

14. 11. Tretyak L.N., Volnov A.S., Kosykh D.A. Composition and concentration of solid particles in exhaust gases as criteria for the technical condition of internal combustion engines // Fundamental Research. – 2015. – No. 2-21. – P.
15. Greuter, E., Zima, S. (2012). Engine failure analysis. SAE International. doi: <https://doi.org/10.4271/0768008859>
16. Isermann, R. (2017). Combustion Engine Diagnosis: Model-based Condition Monitoring of Gasoline and Diesel Engines and their Components. Springer, 303. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49467-7>
17. Engine Air Filtration for Light, Medium, & Heavy Dust Conditions. Air Cleaners, Pre-cleaners & Inlet Hoods, Rubber Adapters/Elbows, Filter Indicators, Mounting Bands. Donaldson Company, Inc., 307. URL: <https://www.donaldson.com>
18. Mislibayev I.T., Makhmudov A.M., Makhmudov Sh.A. Study of functioning conditions of single-bucket open-pit excavators of cyclic action in complex-structured deep open pits // Mining Bulletin of Uzbekistan. - Navoi, 2020. - №1 (80). - 80-84 p.
19. Makhmudov S. A. Systematization of functional elements of the structure of complex mechanization at careers // Australian Journal of Science and Technology. – 2020. – Т. 4. – №. 1. – С. 222.
20. Azamat M., Sherzod M., Lochin K. Research and assessment of the operational manufacturability of road transport equipment using modern on-board diagnostic and machine control systems // Universum: технические науки. – 2022. – №. 8-3 (101). – С. 33-36.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Makhmudov Azamat	—	Associate professor the department of mining electromechanics, PhD; Navoi State Mining and Technological University, 210100, Navoi, M.Torobiy Str., 72, Republic of Uzbekistan ORCID: 0000-0002-1260-9433 , e-mail: maxmudov-azamat@inbox.ru
Makhmudov Sherzod Azamatovich	—	Associate professor the department of mining electromechanics, PhD; Navoi State Mining and Technological University, 210100, Navoi, M.Torobiy Str., 72, Republic of Uzbekistan ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0057-2829 , e-mail: lyv2@mail.ru
Akhmedov Soyibjon Tozhiboevich	—	Assistant Professor, Department of Mining Electromechanics, Navoi State Mining and Technological University, 210100, Navoi, M.Torobiy Str., 72, Republic of Uzbekistan
Rahimova Nozanin Allayar's daughter	—	Student majoring in Technological Machines and Equipment at Navoi State Mining and Technological University, 210100, Navoi, M.Torobiy Str., 72, Republic of Uzbekistan

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПОРШНЕЙ-УДАРНИКОВ ПОЛИКАТЕНОИДНОЙ ФОРМЫ ДЛЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ПЕРФОРАТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ

Б.О.Отажонов, Т.Ж. Аннакулов, Ж.Ф.Юнусов

*Ташкентский государственный технический университет,
Ташкент, Узбекистан.*

Doi: 10.5281/zenodo.20279818

АННОТАЦИЯ В статье рассматривается метод математического моделирования перехода от цилиндрической формы поршня-ударника к полукатеноидной геометрической форме. Переход между геометрическими формами описывается как процесс параметрической трансформации, основанный на непрерывных и гладких математических зависимостях, обеспечивающих сохранение основных геометрических характеристик исходной формы и постепенное формирование параметров конечной геометрии. Особое внимание уделено обеспечению непрерывности и дифференцируемости геометрической модели, что позволяет исключить появление резких изломов и геометрических разрывов в зоне перехода. На основе разработанной математической модели с помощью компьютерных программ была создана полукатеноидная часть поршня-ударника. Предложенная модель может быть использована при проектировании ударных элементов горных машин для оптимизации их геометрии, снижения концентрации напряжений и улучшения распределения нагрузок в конструкции.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА пневматический перфоратор, ударная система, поршень-ударник, цилиндр, катеноид.

ВВЕДЕНИЕ

Переход от одной геометрической формы к другой представляет собой процесс изменения геометрии тела или его отдельного элемента на основе непрерывных и гладких математических зависимостей, при котором основные геометрические характеристики исходной формы сохраняются, а параметры, соответствующие конечной форме, формируются поэтапно.

Указанный процесс рассматривается как геометрическая трансформация или параметрическая деформация формы и описывается с помощью функций, обеспечивающих непрерывность и дифференцируемость геометрической модели. В зоне перехода за счёт обеспечения непрерывности производных первого и второго порядков исключается появление резких изломов и геометрических разрывов поверхности или контура.

В инженерной практике переход от одной геометрической формы к другой применяется с целью оптимизации механических свойств конструктивных элементов, снижения концентрации напряжений и улучшения пространственного распределения нагрузок.

Метод формирования формы на основе условия равенства объёмов представляет собой математический подход к моделированию, при котором объёмы исходной и конечной геометрических форм принимаются равными и используются в качестве основного ограничения при определении нового геометрического профиля тела. В рамках данного подхода изменение геометрических параметров формы подчиняется закону сохранения объёма.

ИССЛЕДОВАНИЯ

Именно на основе данного метода была разработана математическая модель перехода от цилиндрического поршня-ударника к поршню-ударнику полукатеноидной формы.

Для того, чтобы сохранился масса заданная фигура при переходе с первого (левое) фигура к второму (правое) должно сохраняться объём. Чтобы, сохранил объём необходимо было справедливо следующая равенства:

$$V_{f(x)} + \pi r^2(L - x) + \pi R^2 y = \pi(r^2 L + R^2 H) \quad (1)$$

или

$$V_{f(x)} - \pi r^2 x = \pi R^2 (H - y) \quad (2)$$

Поверхность фигура в котором искусственно образуется, (т.е. поверхность $V_{f(x)}$ в чертеже рисунок 1) называется катеноид, а его функция описывается следующим образом:

$$y = a \operatorname{ch} \frac{x}{a} \quad (3)$$

Объём полного катеноида найдётся следующим образом:

$$V_{f(x)} = \pi \int_0^{x_0} y^2 dx \quad (4)$$

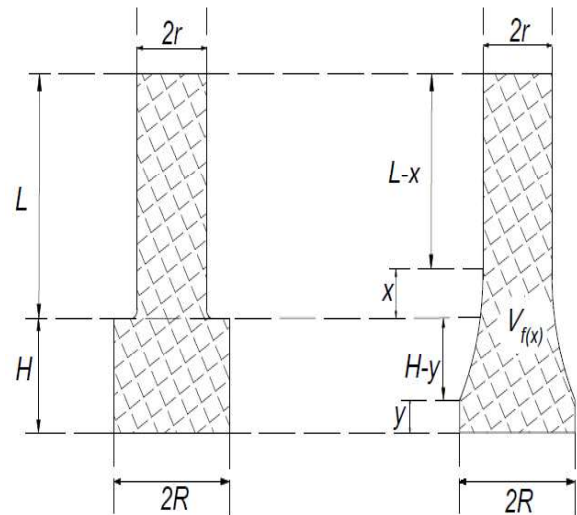


Рисунок 1. Геометрическая модель формирования полукатеноидной формы поршня-ударника

В нашем случае функция (3) в точка $(0; H - y + x)$ имеет значение равным R поэтому,

$$r \operatorname{ch} \frac{H - y + x}{r} = R \quad (5)$$

Отсюда составив уравнение можно выразить $H - y$ через x :

$$\begin{aligned} \frac{r \left(e^{-\frac{H-y+x}{r}} + e^{\frac{H-y+x}{r}} \right)}{2} &= R \\ e^{\frac{H-y+x}{r}} = t &\Rightarrow t + \frac{1}{t} = \frac{2R}{r} \\ \Rightarrow t^2 - \frac{2R}{r} t + 1 &= 0 \\ t = \frac{\frac{2R}{r} \pm \sqrt{\frac{4R^2}{r^2} - 4}}{2} &= \frac{R}{r} \pm \sqrt{\frac{R^2}{r^2} - 1} \\ &= \frac{R \pm \sqrt{R^2 - r^2}}{r} \\ e^{\frac{H-y+x}{r}} &= \frac{R \pm \sqrt{R^2 - r^2}}{r} \Rightarrow \\ \frac{H - y + x}{r} &= \ln \frac{R \pm \sqrt{R^2 - r^2}}{r} \end{aligned}$$

$$\frac{H-y+x}{r} > 0 \text{ и поэтому } \ln \frac{R+\sqrt{R^2-r^2}}{r} > 0.$$

Тогда,

$$\frac{R \pm \sqrt{R^2-r^2}}{r} > 1 \Rightarrow R \pm \sqrt{R^2-r^2} > r \\ \Rightarrow \sqrt{R^2-r^2} > r \mp R$$

Рассматривается две разные случаи данная неравенства:

$$1) \sqrt{R^2-r^2} > r+R \Rightarrow R^2-r^2 > R^2+2Rr+r^2 \Rightarrow r(R+r) < 0$$

это означает, что или $r < 0$ или $R < 0$. А такого не бывает. Потому, что радиус круг всегда принимает положительных значений т.е. всегда существует положительных значений R и r .

$$2) \sqrt{R^2-r^2} > r-R \Rightarrow R^2-r^2 > R^2-2Rr+r^2 \Rightarrow r(R-r) > 0$$

это полностью соответствует с условием существование круга. Потому, что в нашем случае $R > r$.

Тогда,

$$H-y = r \ln \frac{R+\sqrt{R^2-r^2}}{r} - x \quad (6)$$

Поставив (6) на (2) получим:

$$V_{f(x)} - \pi r^2 x = \pi R^2 \left(r \ln \frac{R+\sqrt{R^2-r^2}}{r} - x \right)$$

Отсюда можно выразить x через остальных параметров:

$$x = \frac{\pi R^2 r \ln \frac{R+\sqrt{R^2-r^2}}{r} - V_{f(x)}}{\pi(R^2-r^2)} \quad (7)$$

Теперь найдём объём катеноида $V_{f(x)}$ поставив (3) на (5) при $x_0 = H-y+x$ и $a = r$ при этом учитывается, что в нашем случае объём катеноид будет равно на половину целого катеноида:

$$V_{f(x)} = \frac{\pi}{2} \int_0^{H-y+x} r^2 \operatorname{ch}^2 \frac{x}{r} dx = \frac{\pi r^2}{2} \int_0^{H-y+x} \frac{\left(e^{-\frac{x}{r}} + e^{\frac{x}{r}}\right)^2}{4} dx = \frac{\pi r^2}{8} \int_0^{H-y+x} \left(e^{-\frac{2x}{r}} + 2 + e^{\frac{2x}{r}}\right) dx \\ = \frac{\pi r^2}{8} \left(\frac{r e^{-\frac{2x}{r}}}{-2} + 2x + \frac{r e^{\frac{2x}{r}}}{2} \right) \Big|_0^{H-y+x} = \frac{\pi r^2}{8} \left(\frac{r(e^{\frac{2(H-y+x)}{r}} - e^{-\frac{2(H-y+x)}{r}})}{2} + 2(H-y+x) \right) \\ = \frac{\pi r^2}{8} \left(r \operatorname{sh} \frac{2(H-y+x)}{r} + 2(H-y+x) \right)$$

Объединив данный полученный результат с (6) получим объём необходимый образуемому катеноида,

$$V_{f(x)} = \frac{\pi r^3}{8} \left(\operatorname{sh} \left(2 \ln \frac{R+\sqrt{R^2-r^2}}{r} \right) + 2 \ln \frac{R+\sqrt{R^2-r^2}}{r} \right) \quad (8)$$

Поставив (8) на (9) имеем:

$$x = \frac{R^2 r \ln \frac{R+\sqrt{R^2-r^2}}{r} - \frac{r^3}{8} \left(\operatorname{sh} \left(2 \ln \frac{R+\sqrt{R^2-r^2}}{r} \right) + 2 \ln \frac{R+\sqrt{R^2-r^2}}{r} \right)}{R^2-r^2} \quad (9)$$

Для приобретение второго фигура сначала исходя из значений радиусы цилиндров, используя формула (9) найдётся значения x затем используя формула (6) найдётся значения y и строится необходимая фигура.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В процессе программирования с использованием программного пакета Mathcad Prime 4.0 была получена катеноидальная форма, в наибольшей степени соответствующая поршню-ударнику пневматического перфоратора ПП-63 (рисунок 2). При этом масса катеноидальной части поршня-ударника была принята равной $m = 1,5$ кг,

плотность материала $\gamma = 7800$ кг/м³, параметр катены $a = 22$ мм, диаметр ударного рабочего торца $d = 44$ мм, а диаметр основной цилиндрической части со стороны неударного торца $D = 75$ мм.

На основе приведённых выше данных с использованием формул (8) и (9), в программной среде Mathcad Prime были выполнены аналитические расчёты. По результатам выполненных расчётов установлено, что при значении угла $\alpha = 61,5^\circ$ полукатеноидальная форма в наибольшей степени соответствует параметрам поршня-ударника данного перфоратора (рисунок 2). С целью наглядного и однозначного представления результатов, полученных на основе графического моделирования, а также для полного отображения криволинейных поверхностей, переходных зон и симметричных свойств формы, была разработана трёхмерная 3D модель объекта. Данная модель точно отражает его пространственную геометрию и служит основой для выполнения расчётных и моделирующих процедур.

При определении напряжённо-деформированного состояния, анализе ударных процессов, а также при расчёте массы, объёма и моментов инерции именно 3D-модель используется в качестве исходных данных. В

частности, в программных комплексах ANSYS и других средствах численного моделирования расчёты могут быть выполнены только при наличии пространственной модели объекта.

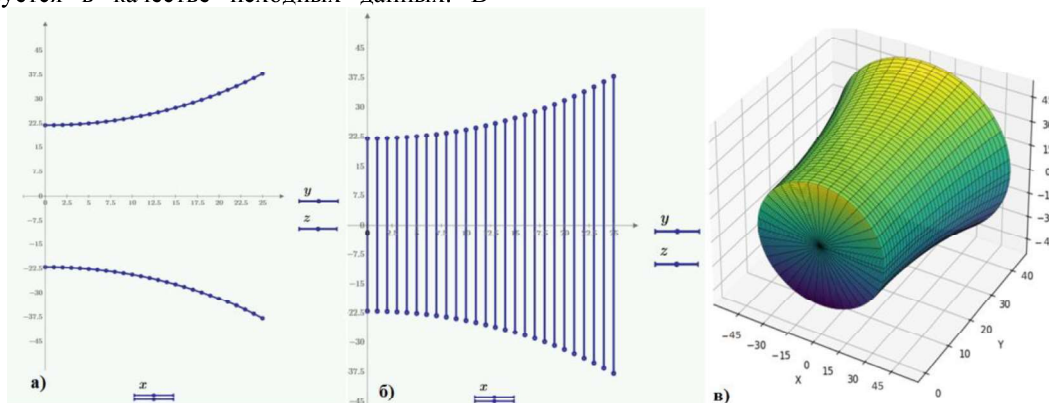


Рисунок 2. Метод формирования полукатеноидной формы цилиндрического поршня-ударника на основе математической модели и компьютерного программирования

Полученные результаты подтверждают геометрическую и конструктивную совместимость полукатеноидной формы с существующими параметрами серийного поршня-ударника.

В пневматических перфораторах конструкция поршней-ударников, как правило, предполагает наличие цилиндрической части. Основной причиной этого является необходимость обеспечения устойчивого и точного возвратно-поступательного движения поршня-ударника внутри цилиндрического корпуса. Именно цилиндрическая форма обеспечивает направленность движения, центровку поршня и корректное взаимодействие с внутренними поверхностями корпуса.

ВЫВОДЫ

В то же время применение поршней-ударников с криволинейной образующей боковой поверхности требует решения задачи их интеграции в существующие ударные механизмы. Для решения данной задачи в конструкцию выбранных ударников была введена поршневая часть цилиндро-полукатеноидальной формы (рисунок 3). Такое конструктивное решение позволяет, с одной стороны, сохранить преимущества криволинейной геометрии бойка в ударном процессе, а с другой — обеспечить возможность его применения в пневматических перфораторах с цилиндрическим корпусом.

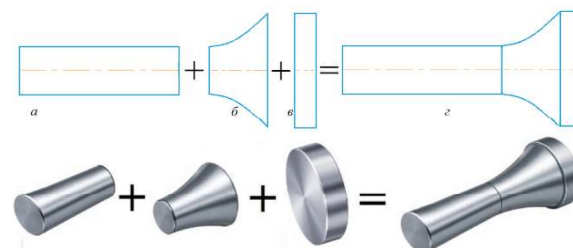


Рисунок 3. Способ установки в поршень-ударник части полукатеноидальной формы, где:

а—цилиндрическая часть поршня-ударника, передающая удар на бур; б—цилиндро-полукатеноидальная часть бойка; в—цилиндрическая часть, выполняющая направляющую функцию; г—поршень-ударник полукатеноидальной формы

Основные геометрические и массовые параметры сформированного поршня-ударника цилиндро-полукатеноидальной формы были разработаны на основе параметров поршней-ударников пневматических перфораторов ПП-63 и УТ-29, широко применяемых в практике.

Данный подход обеспечивает соответствие новой конструкции существующим технологическим и эксплуатационным требованиям, а также возможность её адаптации к ударным механизмам серийных пневматических перфораторов.

**PNEVMATIK PERFORATORLAR UCHUN POLIKATENOID SHAKLLI PORSHEN-ZARBA
MEKANIZMINI MATEMATIK MODELLASHTIRISH VA KOMPYUTER DASTURLARI
YORDAMIDA ISHLAB CHIQUISH**

B.O. Otajonov, T.J. Annaqulov, J.F.Yunusov

*Toshkent davlat texnika universiteti,
Toshkent, O'zbekiston.*

ANNOTATSIIYA Maqolada porshen-zarba mexanizmining silindrik shaklidan yarim katenoid geometrik shakliga o'tishni matematik modellashirish usuli ko'rib chiqilgan. Geometrik shakllar o'rtasidagi o'tish parametrik transformatsiya jarayoni sifatida tasvirlangan bo'lib, u uzluksiz va silliq matematik bog'lanishlarga asoslanadi. Bu esa boshlang'ich shaklning asosiy geometrik xususiyatlarini saqlab qolish va yakuniy geometriya parametrlarining bosqichma-bosqich shakllanishini ta'minlaydi.

Geometrik modelning uzluksizligi va differensiallanuvchanligini ta'minlash masalasiga alohida e'tibor qaratilgan. Bu o'tish zonasida keskin sinishlar va geometrik uzilishlar paydo bo'lishining oldini olish imkonini beradi. Ishlab chiqilgan matematik model asosida kompyuter dasturlari yordamida porshen-zarba mexanizmining yarim katenoid qismi yaratilgan. Taklif etilgan model kon mashinalarining zarb beruvchi elementlarini loyihalashda ularning geometriyasini optimallashtirish, kuchlanishlar konsentratsiyasini kamaytirish hamda konstruksiyada yuklamalar taqsimotini yaxshilash uchun qo'llanishi mumkin.

**KALIT
SO'ZLAR**

pnevmatik perforator, zarba tizimi, porshen-zarba mexanizmi, silindr, katenoid.

MATHEMATICAL MODELING AND CAD-BASED DESIGN OF POLYCATENOID-SHAPED PISTON-STRIKERS FOR PNEUMATIC PERFORATORS

B.O. Otajonov, T.J. Annaqulov, J.F.Yunusov

*Tashkent State Technical University,
Tashkent, Uzbekistan.*

ABSTRACT

This paper considers a method of mathematical modeling for the transformation of a piston-striker geometry from a conventional cylindrical shape to a polycatenoid form. The transition between the geometric configurations is described as a parametric transformation process based on continuous and smooth mathematical relationships. Such an approach ensures the preservation of the main geometric characteristics of the initial shape while enabling the gradual formation of the parameters of the final geometry.

Special attention is paid to maintaining the continuity and differentiability of the geometric model, which makes it possible to eliminate sharp discontinuities and geometric breaks in the transition zone. Based on the developed mathematical model, the polycatenoid section of the piston-striker was designed using computer-aided design (CAD) software. The proposed approach can be applied in the design of impact elements of mining machines in order to optimize their geometry, reduce stress concentration, and improve load distribution within the structure.

KEYWORD

pneumatic perforator, impact system, piston-striker, cylinder, catenoid.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алимов О. Д., Дворников Л. Т. Бурильные машины. М., «Машиностроение», 1976 г.
2. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. Изд. перераб. - М.: Наука, 1980.
3. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. Изд. 10-е. М.: Наука, 1973.
4. Жуков И. А., Дворников Л. Т. Теоретические обоснования форм ударяющих тел для машин ударного действия. В кн.: Наука и молодежь: на рубеже тысячелетий: Труды региональной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / Под общей редакцией СМ. Кулакова / СибГИУ. - Новокузнецк, 2000.
5. Жуков И. А. Применение ЭВМ в исследовании формирования ударного импульса в стержнях при ударе по ним бойками различных форм. В кн.: Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: Труды региональной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / Под общей редакцией С. М. Кулакова / СибГИУ. -Новокузнецк, 2002.
6. Дворников Л. Т., Жуков И. А. Анализ форм бойков ударных механизмов с точки зрения рациональности их применения. - В кн.: Научные технологии разработки и использование минеральных ресурсов: Материалы Международной научно-практической конференции. Сборник научных статей/. Под редакцией В. Н. Фрянова. Новокузнецк, 2003г.

7. Дворников Л. Т., Жуков И. А. Использование катеноидальных бойков в ударных системах технологического назначения. - В кн.: Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-9-2003): Доклады 9-й Международной научно-практической
8. *Technical Requirements and Test Methods for Pneumatic Perforators, State Standard of Russia*. Moscow, 1999.
9. Ivanov K.I., Latyshev V.A., Andreev V.D. (1987). *Drilling Technology in the Development of Mineral Deposits*, M.: Nedra., 272 p.
10. Gabov V.V., Lykov Yu.V. (2010). *Design of Drilling Machines for Underground Works.*, Saint Petersburg.
11. Mishchenko O.A., Tishchenko V.P. *Life Safety*, Pacific State University Publishing House, 2014. - 338 .
12. Krupenin V.L. (2009). *Impact and Vibro-Impact Machines and Devices. Bulletin of Scientific and Technical Development*, No. 4 (20).
13. Tulkin, Annakulov; Ziyadov, Nusratullo; Abdikarimov, Farhod. Analysis of overburden transportation by conveyor transport as part of a cyclic-flow technology. *E3S Web of Conferences*. Том 414. 25 August 2023. Номер статьи 06006. 6 September 2023. Код 191994. DOI 10.1051/e3sconf/202341706006.
14. Annakulov, T., Gaibnazarov, S., Askarov, A., Mamadiyeva, L. Prospects for the use of cyclic-flow technology for the transportation of rocks at the Yoshlik-1 quarry of JSC Almalyk mining and metallurgical combine. *E3S Web of Conferences*, Том 414. 25 August 2023. Номер статьи 06007. 6 September 2023. Код 191994. DOI 10.1051/e3sconf/202341706007.
15. Bulatov, G., Annakulov, T. Investigation of the width of the entry of an excavator when loading a mobile crushing plant in the conditions of the Angren coal mine of Uzbekistan. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 937(4), 042088. DOI 10.1088/1755-1315/937/4/042088.
16. Annakulov, T. Development of technological schemes for open-pit mining of deposits using mobile crushing-reloading-conveyor complexes. *E3S Web of Conferences*, 2020, 201, 01010. DOI 10.1051/e3sconf/202020101010.
17. Annakulov T. J., Temirov K. M., Otajonov B.O., Yunusov J. F., Norimonov Sh.N. Justification of equipment parameters for mobile crushing-reloading-conveyor complexes in open-pit mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(12-3):5—22. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_123_0_5.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Annakulov	— PhD, Associate professor of the department of Mining Electromechanics; Tashkent State
Tulkin	Technical University, 100095, Tashkent, University Str., 2, Republic of Uzbekistan
Jovbekovich	ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3106-144X , e-mail: a.tulkin1275@yandex.ru
Otajonov	— Senior lecturer of the department of Mining Electromechanics; Tashkent State Technical
Bahrom	University, 100095, Tashkent, University Str., 2, Republic of Uzbekistan
Otaboevich	ORCID: bahrom9097@yandex.com
Yunusov	— Assistant of the department of Mining Electromechanics; Tashkent State Technical
Jasurbek	University, 100095, Tashkent, University Str., 2, Republic of Uzbekistan
Farhod o'g'li	ORCID: https://orcid.org/0009-0002-5126-0059 e-mail: jasurbekyunusov@tdtu.uz