^N$ и $F_{эп}^{TP}$).

Определение значений сил, возникающих при взаимодействии ВД с геосредой, является частной задачей, которая преследует «цель 1» и позволяет получить исходные данные к задачам, преследующим «цель 2» и «цель 3».

Поэтому рассмотрим частную задачу – определение влияния угла α_1 наклона опорной поверхности ВД на силы взаимодействия геолода с приконтурным массивом. Для этого посчитаем, что угол α_2 наклона опорной поверхности ЭП – некая заданная постоянная величина.

Введем константы:



$$C_1 = F_{XC}^{TP} + F_{GC}^{TP} \sin \beta - F_{ИОГЗ} - 2F_{ИОВД}^{\Pi} \sin \beta - 2F_{ИОВД}^P \cos \beta + 4F_{ИОЭП}^{\Pi};$$

$$C_2 = -2 \cos \beta; \quad C_3 = 2f_{тр} \sin \beta; \quad C_4 = -4f_{тр};$$

$$C_5 = F_{XC}^{TP} \cos \beta - \frac{M_{ИОГЗ}}{R_C} + 2F_{ИОВД}^{\Pi} \cos \beta + 2F_{ИОВД}^P \sin \beta + 4F_{ИОЭП}^P;$$

$$C_6 = 2 \sin \beta; \quad C_7 = 2f_{тр} \cos \beta; \quad C_8 = -4 \cos \alpha_2$$

Тогда система уравнений (8) принимает вид:

$$\begin{cases} C_1 + F_{ВД}^N (C_2 \cos \alpha_1 + C_3) + C_4 F_{ЭП}^N = 0 \\ C_5 + F_{ВД}^N (C_6 \cos \alpha_1 + C_7) + C_8 F_{ЭП}^N = 0 \end{cases} \quad (9)$$

Решая систему, получили:

$$F_{ВД}^N = \frac{C_5 C_4 - C_1 C_8}{(C_2 C_8 - C_6 C_4) \cdot \cos \alpha_1 + C_3 C_8 - C_7 C_4} \quad (10)$$

Введем константы:

$$A_1 = C_4 C_5 - C_1 C_8 \quad A_2 = C_2 C_8 - C_4 C_6 \quad A_3 = C_4 C_7 - C_3 C_8$$

Тогда решение принимает вид:

$$F_{ВД}^N = \frac{A_1}{A_2 \cdot \cos \alpha_1 - A_3} \quad (11)$$

Диапазон возможных углов наклона опорной поверхности лопасти ВД определяется условием:

$$A_2 \cdot \cos \alpha_1 - A_3 > 0 \quad (12)$$

Очевидно, что минимальная нагрузка на лопасть будет при радиальном расположении образующей опорной поверхности лопасти ВД, т.е. при $\alpha_1 = 0$.

Критическое значение угла наклона опорной поверхности:

$$\alpha_{1кр} = \arccos \left(\frac{A_3}{A_2} \right) \quad (13)$$

При выше заданных исходных данных критическое значение угла наклона опорной поверхности лопасти ВД составило: $\alpha_{1кр} = 54^\circ 28'$.

Введем безразмерный параметр $f_{ВД}^N$ – коэффициент влияния угла α_1 на нагрузку на лопасть ВД:

$$f_{ВД}^N = \frac{F_{ВД}^N}{F_{0ВД}^N} = \frac{A_2 - A_3}{A_2 \cdot \cos \alpha_1 - A_3}, \quad (14)$$

где $F_{0ВД}^N = A_1 / (A_2 - A_3)$ – значение нормальной силы на лопасти ВД при $\alpha_1 = 0$.

На рис. 3 представлен график зависимости $f_{ВД}^N$ от α_1 . Из графика видно, что значительное влияние угла α_1 проявляется при $\alpha_1 > 30^\circ$, а при значениях угла α_1 до 15° рост нагрузки не превышает 10%.

Представленная модель позволяет получить исходные данные для моделирования НДС приконтурного и элементов геохода, взаимодействующих с породой приконтурного массива.

Библиографический список

- Бегляков В.Ю., Аксенов В.В. Поверхность забоя при проходке горной выработки геоходом: монография // Издательство: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG Heinrich-Böcking-Str. 6-8, 66121 Saarbrücken, Germany. 2012. – 139 с.
- Sadovets V.Yu., Beglyakov V.Yu. and Efremkov A.B. 2015 Simulation of geokhod movement with blade actuator Applied Mechanics and Materials 770. 384-390.
- Aksenov V. V., Beglyakov V.Y., Kazantsev A.A., Doroshenko I.V. Development of Requirements for a Basic Standardized Mathematical Model of Geokhod // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2016. – Т. 127. – №. 1. – С. 012031.
- Aksenov V. V., Beglyakov V.Y., Kazantsev A.A., Saprykin A.S. Substantiating Ways of

- Load Application When Modeling Interaction of a Multiincisal Mining Machine Actuator With Rocks // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2016. – T. 127. – №. 1. – С. 012032.
5. Broere W., Faassen T.F., Arends G., van Tol A.F. Modelling the boring of curves in (very) soft soils during microtunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2007, 22 (5-6), pp. 600-609. DOI: 10.1016/j.tust.2007.06.002.
6. Deng K., Li Y., Yin Z. Thrust distribution characteristics of thrust systems of shield machines based on spatial force ellipse model in mixed ground. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, 30 (1), pp. 279-286. DOI: 10.1007/s12206-015-1231-6.
7. Deng K., Zhang X., Yang J., Wang H. Deformation characteristics under variable stiffness for the propelling mechanism of EPB shield machines in mixed ground. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2014, 28 (9), pp. 3679-3685. DOI: 10.1007/s12206-014-0829-4.
8. Festa D., Broere W., Bosch J.W. An investigation into the forces acting on a TBM during driving - Mining the TBM logged data. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2012, 32, pp. 143-157. DOI: 10.1016/j.tust.2012.06.006.
9. Huayang Y., Hu S., Guofang G., Guoliang H. Electro-hydraulic proportional control of thrust system for shield tunneling machine. *Automation in Construction*, 2009, 18 (7), pp. 950-956. DOI: 10.1016/j.autcon.2009.04.005.
10. Kongshu D., Xiaoqiang T., Liping W., Xu C. Force transmission characteristics for the non-equidistant arrangement thrust systems of shield tunneling machines. *Automation in Construction*, 2011, 20 (5), pp. 588-595. DOI: 10.1016/j.autcon.2010.11.025.
11. Peck R.B. Deep excavations and tunneling in soft ground. *Proceedings of the 7th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1969, pp. 225-290.
12. Shangguan Z., Li S., Luan M. Determining optimal thrust force of EPB shield machine by analytical solution. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 14 H.
13. Sugimoto M., Sramoon A., Konishi S., Sato Y. Simulation of shield tunneling behavior along a curved alignment in a multilayered ground. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133 (6), pp. 684-694. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:6(684).
14. Vu M.N., Broere W., Bosch J. Effects of cover depth on ground movements induced by shallow tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, 50, pp. 499-506. DOI: 10.1016/j.tust.2015.09.006.
15. Wang L., Gong G., Shi H., Yang H. Modeling and analysis of thrust force for EPB shield tunneling machine. *Automation in Construction*, 2012, 27, pp. 138-146. DOI: 10.1016/j.autcon.2012.02.004.

“Gornye nauki i tehnologii”/ “Mining science and technology”, 2017, No. 4, pp. 23-28

Title:	DETERMINING THE FORCES OF INTERACTION OF MAIN GEOKHOIDS SYSTEMS WITH GEO-ENVIRONMENT AND WITH EACH OTHER
Author 1:	<i>Name & Surname:</i> Vyacheslav Yu. Beglyakov <i>Company:</i> National Research Tomsk Polytechnic University, Yurga Institute of Technology, Yurga <i>Address:</i> 652050, Yurga, Leningradskaya str., 26 <i>Scientific Degree:</i> Dr. Sci. (Tech.) <i>Work Position:</i> associate professor <i>Contacts:</i> begljakov@rambler.ru
Author 2:	<i>Name & Surname:</i> Aksenov Vladimir V. <i>Company:</i> Institute of Coal of the Siberian Branch of the RAS <i>Address:</i> 650000, Kemerovo, ave. Sovetski, 18 <i>Scientific Degree:</i> Dr. Sci. (Tech.) <i>Work Position:</i> Professor
Author 3:	<i>Name & Surname:</i> Irina K. Kostinets <i>Company:</i> Branch of Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev in the town of Belovo



	<i>Address: 652644, Kemerovo Region, Belovo, town of. Inskoy, st. Ilyich, 32a</i> <i>Work Position: principal</i>
Author 4:	<i>Name & Surname: Aleksey A. Khoreshok</i> <i>Company: T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University</i> <i>Address: 650000, Kemerovo, Vesennyaya Str., 28</i> <i>Scientific Degree: Dr. Sci. (Tech.)</i> <i>Work Position: Professor</i>
DOI:	10.17073/2500-0632-2017-4-23-28
Abstract:	<p>The processes occurring during the geodetic excavation of underground excavations are characterized by the interaction of the elements of the geokhod with each other and with the geo-environment. The interaction process can be investigated in mathematical modeling, solving the problems of justifying the parameters of the drives and interacting forces, ensuring sufficient strength of the machine elements and the bearing capacity of the contour array. The proposed block-modular principles of constructing a mathematical model allow solving particular problems of the system and its individual elements. From the solution of particular problems, it is now necessary to proceed to the solution of the generalized model, using equivalent loads and reduced total moments (forces). The construction of a generalized model requires a number of assumptions, but its solution will reveal the interaction between the elements of the geokhod and the geo-environment, which is very relevant.</p> <p>As an example, the solution of a particular problem is given-the determination of the value of the forces arising from the interaction of the blade of an external engine with the medium.</p> <p>A list of assumptions is formulated that allow us to describe a general mathematical model of the interaction between the geo-environment and the geokhod, as well as the processes occurring during geodetic excavation of mine workings.</p>
Keywords:	<i>Geokhod, external propulsor, mathematical modeling, interacting processes, supporting surface, geoenvironment.</i>
References:	<ol style="list-style-type: none"> 1. Begljakov V.Ju., Aksenov V.V. Poverhnost' zaboja pri prohodke gornoj vyrabotki geohodom: monografija [A surface of the face during the mining of the mine by the geokhod: a monograph]. V.Ju. Begljakov, V.V. Aksenov. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG Heinrich-Böcking-Str. 6-8, 66121 Saarbrücken, Germany, 2012, 139 p. 2. Sadovets V.Yu., Beglyakov V.Yu. Efremenkov A.B. 2015 <i>Simulation of geokhod movement with blade actuator</i>. Applied Mechanics and Materials 770, pp. 384-390 3. Aksenov V.V., Beglyakov V.Y., Kazantsev A.A., Doroshenko I.V. <i>Development of Requirements for a Basic Standardized Mathematical Model of Geokhod</i>. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 2016, vol. 127, no. 1, pp. 012031. 4. Aksenov V.V., Beglyakov V.Y., Kazantsev A.A., Saprykin A.S. <i>Substantiating Ways of Load Application When Modeling Interaction of a Multiincisal Mining Machine Actuator With Rocks</i>. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 2016, vol. 127, no. 1, pp. 012032. 5. Broere W., Faassen T.F., Arends G., van Tol A.F. <i>Modelling the boring of curves in (very) soft soils during microtunnelling</i>. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007, 22 (5-6), pp. 600-609. DOI: 10.1016/j.tust.2007.06.002. 6. Deng K., Li Y., Yin Z. <i>Thrust distribution characteristics of thrust systems of shield machines based on spatial force ellipse model in mixed ground</i>. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30 (1), pp. 279-286. DOI: 10.1007/s12206-015-1231-6. 7. Deng K., Zhang X., Yang J., Wang H. <i>Deformation characteristics under variable stiffness for the propelling mechanism of EPB shield machines in mixed ground</i>. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28 (9), pp. 3679-3685. DOI: 10.1007/s12206-014-0829-4.



8. Festa D., Broere W., Bosch J.W. *An investigation into the forces acting on a TBM during driving - Mining the TBM logged data*. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 32, pp. 143-157. DOI: 10.1016/j.tust.2012.06.006.
9. Huayong Y., Hu S., Guofang G., Guoliang H. *Electro-hydraulic proportional control of thrust system for shield tunneling machine*. Automation in Construction, 2009, 18 (7), pp. 950-956. DOI: 10.1016/j.autcon.2009.04.005.
10. Kongshu D., Xiaoqiang T., Liping W., Xu C. *Force transmission characteristics for the non-equidistant arrangement thrust systems of shield tunneling machines*. Automation in Construction, 2011, 20 (5), pp. 588-595. DOI: 10.1016/j.autcon.2010.11.025.
11. Peck R.B. *Deep excavations and tunneling in soft ground*. Proc. of the 7th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1969, pp. 225-290.
12. Shangguan Z., Li S., Luan M. *Determining optimal thrust force of EPB shield machine by analytical solution*. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 14 H.
13. Sugimoto M., Sramoon A., Konishi S., Sato Y. *Simulation of shield tunneling behavior along a curved alignment in a multilayered ground*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133 (6), pp. 684-694. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:6(684).
14. Vu M.N., Broere W., Bosch J. *Effects of cover depth on ground movements induced by shallow tunnelling*. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 50, pp. 499-506. DOI: 10.1016/j.tust.2015.09.006.
15. Wang L., Gong G., Shi H., Yang H. *Modeling and analysis of thrust force for EPB shield tunneling machine*. Automation in Construction, 2012, 27, pp. 138-146. DOI: 10.1016/j.autcon.2012.02.004.