

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ТОННЕЛЕПРОХОДЧЕСКОГО МЕХАНИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА S-782

Д.А. Юнгмейстер<sup>1</sup>, М.И. Тимофеев<sup>1</sup>, А.И. Исаев<sup>1</sup>, Э.Э. Гасымов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия,  
e-mail: azayli.emil@gmail.com

**Аннотация:** Система метрополитена Санкт-Петербурга нуждается в быстром развитии, что вызывает необходимость увеличения скорости проходки тоннелей и повышения безопасности этой проходки. Рассмотрены особенности работы тоннелепроходческого комплекса S-782 при проходке двухпутных тоннелей диаметром 10,3 м в сложных горно-геологических условиях Санкт-Петербурга. Описаны аварийные ситуации, которые возникают при применении существующего оборудования. Рассмотрена возможность модернизации проходческого щита с помощью виброактивных шарошек, представлены расчеты усилий на шарошках и расчеты параметров вибратора, приводящего шарошки в движение. Идея модернизации инструментов исполнительного органа комплекса заключается в применении нового типа шарошек; проведен поиск возможного исполнения приводящих механизмов. Предложена модернизация щита с заменой пассивных резцов на виброактивные с приведением возможного исполнения инструмента в графическом виде. Для приведения в движение виброактивных шарошек и резцов предлагается использование пневматических и электромагнитных вибраторов. Показан разрез исполнительного органа проходческого щита с предлагаемыми модернизациями. Использование виброактивного инструмента позволит снизить вероятность аварийного износа породоразрушающего инструмента и как следствие уменьшить количество и длительность аварийных простоев, а также увеличить производительность проходческого комплекса.

**Ключевые слова:** тоннелепроходческий комплекс, метрополитен, известняк, дисковые шарошки, резцы, дебалансная система, вибратор, скорость проходки тоннелей.

**Для цитирования:** Юнгмейстер Д. А., Тимофеев М. И., Исаев А. И., Гасымов Э. Э. Совершенствование исполнительного органа тоннелепроходческого механизированного комплекса S-782 // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 1. – С. 107–118. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_1\_0\_107.

### Improvement of tunnel boring machine S-782 cutter head

D.A. Yungmeister<sup>1</sup>, M.I. Timofeev<sup>1</sup>, A.I. Isaev<sup>1</sup>, E.E. Gasymov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: azayli.emil@gmail.com

**Abstract:** The Saint-Petersburg Metro needs advancement, which necessitates increasing the tunnel boring rate and enhancing the tunneling safety. The article discusses operation of tunnel boring machine S-782 in double-track tunneling at a diameter of 10.3 m in difficult geological conditions of the city of Saint-Petersburg. The accidents in operation of the equipment are

described. Upgrading of the tunneling shield using vibroactive rolling cutters is considered, and the forces on the rolling cutters and the parameters of the vibrators which set the rolling cutters in motion are calculated. The upgrading idea of the cutter head tools consists in using a new type of rolling cutters; the possible design of driving mechanisms is searched for. The upgrading of the shield with replacement of passive cutters by vibroactive cutters is described, and the potential design of the tools is presented graphically. It is proposed to set the vibroactive cutting rollers in motion using the pneumatic and electromagnetic vibrators. The elevation view of the tunneling shield with the proposed upgrades is shown. The use of the vibroactive tools can reduce the risk of disastrous wear of rock cutters, as well as the number and duration of accident-caused downtime, as a consequence, and can enhance capacity of the tunnel boring machine.

**Key words:** tunnel boring machine, metro, limestone, disc rolling cutters, cutter picks, unbalanced system, vibrator, tunneling rate.

**For citation:** Yungmeister D. A., Timofeev M. I., Isaev A. I., Gasymov E. E. Improvement of tunnel boring machine S-782 cutter head. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(1):107-118. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_1\_0\_107.

---

## **Введение**

Самым востребованным транспортом в городах-миллионниках является подземный железнодорожный транспорт — метрополитен.

Строительство Санкт-Петербургского метрополитена идет с отставанием, ввиду сложнейших горно-геологических условий. Главной проблемой является сложное и неблагоприятное для подземных работ геологическое строение территории города, недра сложены не одной породой, а совокупностью пород, таких как кембрийская глина сухая или обводненная, гранитные прослойки разных размеров, а также слои из песчаника и известняка. Основная часть массива представляет собой кембрийские глины с включениями гранитной гальки и валунов размером от нескольких сантиметров до более метра — так называемая «морена». Ко всему вышеперечисленному можно добавить большое количество пльвунов — насыщенный водой песок или супесь [1, 2]. Подобное сложение массива объясняется тем, что территория Санкт-Петербурга распола-

гается на стыке Балтийского щита, состоящего из пород кристаллического фундамента, и Русской платформы, сформированной древними осадочными породами [3]. Сложение массива имеет ключевую роль для разработки паспорта работ, определения потребных усилий, развиваемых щитом, скорости его подачи [4, 5].

## **Описание существующего оборудования для проходки тоннелей**

С экономической точки зрения сооружение межстанционных тоннелей эффективнее всего вести двухпутевыми тоннелями, в связи с этим в 2015 г. Санкт-Петербургским Метростроением на своих рабочих участках был введен в эксплуатацию тоннелепроходческий механизированный комплекс (ТПМК) S-782 фирмы Herrenknecht AG.

Данный тоннелепроходческий комплекс является частью линейки ЕРВ, оснащаемой грунтопригрузом, который является наиболее эффективным в глинистых грунтах. Разрабатываемый грунт

поступает в призабойную камеру, где перемешивается с пастообразным грунтом, этот пластичный грунт обеспечивает давление пригруза в призабойной камере. Возможность регулирования с помощью кондиционирования позволяет использовать щит в неоднородных грунтах с содержанием твердых включений [6].

Инструмент щита представлен в виде резцов и дисковых шарошек. Резцы осуществляют основную работу по разрушению забоя, дисковые шарошки снижают сопротивление трения щита о забой, увеличивают трещиноватость забоя [7, 8].

Для уменьшения износа о твердые поверхности ротор проходческого щита усиливается твердосплавными элементами Tung Studs, которые первыми вступают в контакт с породой, тем самым защищая инструмент от дополнительного абразивного износа, использование материала целесообразно при разрушении пород прочностью до 15 по шкале Протоdjeяконова [9, 10].

### **Проблемы существующей методики проходки**

Однако эксплуатация в обозначенных условиях грунтов Санкт-Петербурга может привести к сильному износу шарошек и резцов, в результате которого необходимо заменить инструмент для дальнейшей эффективной эксплуатации щита [11].

Правильный расчет ресурса режущего инструмента на заданных горно-геологических условиях является одной из ключевых задач для проходки тоннелей. Отхождение от запланированного расхода режущего инструмента может сильно снизить скорость проходки [12, 13].

В конце января 2014 г. щит Herrenknecht S-782 начал проходку первого в Петербурге двухпутного тоннеля Фрунзенско-Приморской линии. Через неко-



Рис. 1. Разлив бентонитового раствора на Бухарестской улице

Fig. 1. Bentonite solution spill on Buharestskoj street

торое время Метрострой столкнулся с проблемой поломки щита. Проходческий комплекс, пройдя километр по мягкой глине, наткнулся на твердые включения, вследствие чего был выведен из строя исполнительный орган комплекса, представленный ротором с закрепленными на нем резцами и шарошками.

Замена породоразрушающего инструмента — весьма трудоемкий и длительный процесс. Для этого необходима остановка комплекса с последующим кессонированием, то есть с нагнетанием избыточного воздушного давления в зароторное пространство для исключения провалов почвы. С этой же целью произ-



Рис. 2. Просадка грунта в парке 300-летия Санкт-Петербурга

Fig. 2. Subsidence of the soil in park of the 300th anniversary of Saint-Peterburg

водится закачка бентонитового раствора между тьюбингами и породой.

Нарушение последовательностей операций и выполняемых процессов при кессонировании может привести к негативным последствиям. Как показывает практика, сложность контроля величины объема закачиваемого раствора может привести к утечке бентонита на поверхность (рис. 1), а также падение давления приводит к просадкам грунта, как произошло в августе 2016 г. на территории парка 300-летия в Санкт-Петербурге (рис. 2) [14].

### Описание конструкции виброактивной шарошки

В диссертационной работе А.И. Ячейкина приведено решение ряда вышеперечисленных проблем: для снижения вероятности возникновения аварийных инцидентов необходимо сократить количество остановок проходческого комплекса на замену породоразрушающего инструмента [15]. Для этого исполнительный орган ТПМК Herrenknecht S-782 нуждается в модернизации, которая заключается в установке комплекта шарошек активного действия [16].

На исполнительном органе проходческого комплекса S-782 установлены

пассивные лезвийные шарошки, воздействие которых заключается в пассивном обкатывании по забою. Наиболее рациональным методом модернизации являются дисковые шарошки активного действия [17]. Принцип действия таких шарошек схож с принципом действия шарошечного долота для бурения скважин по крепким породам, а правильная ненарушенная геометрия шарошки обеспечивает правильное распределение силы подачи на забой [18, 19].

Известен эффективный способ разрушения массива путем наложения на породоразрушающий инструмент ударной нагрузки. Ударная нагрузка позволяет увеличить глубину внедрения инструмента в массив, а главное — развить в массиве систему трещин, которые будут ослаблять прочность всей породы. Массив с высокой трещиноватостью может быть разрушен резцовым инструментом. Глубина внедрения будет определяться двумя усилиями: осевым усилием подачи щитового комплекса и ударным усилием [20].

Ударная нагрузка может быть выражена направленной вибрацией. Помимо увеличения усилия, передаваемого на забой, вибрация также понизит силы, требуемые для перекатывания шарошки по

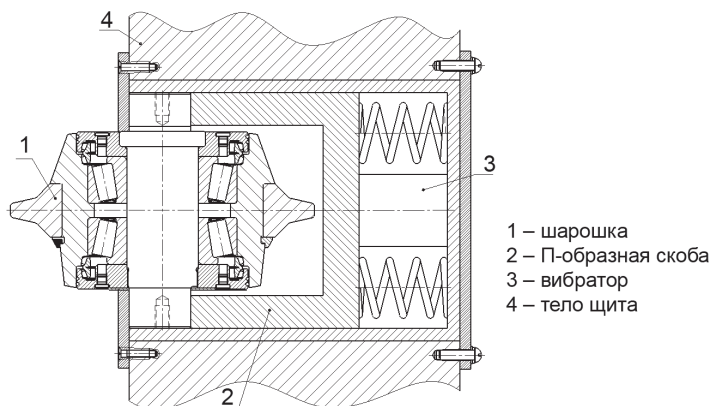


Рис. 3. Устройство шарошки (составлено М.И. Тимофеевым)

Fig. 3. Arrangement of disc cutter (compiled by M.I. Timofeev)

забою, так как эксперименты, поставленные В.А. Бреннером, показывают снижение усилия резания. Это является достоинством рассматриваемого решения, потому что в данном случае дисковая шарошка не является инструментом, который производит разрушение забоя резанием [21].

Конструкция модернизированного породоразрушающего инструмента представлена на рис. 3: шарошка 1 закреплена в П-образной скобе 2, к которой и приводится усилие удара, от скобы сила переносится на шарошку, а от нее на забой. Источником силы может быть вибратор, представленный пневматическим или гидравлическим ударником, а также дебалансная система. Вибратор 3 крепится к П-образной скобе при помощи разъемного соединения, вибрации направлены к внешней стороне скобы. Позицией 4 обозначено основное тело щита, в котором располагается рабочий инструмент.

Для приведения толкателя в движение можно использовать вибратор, действие которого основано на принципе работы вибропогружателя. Вибропогружатель состоит из приводящего устройства (электро- или гидродвигателя) и дебалансов.

### Расчет дебалансного вибратора

Вибраторы направленного действия содержат четное количество горизонтально расположенных параллельных валов с дебалансами, синхронно вращающимися в различных направлениях. В корпусе вибровозбудителя в сферических подшипниках вращаются несколько пар дебалансных валов с дебалансами. При синхронном вращении дебалансов создаются центробежные силы, которые сначала стремятся двигать вал в одну сторону, затем в другую, тем самым создавая колебания с заданной частотой.

Для определения параметров вибратора при известных физических свойствах разрушаемой породы необходимо знать силу, которая будет зависеть от площади, к которой она будет прикладываться [22].

Глубина внедрения принимается равной толщине срезаемой стружки [23]. Глубина внедрения:

$$h = v_n / n_{\text{ио}}, \quad (1)$$

где  $v_n$  — скорость подачи исполнительного органа на забой,  $v_n = 0,0005$  м/с;  $n_{\text{ио}}$  — оборотная частота вращения исполнительного органа,  $n_{\text{ио}} = 0,25$  с<sup>-1</sup>,

$$h = 0,0005/0,25 = 0,02 \text{ м} = 20 \text{ мм}.$$

Сопrotивляемость породы откалыванию:

$$p_{\text{отк}} = 4,22 \cdot \sigma_{\text{сж}}^{1,25}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{\text{сж}}$  — предел прочности пород на сжатие,  $\sigma_{\text{сж}} = 50$  МПа,

$$p_{\text{отк}} = 4,22 \cdot 50^{1,25} = 561,08 \text{ МПа}.$$

Сила, требуемая для разрушения известняка:

$$P = p_{\text{отк}} (1,08h \cdot \sqrt{t_1} - 2,23) + 310, \quad (3)$$

где  $t_1$  — относительный шаг, мм,

$$P = 561,08 \cdot (1,08 \cdot 20 \cdot \sqrt{13,5} - 2,23) + 310 = 46\,588 \text{ Н}.$$

Данная сила является силой, которую шарошка переносит на забой, получая ее от вибратора, т.е. это вынуждающая сила, определяющая способность вибратора преодолевать сопротивление породы при ее разрушении [8].

Частота колебаний дебаланса принимается 35 Гц, как в анализе методик расчета А.И. Ячейкина.

Угловая скорость:

$$\omega = 2\pi\theta / 60, \quad (4)$$

где  $\theta$  — частота колебаний,  $\theta = 35$  Гц,

$$\omega = (2\pi \cdot 35)/60 = 3,67 \text{ рад/с}.$$

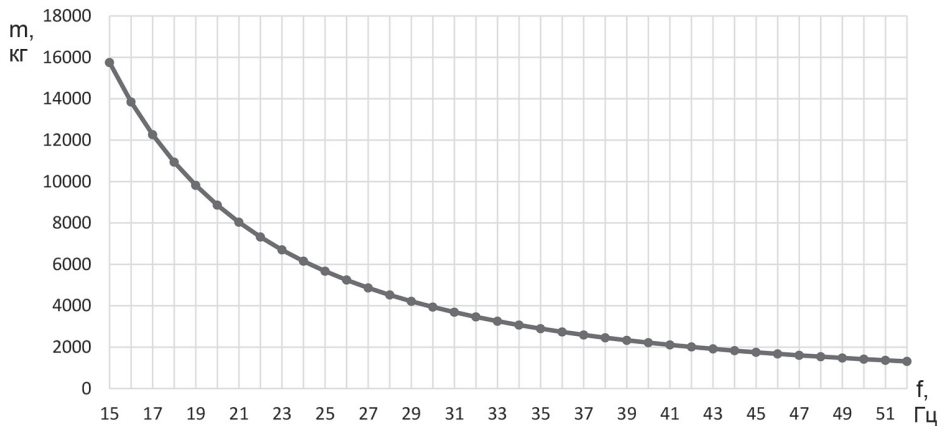


Рис. 4. Зависимость массы дебаланса от частоты вращения (составлено М.И. Тимофеевым)  
 Fig. 4. The dependence of the mass of the imbalance on the speed of rotation (compiled by M.I. Timofeev)

Статический момент массы дебалансов (эксцентрикковый момент):

$$K = P/\omega^2, \quad (5)$$

$$K = 46\,588 / 3,67^2 = 3458,93 \text{ кг} \cdot \text{м}.$$

Масса дебаланса:

$$m = K / r, \quad (6)$$

где  $r$  — радиус вращения центра дебаланса, радиус вращения принимается из конструктивных соображений равным 1,2 м,

$$m = 3458,93 / 1,2 = 2882,44 \text{ кг}.$$

Для отслеживания тенденции изменения необходимой массы дебаланса от частоты колебаний расчеты выполняются для частот 29 Гц и 48 Гц.

- Угловая скорость:

$$\omega = (2\pi \cdot 29)/60 = 3,04 \text{ рад/с}.$$

Статический момент массы дебалансов:  $K = P/\omega^2$ ,

$$K = 46\,588/3,04^2 = 5041,12 \text{ кг} \cdot \text{м}.$$

Масса дебаланса:  $m = K/r$ ,

$$m = 5041,12/1,2 = 4200,93 \text{ кг}.$$

- Угловая скорость:

$$\omega = (2\pi \cdot 48)/60 = 5,03 \text{ рад/с}.$$

Статический момент массы дебалансов:  $K = P/\omega^2$ ,

$$K = 46\,588/5,03^2 = 1841,36 \text{ кг} \cdot \text{м}.$$

Масса дебаланса:  $m = K/r$ ,

$$m = 1841,36/1,2 = 1534,46 \text{ кг}.$$

На рис. 4 приведена зависимость массы дебаланса от частоты вращения при равной развиваемой силе (расчеты проведены для значений от 15 до 51 Гц).

Полученные значения позволяют сделать вывод об обратной квадратичной зависимости массы дебаланса от частоты его вращения, из этого следует, что для понижения массы дебаланса необходимо увеличивать частоту его вращения.

Использование вибраторов дебалансного типа представляется мало возможным в данной сфере из-за малого размера выработок, а также большой массы дебалансов.

Кроме использования виброактивных шарошек также предлагается изготовление виброактивных резцов. На рис. 5 представлена схема расположения вибратора на одиночном резце: резцы осуществляют основную работу по срезанию породы, а замена пассивных резцов на виброактивные поможет эффективнее скалывать твердые включения. На рис. 5 представлено устройство виброактивного резца, подобное ранее предложенному устройству активной шарошки:



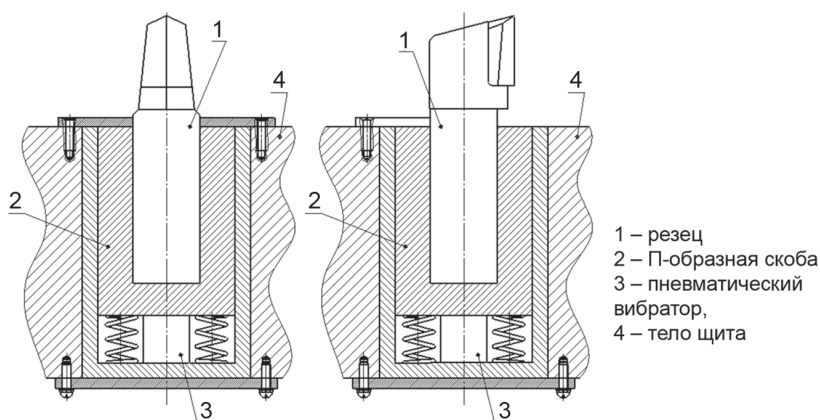


Рис. 5. Устройство виброактивного реза (составлено М.И. Тимофеевым)

Fig. 5. Arrangement of pick (compiled by M.I. Timofeev)

1 — резец, закрепленный в П-образной скобе 2, которой от пневматического вибратора 3 передается движение, 4 — корпус щита.

В качестве приводящего устройства предлагается использование компактного пневматического или электромагнитного вибратора, работа которого заключается в следующем (рис. 6): в состоянии покоя поршень электромагнитного пневмовибратора 1, в конструкцию которого встроен мощный магнит 2, прочно соединен магнитным полем со специальной магнитной плитой 3. При подаче воздуха через рукав 4 в рабочей камере 5 возрастает давление. Когда сила давления воздуха в рабочей камере превышает силу магнитного поля, происходит резкое перемещение поршня, который в свою очередь наносит удар по поверхности, к которой присоединен вибратор (например, П-образная скоба). Возвращение поршня в начальное состояние происходит под действием пружины 6, которая запасает энергию во время движения поршня, повышенное давление из рабочей камеры стравливается через обратный клапан.

Вибраторы, использующие данную систему удара, могут иметь массу всего 8 кг и развивать силу до 12,5 кН. Сле-

довательно, использование системы, работающей на подобных механизмах, реализуема и сможет развивать необходимую силу, имея малые габариты и массу.

На рис. 7 показан рабочий чертеж роторного исполнительного органа, при его разработке использованы материалы А.И. Ячейкина. На рис. 7 позициями 1 и 2 обозначены однолезвийная и двухлезвийная шарошки соответственно, 3 — электромагнитный пневмовибратор, 4 —

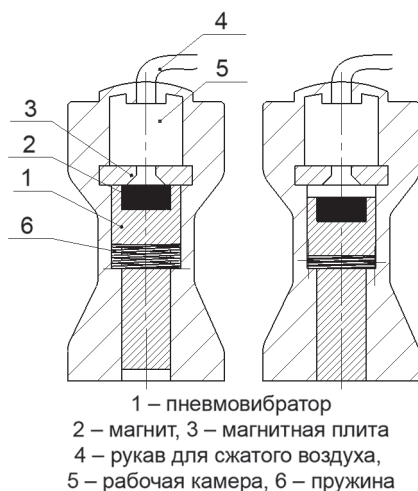
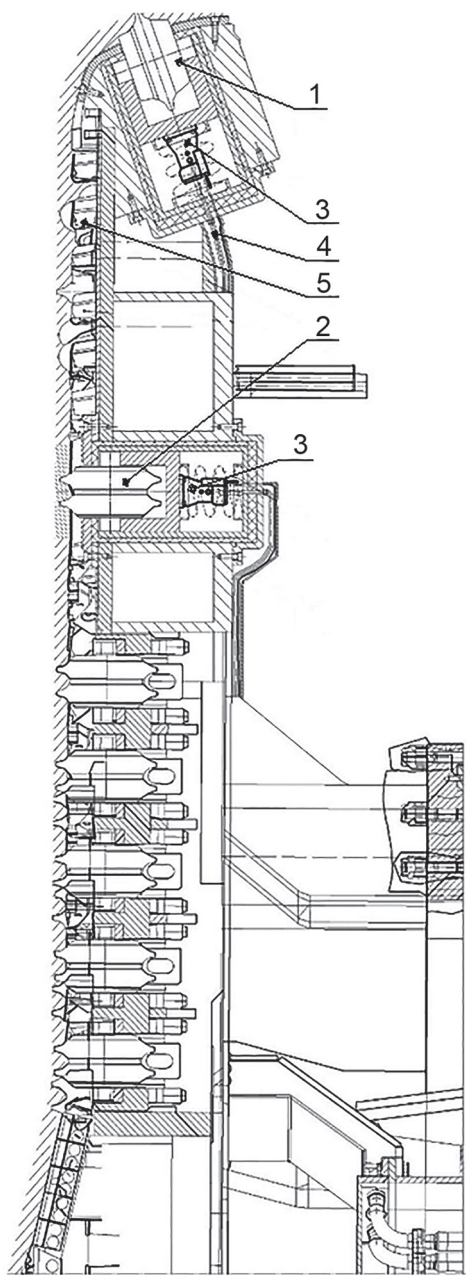


Рис. 6. Устройство электромагнитного пневмовибратора (составлено М.И. Тимофеевым)

Fig. 6. Arrangement of electromagnetic pneumovibrator (compiled by M.I. Timofeev)



- 1 – однолезвийная шарошка  
 2 – двухлезвийная шарошка  
 3 – электромагнитный пневмовибратор  
 4 – элементы пневмосистемы, 5 – резцы

Рис. 7. Разрез исполнительного органа проходческого щита (составлено А.И. Исаевым)

Fig. 7. Sectional drawing of executive body of tunnel-boring machine (compiled by A.I. Isaev)

элементы пневмосистемы, 5 – резцы щита.

### Результаты и их обсуждение

На основе анализа горно-геологических условий, используемого оборудования и трудностей проходки тоннелей метро в обводненных неоднородных массивах, состоящих из кембрийской глины и прослоек известняка, были выведены возможные пути улучшения тоннелепроходческого щита.

Наиболее рациональным решением является применение в конструкции роторного исполнительного органа виброактивных шарошек и резцов, которое позволит существенно не снижать величину подачи при необходимости проходки по известнякам и песчаникам.

Устройство, развивающее ударное усилие и передающее его на инструмент щита, является ключевым элементом всей предложенной конструкции, поэтому необходимо детальное рассмотрение и обоснование этого вибратора.

Результатом работы является расчет параметров и обоснование типа вибратора.

На основе проделанной работы были сделаны выводы о возможности использования предложенной модернизации и найдены возможные способы ее внедрения.

### Заключение

Скорость и стоимость проходки тоннелей в горно-геологических условиях Санкт-Петербурга во многом зависит от твердых включений породы на трассе проходки и исключения аварийных остановок.

Установление на исполнительном органе шарошек с вибраторами позволит повысить трещиноватость твердых прослоек в массиве кембрийской глины или снизить крепость разрушаемого массива. Указанные изменения в конструкции



исполнительного органа позволят повысить производительность проходки по глине с прослойками и снизить продолжительность аварийных простоев комплекса. Кроме того, шарошки с вибра-

торами или активные резцы позволят сократить время простоя проходческого комплекса для выполнения плановых ремонтов и снизить эксплуатационные затраты.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Земсков А. И. Анализ гидрогеологических условий в подземном пространстве Санкт-Петербурга как фактора безопасного строительства и длительной устойчивости подземных сооружений // Проблемы современной науки и образования. — 2017. — № 20. — С. 92 — 98.
2. Дашко Р. Э., Котюков П. В., Шидловская А. В. Влияние гидрогеологических условий на безопасность освоения подземного пространства при строительстве транспортных тоннелей // Записки Горного института. — 2012. — Т. 199. — С. 1 — 16.
3. Дашко Р. Э., Котюков П. В., Шидловская А. В. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга // Развитие городов и геотехническое строительство. — 2011. — № 1. — С. 1 — 47.
4. Грабовский А. А. Статистическая оценка энергетических показателей комбайна MTS-250 (Германия) // Записки Горного института. — 2012. — Т. 199. — С. 384 — 387.
5. Bilgin N., Acun S. The effect of rock weathering and transition zones on the performance of an EPB-TBM in complex geology near Istanbul, Turkey // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2021, vol. 80, no. 4, pp. 3041 — 3052. DOI: 10.1007/s10064-021-02142-4.
6. Капралова Л. М., Groшовкин Е. И., Машина Л. С., Новиченко А. Л., Пенджиев Э. Д., Самарский С. В. Разработка оборудования и методов исследования кондиционеров грунта для ТПМК с грунтопригрузом // Метро и тоннели. — 2014. — № 1. — С. 32 — 34.
7. Габов В. В., Задков Д. А., Нгуен К. Л. Особенности формирования элементарных сколов в процессе резания углей и изотропных материалов эталонным резцом горных машин // Записки Горного института. — 2019. — Т. 236. — С. 153 — 161. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.153.
8. Nguyen K. L., Gabov V. V., Zadkov D. A. Improving efficiency of cleanup and coal flow formation on conveyor by shearer loader with accessorial blade // Eurasian Mining. 2019, no. 1. DOI: 10.17580/em.2019.01.09.
9. Болобов В. И., Габов В. В., Задков Д. А., Тетервак А. В. Усовершенствование режимов термической обработки резцов проходческих комбайнов с целью повышения их износостойкости // Записки Горного института. — 2008. — Т. 178. — С. 170 — 172.
10. Khalimonenko A. D., Rakhmankulov R. R. Gorshkov I. V. The influence of the material structure of an instrument on the quality of processing while milling with cutting ceramics / Applied Aspects of Nano-Physics and Nano-Engineering. 2019, pp. 115 — 118.
11. Лавренко С. А., Сажевич В. А., Кузьминов С. В., Лосев И. В. Проходческая техника для сооружения вспомогательных выработок метро Санкт-Петербурга на основе стандартного тьюнгоукладчика / Материалы конференций ГНИИ «Нацразвитие». — СПб., 2016. — С. 35 — 40.
12. Жабин А. Б., Поляков А. В., Аверин Е. А., Линник Ю. Н., Линник В. Ю. Оценка влияния абразивности горных пород на параметры породоразрушающих машин // Записки Горного института. — 2019. — Т. 240. — С. 621. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.621.
13. Hamzaban M. T., Mohammadi N. R. Effects of the water content and grain size on soil-cutting tools interactions: implications of LCPC abrasion test // International Journal of Mining and Geo-Engineering International. 2022, vol. 56, no. 1, pp. 75 — 81. DOI: 10.22059/ijmge.2021.301696.594849.

14. Потапова Е. В. Общие проблемы управления геотехническими рисками на примере строительства вертикальных стволов метрополитена в городе Москве // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 10. — С. 44–54. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-44-54.

15. Ячейкин А. И. Определение рациональных конструкций и параметров исполнительного органа проходческих щитов большого диаметра для горно-геологических условий шахт Метростроя СПб.: автореф ... дис. канд. техн. наук: 05.05.06. — СПб., 2021. — 22 с.

16. Yungmeister D. A., Lavrenko S. A., Yacheikin A. I., Urazbakhtin R. Y. Improving the shield machine cutter head for tunneling under the conditions of the Metrostroy Saint Petersburg mines // *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020, vol. 15, no. 11, pp. 1282–1288.

17. Zhukov I. A., Smolyanitsky B. N., Timonin V. V. Improvement of down-the-hole air hammer efficiency by optimizing shapes of colliding // *Journal of Mining Science*. 2018, vol. 54, no. 2, pp. 212–217. DOI: 10.1134/S1062739118023569.


18. Sun R., Mo J., Zhang M. Su, Y., Zhou Z. Cutting performance and contact behavior of partial-wear TBM disc cutters. A laboratory scale investigation // *Engineering Failure Analysis*. 2022, vol. 137, article 106253. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106253.

19. Agrawal A. K., Chattopadhyaya, Murthy S. Delineation of cutter force and cutter wear in different edge configurations of disc cutters – An analysis using discrete element method // *Engineering Failure Analysis*. 2021, vol. 129, article 105727. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105727.

20. Жабин А. Б., Лавит И. М., Демин К. В. Математическая модель процесса разрушения горной породы тангенциальной дисковой шарошкой и высоконапорной струей воды // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2000. — № 4. — С. 17.

21. Бреннер В. А., Жабин А. Б., Щеголевский М. М., Поляков Ал. В., Поляков Ан. В. Щитовые проходческие комплексы. — М.: Изд-во «Горная книга», 2009. — 360 с.

22. Лукин Д. Г., Юнгмейстер Д. А., Ячейкин А. И., Исаев А. И. Совершенствование работы исполнительного органа проходческого щита КТ 1-5,6М // Горный журнал. — 2018. — № 12. — С. 73–77. DOI: 10.17580/gzh.2018.12.15.

23. Болобов В. И., Плащинский В. А. Влияние продолжительности удара на эффективность разрушения горных пород и пластического деформирования металлов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 3. — С. 78–96. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_3\_0\_78. 

## REFERENCES

1. Zemskov A. I. Analysis of hydrogeological conditions in the underground space of St. Petersburg as a factor of safe construction and long-term stability of underground structures. *Problems of modern science and education*. 2017, no. 20, pp. 92–98. [In Russ].

2. Dashko R. E., Kotyukov P. V., Shidlovskaya A. V. Hydrogeological conditions effect on safety of underground space expansion during transport tunnel construction. *Journal of Mining Institute*. 2012, vol. 199, pp. 1–16. [In Russ].

3. Dashko R. E. Aleksandrova O. Y., Kotyukov P. V., Shidlovskaya A. V. Features of engineering and geological conditions of St. Petersburg. *Urban development and geotechnical construction*. 2011, no. 1, pp. 1–47. [In Russ].

4. Grabovskiy A. A. Statistical evaluation of the energy rates of the surface miner MTS-250 (Germany). *Journal of Mining Institute*. 2012, vol. 199, pp. 384–387. [In Russ].

5. Bilgin N., Acun S. The effect of rock weathering and transition zones on the performance of an EPB-TBM in complex geology near Istanbul, Turkey. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2021, vol. 80, no. 4, pp. 3041–3052. DOI: 10.1007/s10064-021-02142-4.

6. Kapralova L. M., Groshovkin E. I., Mashina L. S., Novichenko A. L., Pendzhiev E. D., Samarskiy S. V., Development of equipment and methods for the study of soil conditioners for TBM with soil load. *Metro and tunnels*. 2014, no. 1, pp. 32–34. [In Russ].

7. Gabov V. V., Zadkov D. A., Nguyen K. L. Features of elementary burst formation during cutting coals and isotropic materials with reference cutting tool of mining machines. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 236, pp. 153 – 161. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.153.
8. Nguyen K. L., Gabov V. V., Zadkov D. A. Improving efficiency of cleanup and coal flow formation on conveyor by shearer loader with accessorial blade. *Eurasian Mining*. 2019, no. 1. DOI: 10.17580/em.2019.01.09.
9. Bolobov V. I., Gabov V. V., Zadkov D. A., Tetervak A. V. Improving the modes of heat treatment of cutters of tunneling combines in order to increase their wear resistance. *Journal of Mining Institute*. 2008, vol. 178, pp. 170 – 172. [In Russ].
10. Khalimonenko A. D., Rakhmankulov R. R., Gorshkov I. V. The influence of the material structure of an instrument on the quality of processing while milling with cutting ceramics. *Applied Aspects of Nano-Physics and Nano-Engineering*. 2019, pp. 115 – 118.
11. Lavrenko S. A., Sazhevich V. A., Kuz'minov S. V., Losev I. V. Tunneling machinery for ancillary mines construction of saint-petersburg underground based on standard tubbing erector. *Materialy konferentsiy GNII «Natsrazvitiye»* [Materials of conference GNII «Natsrazvitiye»], Saint-Petersburg, 2016, pp. 35 – 40. [In Russ].
12. Zhabin A. B., Polyakov A. V., Averin E. A., Linnik Yu. N., Linnik V. Yu. Estimation of abrasiveness impact on the parameters of rock-cutting equipment. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 240, pp. 621. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.621.
13. Hamzaban M. T., Mohammadi N. R. Effects of the water content and grain size on soil-cutting tools interactions: implications of LCPC abrasion test. *International Journal of Mining and Geo-Engineering International*. 2022, vol. 56, no. 1, pp. 75 – 81. DOI: 10.22059/ijmge.2021.301696.594849.
14. Potapova E. V. General problems of geotechnical risk management in terms of construction of vertical shafts in the Moscow subway. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 10, pp. 44 – 54. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-44-54.
15. Yacheikin A. I. *Opreделение ratsional'nykh konstruksiy i parametrov ispolnitel'nogo organa prokhodcheskikh shchitov bol'shogo diametra dlya gorno-geologicheskikh usloviy shakht Metrostroya SPb.* [Determination of rational structures and parameters of the executive body of tunneling shields of large diameter for the mining and geological conditions of the mines of Metrostroy SPb.], Candidate's thesis, Saint-Petersburg, 2021, 22 p.
16. Yungmeister D. A., Lavrenko S. A., Yacheikin A. I., Urazbakhtin R. Y. Improving the shield machine cutter head for tunneling under the conditions of the Metrostroy Saint Petersburg mines. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020, vol. 15, no. 11, pp. 1282–1288.
17. Zhukov I. A., Smolyanitsky B. N., Timonin V. V. Improvement of down-the-hole air hammer efficiency by optimizing shapes of colliding. *Journal of Mining Science*. 2018, vol. 54, no. 2, pp. 212 – 217. DOI: 10.1134/S1062739118023569.
18. Sun R., Mo J., Zhang M. Su, Y., Zhou Z. Cutting performance and contact behavior of partial-wear TBM disc cutters. A laboratory scale investigation. *Engineering Failure Analysis*. 2022, vol. 137, article 106253. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106253.
19. Agrawal A. K., Chattopadhyaya, Murthy S., Delineation of cutter force and cutter wear in different edge configurations of disc cutters – An analysis using discrete element method. *Engineering Failure Analysis*. 2021, vol. 129, article 105727. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105727.
20. Zhabin A. B., Lavit I. M., Demin K. V. Mathematical model of the rock destruction process by a tangential disk cutter and a high-pressure water jet. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2000, no. 4, pp. 17. [In Russ].
21. Brenner V. A., Zhabin A. B., Shchegolevskiy M. M., Polyakov Al. V., Polyakov An. V. *Shchitovye prokhodcheskie komplekсы* [Shield tunneling complexes], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2009, 360 p.

22. Lukin D. G., Jungmeister D. A., Jachejkin A. I., Isaev A. I. Improving the work of the executive body of the KT 1-5,6M tunneling shield. *Gornyi Zhurnal*. 2018, no. 12, pp. 73–77. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2018.12.15.

23. Bolobov V. I., Plashchinsky V. A. Influence of impact duration on fracture efficiency in rocks and on plastic deformation of metals. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 3, pp. 78–96. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_3\_0\_78.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Юнгмейстер Дмитрий Алексеевич*<sup>1</sup> — д-р техн. наук, профессор, e-mail: YungmeisterDA@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0001-7858-8340,

*Тимофеев Максим Игоревич*<sup>1</sup> — студент,

e-mail: s181244@stud.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0002-9441-4532,

*Исаев Алексей Игоревич*<sup>1</sup> — канд. техн. наук,

доцент, e-mail: IsaevAI@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0003-2246-8440,

*Гасымов Эмиль Эльчин оглы*<sup>1</sup> — аспирант,

e-mail: azayli.emil@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0003-3361-2452,

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет.

**Для контактов:** Гасымов Эмиль Эльчин оглы,

e-mail: azayli.emil@gmail.com.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*D.A. Yungmeister*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

e-mail: iungmeister@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0001-7858-8340,

*M.I. Timofeev*<sup>1</sup>, Student,

e-mail: s181244@stud.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0002-9441-4532,

*A.I. Isaev*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

e-mail: isayevAI@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0003-2246-8440,

*E.E. Gasymov*<sup>1</sup>, Graduate Student,

e-mail: azayli.emil@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0003-3361-2452,

<sup>1</sup> Saint-Petersburg Mining University,

199106, Saint-Petersburg, Russia

**Corresponding author:** E.E. Gasymov,

e-mail: azayli.emil@gmail.com.

Получена редакцией 17.04.2022; получена после рецензии 25.09.2022; принята к печати 10.12.2022.

Received by the editors 17.04.2022; received after the review 25.09.2022; accepted for printing 10.12.2022.

