ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2019;(6):156-164

УДК 624.191.6:622 DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-156-164

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ ТОННЕЛЕПРОХОДЧЕСКИХ МАШИН

А.Б. Жабин[1,2], А.В. Поляков[1,2], Е.А. Аверин[3], Ю.Н. Линник[4]

[1] Тульский государственный университет, Тула, Россия, e-mail: polyakoff-an@mail.ru
[2] Тульское региональное отделение межрегиональной общественной организации Академия горных наук, Тула, Россия
[3] ООО «Скуратовский опытно-экспериментальный завод», Тула, Россия
[4] Государственный университет управления, Москва, Россия

Аннотация: При строительстве тоннелей различного назначения в России используется в основном зарубежное оборудование. Рассмотрена проблема почти полного отсутствия в России опыта проектирования тоннелепроходческих щитов. Приведены основные технологические и конструктивные параметры щитов, которые необходимо использовать в проектных расчетах. Отмечено, что схема расстановки породоразрушающего инструмента на исполнительном органе во многом определяет эффективность применения щита. Предложено для силового расчета исполнительного органа щита, оснащенного дисковыми шарошками типа CCS использовать методику Колорадского горного университета (США), отражена сущность этой методики и представлены ее расчетные зависимости. Отражено состояние вопроса расстановки породоразрушающего инструмента на исполнительном органе. Показаны негативные последствия ошибок и неправильного выбора схемы расстановки, к которым относятся повышенный износ подшипникового узла и повышенный расход инструмента. Приведены основные схемы и зависимости, позволяющие разработать конфигурации расстановки рабочих инструментов на исполнительном органе и пригодные для использования в системах автоматического проектирования.

Ключевые слова: тоннелепроходческий щит, ТПМК, исполнительный орган, дисковая шарошка типа CCS, силовой расчет, методика Колорадского горного университета, схемы расстановки инструмента, расчетные зависимости.

Для цитирования: *Жабин А. Б., Поляков А. В., Аверин Е. А., Линник Ю. Н.* Основы проектирования исполнительных органов тоннелепроходческих машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 6. – С. 156–164. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-156-164.

Design basis for tunnel boring machine cutter heads

A.B. Zhabin[1,2], A.V. Polyakov[1,2], E.A. Averin[3], Yu.N. Linnik[4]

[1] Tula State University, Tula, Russia, e-mail: polyakoff-an@mail.ru
[2] Tula Regional Department of the Academy of Mining Sciences, Tula, Russia
[3] OOO Skuratovsky Experimental Plant, Tula, Russia
[4] State University of Management, Moscow, Russia

Abstract: Various-purpose tunnel construction in Russia uses mostly foreign manufacture equipment. In this respect, the article discusses the problem of Russia's lack of experience in design of shielded tunnel boring machines. The main technological and design parameters of TBMs to be included in the design calculations are presented. It is emphasized that pattern array of rock-breaking

© А.Б. Жабин, А.В. Поляков, Е.А. Аверин, Ю.Н. Линник. 2019.

tools on the cutter head in many ways governs the machine efficiency. It is proposed to calculate forces on the TBM cutter head equipped with the constant cross section (CCS) disc cutters using the Colorado School of Mines (USA) model. The essence and relations within this model are described. The aspect of the rock-breaking tool arrangement on the cutter heard is discussed. The negative consequences of wrong or improper choice of a setout, e.g. increased wear of bearing assembly or cutters, are illustrated. The main schemes and relations, that allow proper arrangement of cutters on the cutter head and are applicable in automated design systems, are presented.

Key words: shielded tunnel boring machine, TBM assembly, cutter head, CCS disc cutter, force calculation, Colorado School of Mines model, cutter arrangement schemes, design calculation.

For citation: Zhabin A. B., Polyakov A. V., Averin E. A., Linnik Yu. N. Design basis for tunnel boring machine cutter heads. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(6):156-164. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-156-164.

Введение

В настоящее время в России существует явный дефицит щитовых тоннелепроходческих механизированных комплексов (ТПМК) собственного производства. Эти машины широко используются при строительстве тоннелей различного назначения и в различных условиях: канализационных, железнодорожных, метро, высокоскоростных автомобильных трасс в мягких грунтах и крепких скальных породах, в урбанизированных районах, в горах и под морским дном и пр. Подобные проекты в России реализуются в рамках расширения действующих сетей метрополитена в Москве и Санкт-Петербурге. На данных проектах используется в основном зарубежное оборудование, например фирмы Herrenknecht (Германия) в Санкт-Петербурге [1], и Robbins Company (США-Канада) в Москве [2, 3]. Единственный отечественный ТПМК был разработан для санкт-петербургского метро [4]. Однако он до сих пор не применялся. Таким образом, очевидно, что российские производители сильно отстают на данном рынке горнопроходческой техники.

Общие положения проектирования исполнительных органов тоннелепроходческих щитов

Каждый ТПМК является уникальным вследствие своей негибкости из-за невозможности избирательной обработки забоя и вариативности специфических требований на каждом проекте. Исполнительный орган тоннелепроходческих машин, которые относятся к горнопроходческим машинам неизбирательного действия, взаимодействует одновременно со всей поверхностью забоя, так что все рабочие инструменты всегда находятся в контакте с горной породой. Главной задачей, на решении которой следует сосредоточиться для успешной эксплуатации ТПМК, является соответствие рабочих параметров машины горно-геологическим условиям [5]. К числу основных конструктивных и технологических параметров, определяющих работу ТПМК, относятся диаметр машины, установленная мощность, крутящий момент, усилие подачи, частота вращения рабочего органа, тип применяемых породоразрушающих инструментов и их размеры, свойства горных пород и горно-геологические условия [6].

В настоящее время стандартным инструментом для разрушения горных пород при оснащении ТПМК являются дисковые шарошки типа CCS (от англ. constant cross section) диаметром от 330 мм (13 дюймов) до 508 мм (20 дюймов) [7]. Среди них чаще всего используются шарошки размером 432 мм (17 дюймов) и 493 мм (19 дюймов) [8]. Важным при проектировании рабочего органа являет-

ся выбор подходящего расстояния между инструментами [9]. Расстояние между соседними инструментами определяет эффективность принятой схемы разрушения вместе с глубиной их внедрения в массив. Она зависит от способности машины с заданными параметрами (установленная мощность и крутящий момент) разрушать горные породы с определенными прочностными свойствами [10].

Силовой расчет

Основой силового расчета исполнительных органов горнопроходческих машин является определение нагруженности инструментов в процессе разрушения горных пород. Как было установлено ранее, отечественные методы не могут использоваться для прогнозирования нагруженности дисковых шарошек типа CCS [11].

Среди методик силового расчета исполнительных органов ТПМК, как отечественных (наиболее современная версия разработана в Тульском государственном университете совместно с ООО «Скуратовский опытно-экспериментальный завод» [12]), так и зарубежных (особенно выделяются методики Норвежского технологического университете [13, 14] и Колорадского горного университета [15]).

В качестве основной предпочтительно принимать методику Колорадского горного университета. Она является довольно простой, понятной и легко реализуемой, а ее высокая степень достоверности, надежности и адекватности реальному процессу разрушения горных пород дисковыми шарошками была подтверждена путем лабораторных и полевых экспериментов [16, 17].

Сущность метода заключается в итерационном подборе величины глубины внедрения в горный массив за один оборот исполнительного органа (пенетрация) до достижения предельных величин, удовлетворяющих трем ограничениям:

- предел усилия подачи — несущая способность подшипников меняется в зависимости от размера дисковой шарошки (максимальное напорное усилие на одной шарошке типа CCS в настоящее время ограничено величиной 250 кН для 17-дюймовых инструментов и 310 кН — для 19-дюймовых [18]);
- предел крутящего момента на исполнительном органе для заданной скорости вращения;
- предел по геометрии дисковой шарошки — глубина внедрения шарошки в массив не может превышать разницы между радиусом режущего диска и радиусом подшипника.

Сам процесс разрушения выглядит следующим образом. Горная порода под шарошкой разрушается до состояния пыли, что делает процесс вдавливания инструмента в массив похожим на гидростатическое давление, вызывающее зарождение и дальнейший рост радиальных трещин. По мере роста трещин некоторые из них достигают соседние линии резания, что приводит к формированию осколков (фрагментов) породы. Детальный анализ, в том числе с использованием высокоскоростной съемки разрушения горных пород дисковой шарошкой, позволил выявить основные факторы, в наибольшей степени влияющие на эффективность разрушения. В качестве свойств горных пород, характеризующих их прочность, были приняты пределы прочности на сжатие и растяжение. Предел прочности на сжатие описывает разрушение породы вследствие вдавливания инструмента в массив, а предел прочности на растяжение — учитывает радиальное растрескивание. Таким образом, зависимость глубины резания от усилия вдавливания выражается через геометрические показатели режущей кромки шарошки и ее диаметра.

Усилие в данной модели определяется как

$$F = 2{,}12RT\gamma \cdot \sqrt[3]{\frac{s\sigma_{сж}^2\sigma_p}{\gamma\sqrt{Rt}}},$$

где R — радиус шарошки, мм; t — ширина режущей кромки шарошки, мм; s — расстояние между инструментами в соседних линиях скалывания (шаг скалывания) мм; $\sigma_{сж}$ — предел прочности горной породы на сжатие, МПа; $\sigma_р$ — предел прочности горной породы на растяжение, МПа; γ — угол контакта шарошки с горным массивом, который определяется по формуле

$$\gamma = \arccos\frac{R-p}{R},$$

где р — пенетрация, мм.

Совокупное напорное усилие на забой от исполнительного органа равно результату умножения нормального усилия на число шарошек n

$$F_T = n \cdot F \cdot \cos\frac{\gamma}{2}.$$

Крутящий момент определяется как

$$RPM = \frac{V_{кр}}{\pi \cdot D_{ТВМ}},$$

где $D_{ТВМ}$ — диаметр исполнительного органа, м.

Скорость вращения исполнительного органа

$$RPM = \frac{V_{кр}}{\pi \cdot D_{ТВМ}},$$

где $V_{кр}$ — максимально допустимая линейная скорость шарошки (для 17-дюймовых шарошек — 165 м/мин, для 19-дюймовых — 200 м/мин [19]).

Необходимая мощность

$$N = \frac{T \cdot RPM}{5250}.$$

Расстановка рабочих инструментов на исполнительном органе

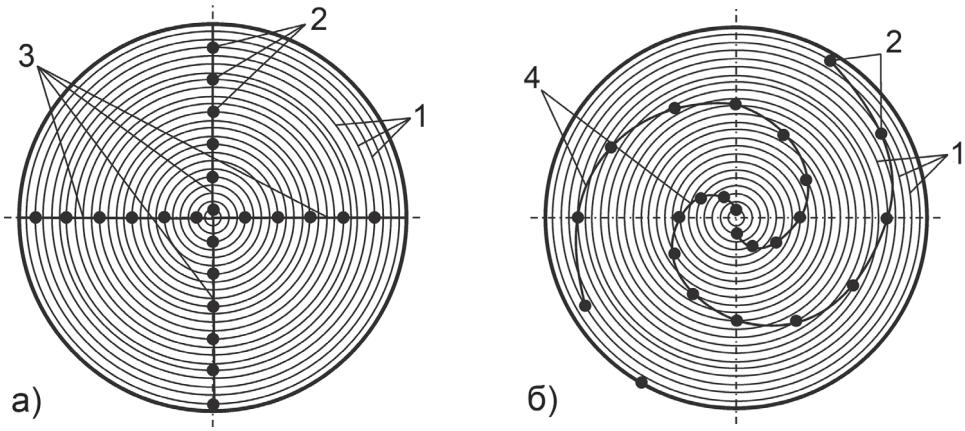
Первое, на что следует обратить внимание при проектировании исполнительного органа, это форма профиля его рабочей части. Традиционно развивались три вида профилей: конические, куполовидные и плоские. В настоящее время машиностроители по всему миру конструируют преимущественно ТПМК с плоским профилем рабочей части, что обусловлено высокой эффективностью взаимодействия рабочих инструментов с горным массивом, а также простотой проектирования и технического обслуживания [18].

Далее следует расположить породоразрушающие инструменты на рабочей поверхности исполнительного органа. Как правило, инструменты располагают на одинаковом расстоянии s друг от друга, следуя принципу обеспечения оптимального соотношения шага скалывания s к глубине внедрения p, при котором обеспечивается наименьшая энергоемкость разрушения горных пород [20]. Для применяемых в настоящее время дисковых шарошек типа CCS оптимальное отношение расстояния между инструментами s к величине пенетрации p обычно находится в диапазоне от 10 до 20 [18]. Учитывая наиболее часто встречающийся диапазон изменения пенетрации, расстояние между породоразрушающими инструментами назначают 75—100 мм; причем большие значения характерны для слабых, хрупких, легко поддающихся разрушению горных пород [18].

Общее число инструментов, которое требуется установить на исполнительном органе при заданном расстоянии между ними, определяется по формуле [18]

$$N = \frac{D_{ТВМ} - 500}{2 \cdot s} + 15.$$

Следующим важным шагом является выбор схемы расположения инструментов на исполнительном органе, поскольку она оказывает существенное влияние на производительность по проходке, срок службы всего исполнительного органа, а также его отдельных элементов, уровень вибраций в процессе работы и т.д. [21]. Неправильно выбранная схе-



Схемы расстановки рабочих инструментов на исполнительном органе ТПМК: лучевая схема с четырьмя лучами (а); спиральная схема с двумя спиралями (б); 1 — линии резания; 2 — рабочий инструмент; 3 — лучи; 4 — спирали

Schemes of tools layout for TBMs: fourray star (a); two-spirals (b); 1 — lines of cut; 2 — tools; 3 — rays; 4 — spirals

ма расположения рабочих инструментов приводит к возникновению эксцентриситета в распределении нагрузки на исполнительном органе, что негативно сказывается на долговечности основного подшипникового узла и требует проведения на постоянной основе специальных мероприятий по выравниванию ТПМК относительно требуемой (заданной по проекту) оси горной выработки [22, 23]. Кроме того, увеличивается расход инструмента [24, 25]. Во избежание обозначенных проблем сумма моментов от усилий, действующих на рабочие инструменты в процессе разрушения горного массива, должна быть равна нулю [18, 21, 24]. Однако в настоящее время универсального решения расположения инструментов на исполнительных органах ТПМК не существует даже для идеализированных моделей по разрушению изотропных и гомогенных горных пород. Вообще исследования в данном направлении активизировались относительно недавно, поскольку до последнего времени ТПМК применялись в основном при проходке по слабым и средним породам, и обозначенные проблемы с эксцентриситетом распределения моментов от действующих на рабочих инструментах усилий не были явно выражены. Однако в настоящее время стало возможным разрушать крепкие и особо крепкие горные породы.

Существует две основные схемы расположения породоразрушающих инструментов на исполнительном органе: лучевая и спиральная. При лучевой схеме каждая группа инструментов располагается на одном луче (рисунок, *а*). Причем количество групп соответствует количеству лучей. В спиральной схеме инструменты, относящиеся к одной спирали, располагаются на некотором заранее заданном угловом расстоянии друг от друга (рисунок, *б*).

В связи с развитием систем автоматического проектирования возникает необходимость в описании схем расстановки инструмента на «языке, понятном компьютеру». С этой целью можно использовать следующие выражения:

- для лучевой схемы

$$\gamma_i = 2\pi \cdot \left(\frac{i-1}{n_л} - \left[\frac{i}{n_л} - \varepsilon \right] \right), \qquad (1)$$

где γ — угловое расстояние между инструментами, рад.; i — порядковый номер инструмента; $n_л$ — количество лучей; ε — бесконечно малая величина.

• для спиральной схемы

$$\gamma_i = \left(i - n_{сп} \cdot \left[\frac{i}{n_{сп}} - \varepsilon \right] - 1 \right) \cdot \frac{2\pi}{n_{сп}} + \\ + \gamma \cdot \left[\frac{i}{n_{сп}} - \varepsilon \right] - \chi, \quad (2)$$

где $n_{сп}$ — количество спиралей; χ — величина, позволяющая «удерживать» значение угла установки породоразрушающего инструмента в пределах $[0;2\pi)$, которая определяется по формуле

$$\chi = 2\pi \cdot \left[\left(i - n_{сп} \cdot \left[\frac{i}{n_{сп}} - \varepsilon \right] - 1 \right) \cdot \frac{2\pi}{n_{сп}} + \\ + \gamma \cdot \left[\frac{i}{n_{сп}} - \varepsilon \right] \cdot (2\pi)^{-1} \right]. \quad (3)$$

В формулах (1) — (3) полуквадратные скобки означают округление получившихся при вычислениях в них величин до ближайших меньших целых значений.

Проблема выбора оптимальных или рациональных значений количества лучей или спиралей (в зависимости от схемы) и углового расстояния между инструментами в настоящее время не имеет универсального решения, так как кроме инструментов на исполнительном органе также располагаются различные отверстия для доступа людей к забою и уборки разрушенной горной массы.

Заключение

В процессе проектирования исполнительных органов тоннелепроходческих машин следует отталкиваться от условий эксплуатации, то есть спроектированный исполнительный орган должен, в первую очередь, обеспечивать эффективное разрушение горного массива с присущими слагающим его горным породам прочностными свойствами. При этом следует учитывать накладываемые установленной мощностью и свойствами современных рабочих инструментов ограничения, обуславливающих теоретическую производительность, выраженную пенетрацией (глубиной проникновения машины в горный массив за оборот исполнительного органа). Следует ответственно подойти к расстановке породоразрушающих инструментов на исполнительном органе для того чтобы эксплуатационная производительность была как можно ближе к теоретической. Важным параметром расстановки является расстояние между соседними инструментами, рекомендуемое значение для которого составляет 75—100 мм в радиальном направлении. Угол между соседними инструментами характеризует схему расстановки инструментов: если он нулевой, то имеет место лучевая схема расстановки, а если ненулевой — то спиральная.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Юнгмейстер Д.А., Ячейкин А.И.* Модернизация исполнительного органа тоннелепроходческого механизированного комплекса Herrenknecht S-782 // Горное оборудование и электромеханика. — 2017. — № 3. — С. 3—7.

2. *Roby J., Willis D.* Achieving fast EPB advance in mixed ground. A study of contributing factors / Proc. North American Tunneling. 2014. Pp. 182—194.

3. *Gerasimova V.* Underground Engineering and Trenchless Technologies at the Defense of Environment // Procedia Engineering. 2016, vol. 165, pp. 1395—1401. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.870.

4. *Антипов В.В., Антипов Ю.В., Наумов Ю.Н.* Комплекс КТПМ-5,6/6,0: новый шаг в проектировании отечественной техники для строительства тоннелей для метрополитенов // Горное оборудование и электромеханика. — 2012. — № 4. — С. 23—26.

5. *Zhao J., Gong Q.M., Eisensten Z.* Tunnelling through a frequently changing and mixed ground. A case history in Singapore // Tunnelling and Underground Space Technology. 2007, vol. 22, no 4, pp. 388—400. DOI: 10.1016/j.tust.2006.10.002.

6. *Balci C.*, *Tumac D.* Investigation into the effects of different rocks on rock cuttability by a V-type disc cutter //Tunnelling and underground space technology. 2012, vol. 30, pp. 183—193. DOI: 10.1016/j.tust.2012.02.018.

7. *Li F. H.*, *Cai Z. X.*, *Kang Y. L.* A theoretical model for estimating the wear of the disc cutter // Applied mechanics and materials. 2011, vol. 90, pp. 2232—2236. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.90-93.2232.

8. *Rostami J.* Study of pressure distribution within the crushed zone in the contact area between rock and disc cutters // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2013, vol. 57, pp. 172—186. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2012.07.031.

9. *Cho J. W.*, *Jeon S.*, *Yu S. H.*, *Chang S. H.* Optimum spacing of TBM disc cutters. A numerical simulation using the three-dimensional dynamic fracturing method // Tunnelling and Underground Space Technology. 2010, vol. 25, no 3, pp. 230—244. DOI: 10.1016/j.tust.2009.11.007.

10. *Yagiz S.* Utilizing rock mass properties for predicting TBM performance in hard rock condition //Tunnelling and Underground Space Technology. 2008, vol. 23, no 3, pp. 326—339. DOI: 10.1016/j.tust.2007.04.011.

11. *Жабин А. Б.*, *Поляков А. В.*, *Аверин Е. А.* Сопоставление отечественных и зарубежных методов расчета усилий на лобовых дисковых шарошках при разрушении горных пород // Горный журнал. — 2018. — № 12. — С. 65—68. DOI: 10.17580/gzh.2018.12.13.

12. *Жабин А. Б.*, Поляков Ан.В., Поляков Ал.В., *Фомичев А. Д.*, *Антипов Ю. В.* Расчет роторного исполнительного органа тоннелепроходческого механизированного комплекса КТПМ-6,0 // Горное оборудование и электромеханика. — 2012. — № 2, pp. 16—23.

13. *Bruland A.* Hard rock tunnel boring: PhD Thesis. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology, 1998.

14. *Macias F. J.* Hard Rock Tunnel Boring: Performance Predictions and Cutter Life Assessments: PhD Thesis. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2016.

15. *Rostami J.* Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical modeling and physical measurement of crushed zone pressure: PhD Thesis. Golden, Colorado, USA: Colorado School of Mines, 1997.

16. *Balci C.* Correlation of rock cutting tests with field performance of a TBM in a highly fractured rock formation. A case study in Kozyatagi-Kadikoy metro tunnel, Turkey // Tunnelling and Underground Space Technology. 2009, vol. 24, no 4, pp. 423—435. DOI: 10.1016/j.tust.2008.12.001.

17. *Tumac D.*, *Balci C.* Investigations into the cutting characteristics of CCS type disc cutters and the comparison between experimental, theoretical and empirical force estimations // Tunnelling and Underground Space Technology. 2015, vol. 45, pp. 84—98. DOI: 10.1016/j.tust.2014.09.009.

18. *Rostami J.*, *Chang S. H.* A Closer Look at the Design of Cutterheads for Hard Rock Tunnel-Boring Machines // Engineering. 2017. T.3, no 6, pp. 892—904. DOI: 10.1016/j.eng.2017.12.009.

19. *Frenzel C.*, *Käsling H.*, *Thuro K.* Factors influencing disc cutter wear // Geomechanik und Tunnelbau. 2008, vol. 1, no 1, pp. 55—60. DOI: 10.1002/geot.200800006.

20. *Жабин А. Б.*, *Поляков Ан. В.*, *Поляков Ал. В.*, *Мурашов В. В.* Оптимизация расположения резцов на коронках исполнительных органов проходческих комбайнов // Горный журнал. — 2016. — № 12. — С. 73—82. DOI: 10.17580/gzh.2016.12.16.

21. *Huo J.*, *Sun W.*, *Chen J.*, *Zhang X.* Disc cutters plane layout design of the full-face rock tunnel boring machine (TBM) based on different layout patterns // Computers & industrial engineering. 2011, vol. 61, no 4, pp. 1209—1225. DOI: 10.1016/j.cie.2011.07.011.

22. *Huo J.*, *Hanyang W.*, *Jing Y.*, *Wei S.*, *Guangqing L.*, *Xiaolong S.* Multi-directional coupling dynamic characteristics analysis of TBM cutterhead system based on tunnelling field test // Journal of mechanical science and technology. 2015, vol. 29, no 8, pp. 3043—3058. DOI: 10.1007/s12206-015-0701-1.

23. *Han M. D.*, *Cai Z. X.*, *Qu C. Y.*, *Jin L. S.* Dynamic numerical simulation of cutterhead loads in TBM tunnelling // Tunnelling and Underground Space Technology. 2017, vol. 70, pp. 286—298. DOI: 10.1016/j.tust.2017.08.028.

24. *Chen Y.*, *Wei T.*, *Gong T.* Research on optimal layout of cutter-head system of rock tunnel-boring machine based on Archimedes spiral theory //Advances in Mechanical Engineering. 2018, vol. 10, no 2, pp. 1—10. DOI: 10.1177/1687814018759352.

25. *Geng Q., Bruland A., Macias F.J.* Analysis on the relationship between layout and consumption of face cutters on hard rock tunnel boring machines (TBMs) // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2018, vol. 51, no 1, pp. 279—297. DOI:10.1007/s00603-017-1320-1. ГИАБ

REFERENCES

1. Yungmeyster D.A., Yacheykin A.I. Modernization of Executive Device of the Tunnel-Boring Mechanized Herrenknecht S-782 Complex. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2017, no 3, pp. 3—7. [In Russ].

2. Roby J., Willis D. Achieving fast EPB advance in mixed ground. A study of contributing factors. *Proc. North American Tunneling*. 2014. Pp. 182—194.

3. Gerasimova V. Underground Engineering and Trenchless Technologies at the Defense of Environment. *Procedia Engineering*. 2016, vol. 165, pp. 1395—1401. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.870.

4. Antipov V.V., Antipov Yu.V., Naumov Yu.N. KTPM-5,6/6,0 Complex: New Step in Design of Domestic Techniques for Underground Tunnel Building. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2012, no 4, pp. 23—26. [In Russ].

5. Zhao J., Gong Q.M., Eisensten Z. Tunnelling through a frequently changing and mixed ground. A case history in Singapore. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2007, vol. 22, no 4, pp. 388—400. DOI: 10.1016/j.tust.2006.10.002.

6. Balci C., Tumac D. Investigation into the effects of different rocks on rock cuttability by a V-type disc cutter. *Tunnelling and underground space technology*. 2012, vol. 30, pp. 183—193. DOI: 10.1016/j.tust.2012.02.018.

7. Li F.H., Cai Z.X., Kang Y.L. A theoretical model for estimating the wear of the disc cutter. *Applied mechanics and materials*. 2011, vol. 90, pp. 2232—2236. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.90-93.2232.

8. Rostami J. Study of pressure distribution within the crushed zone in the contact area between rock and disc cutters. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2013, vol. 57, pp. 172—186. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2012.07.031.

9. Cho J.W., Jeon S., Yu S.H., Chang S.H. Optimum spacing of TBM disc cutters. A numerical simulation using the three-dimensional dynamic fracturing method. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2010, vol. 25, no 3, pp. 230—244. DOI: 10.1016/j.tust.2009.11.007.

10. Yagiz S. Utilizing rock mass properties for predicting TBM performance in hard rock condition. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2008, vol. 23, no 3, pp. 326—339. DOI: 10.1016/j.tust.2007.04.011.

11. Zhabin A.B., Polyakov A.V., Averin E.A. Comparison of methods to calculate forces on frontal disc cutters in rock breaking process in Russia and abroad. *Gornyy zhurnal*. 2018, no 12, pp. 65—68. DOI: 10.17580/gzh.2018.12.13. [In Russ].

12. Zhabin A.B., Polyakov An.V., Polyakov Al.V., Fomichev A.D., Antipov Yu.V. Calculation of a Rotory Executive Body for Tunneling Complex KTPM-6.0. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2012, no 2, pp. 16—23. [In Russ].

13. Bruland A. *Hard rock tunnel boring*: PhD Thesis. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology, 1998.

14. Macias F.J. *Hard Rock Tunnel Boring: Performance Predictions and Cutter Life Assessments*: PhD Thesis. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2016.

15. Rostami J. *Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical modeling and physical measurement of crushed zone pressure*: PhD Thesis. Golden, Colorado, USA: Colorado School of Mines, 1997.

16. Balci C. Correlation of rock cutting tests with field performance of a TBM in a highly fractured rock formation. A case study in Kozyatagi-Kadikoy metro tunnel, Turkey. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2009, vol. 24, no 4, pp. 423—435. DOI: 10.1016/j.tust.2008.12.001.

17. Tumac D., Balci C. Investigations into the cutting characteristics of CCS type disc cutters and the comparison between experimental, theoretical and empirical force estimations. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2015, vol. 45, pp. 84—98. DOI: 10.1016/j.tust.2014.09.009.

18. Rostami J., Chang S.H. A Closer Look at the Design of Cutterheads for Hard Rock Tunnel-Boring Machines. *Engineering*. 2017. T.3, no 6, pp. 892—904. DOI: 10.1016/j.eng.2017.12.009.

19. Frenzel C., Käsling H., Thuro K. Factors influencing disc cutter wear. *Geomechanik und Tunnelbau*. 2008, vol. 1, no 1, pp. 55—60. DOI: 10.1002/geot.200800006.

20. Zhabin A. B., Polyakov An. V., Polyakov Al. V., Murashov V. V. Optimization of cutter pattern on cutting heads of continuous heading machines. *Gornyy zhurnal*. 2016, no 12, pp. 73—82. DOI: 10.17580/gzh.2016.12.16. [In Russ].

21. Huo J., Sun W., Chen J., Zhang X. Disc cutters plane layout design of the full-face rock tunnel boring machine (TBM) based on different layout patterns. *Computers & industrial engineering*. 2011, vol. 61, no 4, pp. 1209—1225. DOI: 10.1016/j.cie.2011.07.011.

22. Huo J., Hanyang W., Jing Y., Wei S., Guangqing L., Xiaolong S. Multi-directional coupling dynamic characteristics analysis of TBM cutterhead system based on tunnelling field test. *Journal of mechanical science and technology*. 2015, vol. 29, no 8, pp. 3043—3058. DOI: 10.1007/s12206-015-0701-1.

23. Han M. D., Cai Z. X., Qu C. Y., Jin L. S. Dynamic numerical simulation of cutterhead loads in TBM tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2017, vol. 70, pp. 286—298. DOI: 10.1016/j.tust.2017.08.028.

24. Chen Y., Wei T., Gong T. Research on optimal layout of cutter-head system of rock tunnel-boring machine based on Archimedes spiral theory. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018, vol. 10, no 2, pp. 1—10. DOI: 10.1177/1687814018759352.

25. Geng Q., Bruland A., Macias F. J. Analysis on the relationship between layout and consumption of face cutters on hard rock tunnel boring machines (TBMs). *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2018, vol. 51, no 1, pp. 279—297. DOI:10.1007/s00603-017-1320-1.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жабин Александр Борисович[1,2] — доктор технических наук, профессор,
действительный член АГН, Президент ТРО МОО АГН, e-mail: zhabin.tula@mail.ru,
Поляков Андрей Вячеславович[1,2] — доктор технических наук, профессор,
академический советник АГН, e-mail: polyakoff-an@mail.ru,
Аверин Евгений Анатольевич — кандидат технических наук,
инженер-конструктор, e-mail: evgeniy.averin.90@mail.ru,
ООО «Скуратовский опытно-экспериментальный завод»,
Линник Юрий Николаевич — доктор технических наук, профессор,
e-mail: yn_linnik@guu.ru, Государственный университет управления,
[1] Тульский государственный университет,
[2] Тульское региональное отделение межрегиональной общественной организации
Академия горных наук (ТРО МОО АГН).
Для контактов: Поляков А.В., e-mail: polyakoff-an@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.B. Zhabin[1,2], Dr. Sci. (Eng.), Professor, Full Member of the Academy
of Mining Sciences, President of the Tula Regional Department
of the Academy of Mining Sciences, e-mail: zhabin.tula@mail.ru,
A.V. Polyakov[1,2], Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academic Advisor
of the Academy of Mining Sciences, e-mail: polyakoff-an@mail.ru,
E.A. Averin, Cand. Sci. (Eng.), Engineer-Designer,
e-mail: evgeniy.averin.90@mail.ru,
OOO Skuratovsky Experimental Plant, 300911, Tula, Russia,
Yu.N. Linnik, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: vy_linnik@guu.ru,
State University of Management, 109542, Moscow, Russia,
[1] Tula State University, 300012, Tula, Russia,
[2] Tula Regional Department of the Academy of Mining Sciences,
300028, Tula, Russia.
Corresponding author: A.V. Polyakov, e-mail: polyakoff-an@mail.ru.