

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БУНКЕР-ПЕРЕГРУЖАТЕЛЕЙ С ГРАВИТАЦИОННОЙ ЗАГРУЗКОЙ

А.С. Носенко¹, А.А. Домницкий¹, В.В. Носенко¹, В.В. Зубов¹, И.А. Кирсанов¹

¹ Шахтинский автодорожный институт (филиал)
Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ)
имени М.И. Платова, Шахты, Россия, e-mail: asnosenko@mail.ru

Аннотация: Сформулирована научно-техническая проблема повышения эффективности проведения горных выработок, обеспечения экологической безопасности за счет применения комбайновой поточной технологии с использованием бункер-перегрузателей периодического действия. Объектом исследования является бункер-перегрузатель с гидравлическим приводом транспортирующего элемента периодического действия. Для решения проблемы загрузки бункер-перегрузателей, предложены технические решения с изменяемым углом наклона желоба, обеспечивающим гравитационную загрузку. Обоснован метод определения фактического объема сыпучего материала в желобе бункер-перегрузателя при гравитационной загрузке с целью разработки инженерной методики выбора его рациональных параметров. Установлены основные закономерности поведения сыпучего материала, получены качественные и количественные зависимости для определения фактического объема материала от угла наклона φ , вида материала, характеризующегося углом естественного откоса φ_0 , углом трения по поверхности желоба $\mu_{\text{тр}}$, углом внутреннего трения ρ_0 . Конечная математическая модель для определения указанных показателей представлена системой уравнений в виде алгоритма расчета и блок-схемы. Проведена оценка данных, полученных в результате проведенных исследований и расчетов. Изучена физическая картина поведения сыпучего материала при осуществлении гравитационной загрузки бункер-перегрузателя. Сделаны выводы по результатам исследований.

Ключевые слова: комбайновая проходка выработки, бункер-перегрузатель, взаимодействие сыпучей среды, угол трения, объем бункера, гравитационная загрузка, формирование штабеля, рациональный угол наклона.

Для цитирования: Носенко А. С., Домницкий А. А., Носенко В. В., Зубов В. В., Кирсанов И. А. Теоретические исследования бункер-перегрузателей с гравитационной загрузкой // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 8. – С. 111–120. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_8_0_111.

Theoretical study of bunker loaders with gravity feeding

A.S. Nosenko¹, A.A. Domnitsky¹, V.V. Nosenko¹, V.V. Zubov¹, I.A. Kirsanov¹

¹ Shakhty Automobile Road Institute, Branch of the Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Shakhty, Russia, e-mail: asnosenko@mail.ru

Abstract: The formulated problem is to enhance roadway construction efficiency and environmental safety using continuous mining technology with batch-action bunker loaders. The object of the research is the bunker loader with the hydraulically driven batch-action carrier. For feeding the bunker loader, the proposed engineering solutions include the varied angle of chute to ensure gravity feeding. The method of determination of actual bulk volume in the bunker loader chute during gravity feeding is substantiated to develop an engineering selection procedure of its rational parameters. The main behavioral patterns of bulk material are found, the quantitative and qualitative relations are obtained to determine actual bulk volumes as function of inclination angle φ , type of material characterized with the repose angle φ_0 , chute surface friction angle $\mu_{\text{тр}}$ and internal friction angle ρ_0 . The final mathematical model of the listed characteristics represents a system of equations in the form of an algorithm and a control flow chart. The testing and calculation data are analyzed. The physical pattern of the granular material behavior in gravity feeding of a bunker loader is studied. The research conclusions are drawn.

Key words: continuous mining, bunker loader, granular medium interaction, friction angle, bunker volume, gravity feeding, stockpiling, rational inclination angle.

For citation: Nosenko A. S., Domnitsky A. A., Nosenko V. V., Zubov V. V., Kirsanov I. A. Theoretical study of bunker loaders with gravity feeding. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(8): 111-120. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_8_0_111.

Введение

Комбайновую технологию используют в широком диапазоне типов горных пород. Известен опыт применения отечественных проходческих комбайнов КП-21 и КП-200Т при строительстве транспортных тоннелей. К достоинствам технологии можно отнести тот факт, что в значительно меньшей степени, чем при буровзрывном способе, нарушается устойчивость окружающего массива, поскольку в процессе разрушения породы резанием динамические воздействия ощутимо уменьшаются. Также использование комбайнов позволяет совместить во времени основные трудоемкие операции — разрушение забоя и вывоз горной массы, что дает возможность обеспечить высокие темпы проведения выработок [1 — 8].

Существующие проходческие комбайны, кроме разрушения забоя, обеспечивают погрузку отбитой горной массы на перегружатели, устанавливаемые за

комбайном, и далее — в транспортные средства.

Следует также отметить, что строительство значительной части тоннелей производится в условиях плотной городской застройки. Это накладывает определенные ограничения на применяемые технологии с точки зрения экологической безопасности, что напрямую относится к способам вывоза горной массы, образовавшейся в процессе проведения горной выработки за пределы населенных пунктов. Данное ограничение обуславливает значительные расстояния перевозки, осуществляемые по дорогам общего пользования, и как следствие — применение самосвалов, не приспособленных к использованию в комплектах рассматриваемого горнопроходческого оборудования. В связи с этим возникает необходимость разработки и обоснования технологии загрузки указанных транспортных средств непосредственно в проходческом забое для обеспечения даль-

нейшей транспортировки разрушенного материала.

Таким образом, научно-техническая проблема повышения эффективности строительства автодорожных тоннелей за счет разработки технологии загрузки бункер-перегрузателя является актуальной.

Постановка задач исследований и разработка принципиальных технических решений бункер-перегрузателей

Цель проводимых исследований — разработка поточной технологии погрузки и вывоза горной массы из забоя, обеспечивающей экологическую безопасность.

При проведении горных выработок, строительстве тоннелей различного назначения широко используется технологии с применением проходческих комбайнов избирательного действия и автомобильного транспорта (рис. 1).

Особенности погрузки и транспортировки разрушенной горной массы при проведении горных выработок, в частности, при строительстве автодорожных тоннелей, а также целесообразность применения в качестве перегрузочных средств бункер-перегрузателей, достаточно подробно обоснована в работе [9].

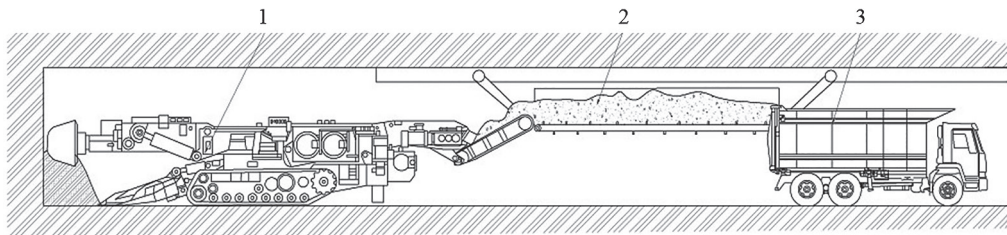
В качестве промежуточного транспортного средства могут применяться ленточные, скребковые, пластинчатые

конвейеры, перегружатели с клиновыми транспортирующими элементами и др. Оригинальными, по мнению авторов, являются технические решения перегружателей с изменяющейся геометрией транспортирующего элемента и гидроприводом поступательного действия.

Однако все перечисленные транспортные средства имеют существенный недостаток — они предусматривают одновременную работу с горнопроходческой машиной при наличии автосамосвала под погрузкой. Т.е. их работа в период ожидания магистрального транспортного средства весьма затруднительна. Другими словами, отсутствует возможность накопления материала.

В Шахтинском автодорожном институте (филиале) ЮРГПУ (НПИ) им. М.И. Платова с целью реализации беспрерывной комбайновой поточной технологии проведения горных выработок проводятся работы, направленные на создание проходческих бункер-перегрузателей. Разработаны и защищены охранными документами РФ оригинальные технические решения бункер-перегрузателей на основе применения гидропривода поступательного действия и горизонтальной разгрузки горной массы [10 — 11].

Предложенные технические решения позволяют обеспечить бесперебойную работу горнопроходческого комбайна в период обмена автомобилей, а затем



1 — комбайн, 2 — промежуточное транспортное средство, 3 — автомобиль

Рис. 1. Комбайновая технология проведения горных выработок

Fig. 1. Continuous mining technology

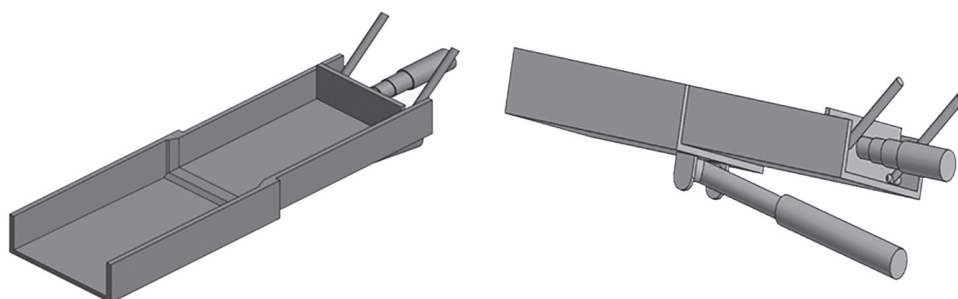


Рис. 2. Бункер-перегрузатель с гравитационной загрузкой и секционным подвижным дном
 Fig. 2. Bunker loader with gravity feeding and sectioned movable bottom

осуществлять их загрузку за минимальный промежуток времени. При проверке работоспособности предложенных конструкций на экспериментальных образцах [9] были выявлены серьезные проблемы, главные из которых:

- невозможность обеспечения полной загрузки желоба бункер-перегрузателя без дополнительных маневровых операций;
- необходимость применения дорогостоящих многосекционных телескопических гидроцилиндров двухстороннего действия для обеспечения полной выгрузки материала.

Для устранения указанных недостатков предложено несколько новых технических решений, в основу которых положены принципы использования гра-

витационной загрузки совместно с секционным подвижным дном.

На рис. 2 представлен бункер-перегрузатель, в конструкцию которого заложены все новые приведенные выше отличительные признаки.

Бункер-перегрузатель выполнен из двух подвижных относительно друг друга секций, выдвигной задней стенки (толкаящая плита) и приводных гидроцилиндров. Перед загрузкой желоб бункер-перегрузателя находится под некоторым углом к почве выработки. Горная масса от проходческого комбайна попадает в желоб и под действием собственного веса заполняет его (гравитационная загрузка), после чего перегрузатель приводится в горизонтальное положение под разгрузку.

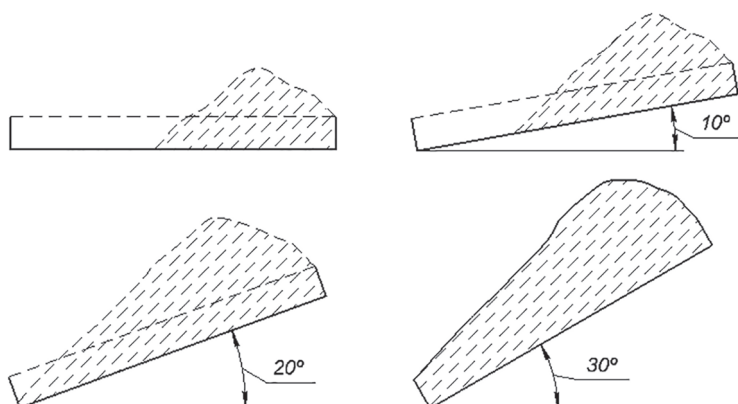


Рис. 3. Формирование штабеля сыпучего материала в желобе
 Fig. 3. Granular material piling in chute

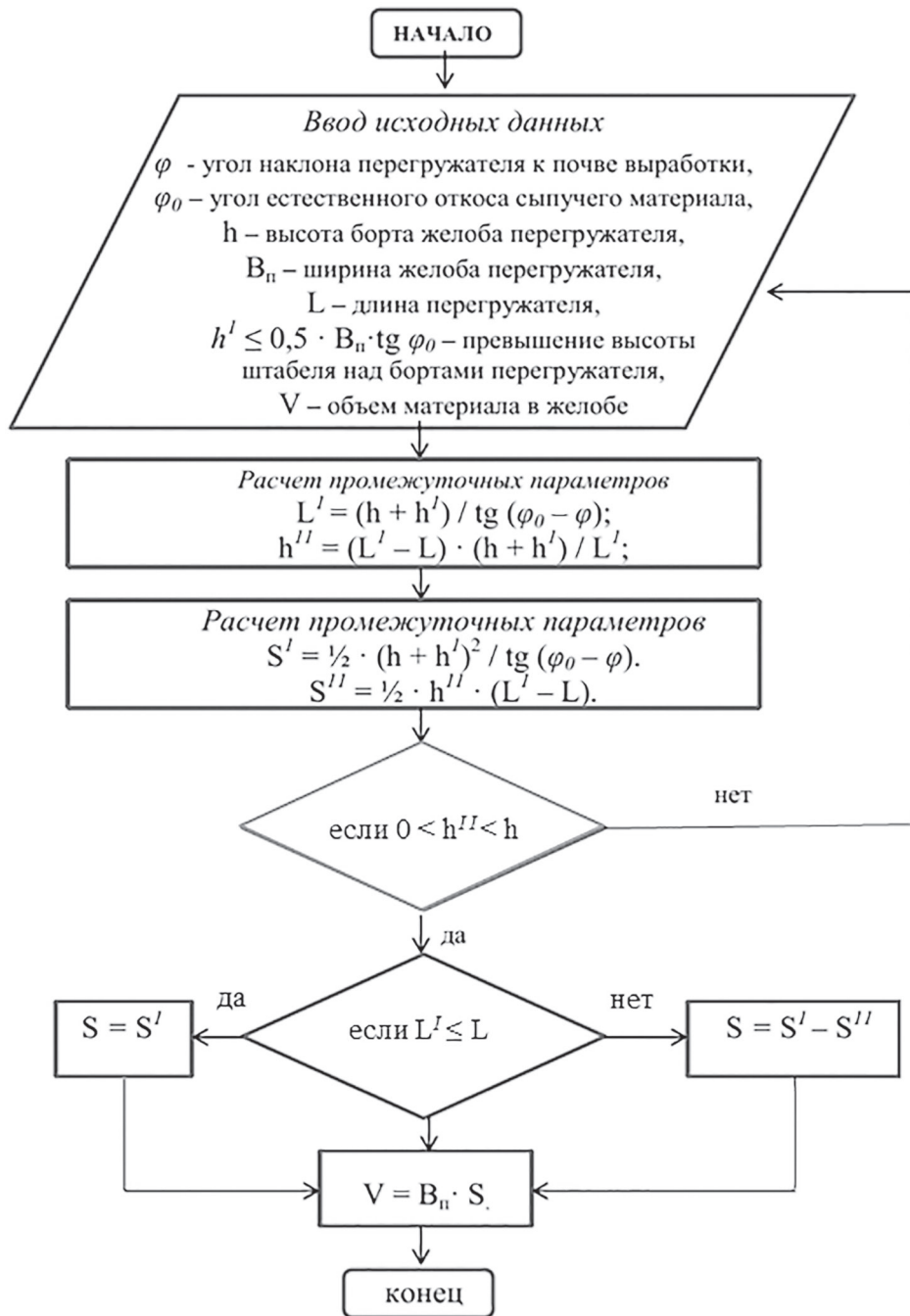


Рис. 4. Алгоритм расчета и блок схема
 Fig. 4. Calculation algorithm and control flow chart

После подхода автомобиля, процесс его загрузки осуществляется выдвиганием толкающей плиты и одновременным втягиванием одной секции желоба в другую. Причем секционная разгрузка производится при помощи силового гидроцилиндра подъема — опускания желоба. Использование совмещенной разгрузки позволяет использовать стандартные силовые гидроцилиндры, как телескопические, так и обычные — двухстороннего действия.

Методические подходы к моделированию работы бункер-перегрузателей

Методика выбора таких параметров, как допустимая длина конвейера L , ширина B , высота борта желоба h в достаточном объеме изучена с применением математического моделирования, экспериментально подтверждена и подробно изложена в работе [9]. В настоящий момент проводятся работы по изучению поведения сыпучего материала при его гравитационной загрузке в желоб бункер-перегрузателя. Рассмотрены варианты размещения перегружателя в забое с точки зрения ориентации его относительно почвы выработки (см. рис. 3).

Установлены основные закономерности поведения сыпучего материала,

получены качественные и количественные зависимости для определения фактического объема материала от угла наклона φ , вида материала, характеризующегося углом естественного откоса φ_0 , углом трения по поверхности желоба $\mu_{\text{тр}}$, углом внутреннего трения ρ_0 [12]. Математическая модель для определения влияния указанных параметров на формирование фактического объема материала в желобе представлена системой уравнений в виде алгоритма расчета и блок-схемы на рис. 4. Алгоритмом расчета предусматривается перебор вариантов значений искомых параметров с целью нахождения максимального значения целевой функции. На данном этапе расчетов в качестве целевой функции принят объем материала в желобе бункер-перегрузателя, сформированный за счет гравитационной загрузки $V \Rightarrow \Rightarrow \max$.

Следует отметить, что длина перегружателя L , полученная в результате расчетов, обязательно проверяется по условию максимально допустимой длины $L_{\text{доп}}$ по фактору возможности обеспечения разгрузки. Методика определения $L_{\text{доп}}$ подробно приведена в работе [9]. Там же обоснованы пределы изменения B и h . Переменные параметры и их интервал допустимых значений приве-

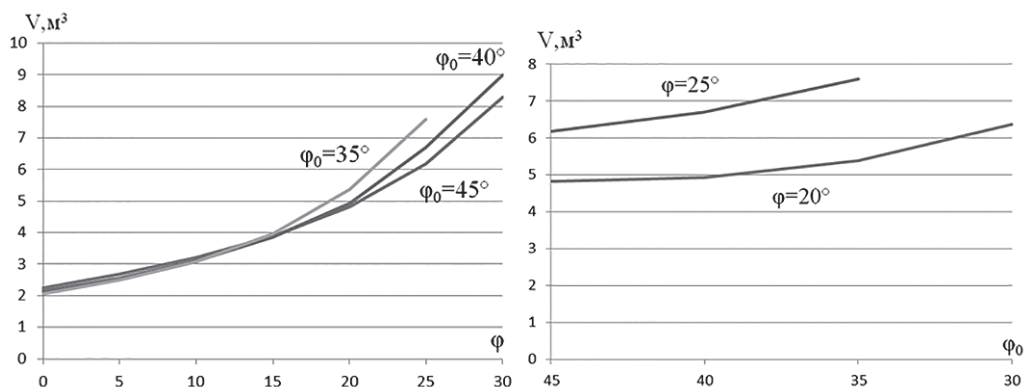


Рис. 5. Графики функций $V = f(\varphi; \varphi_0)$

Fig. 5. Plotted functions $V=f(\varphi; \varphi_0)$

Оптимизируемые параметры исследуемой системы

Optimization parameters of test system

$\varphi, ^\circ$	$\varphi_{\rho}, ^\circ$	$\mu_{\text{тр}}$	$L, \text{ м}$	$B, \text{ м}$	$h, \text{ м}$
0 – 55	25 – 50	0,15 – 40	1 – 15	0,5 – 3	0,5 – 2,5
Значение базовых параметров					
30	45	0,25	5	2	0,5

дены в таблице и определяются системой принятых ограничений.

На графиках (рис. 5) приведены некоторые результаты теоретических исследований влияния переменных факторов на целевую функцию.

Результаты теоретических исследований

Проведем оценку полученных в результате исследований и расчетов данных. Анализ наблюдений за поведением штабеля сыпучего материала в зависимости от угла наклона желоба φ подтверждает гипотезу о том, что формирование конуса материала до определенного значения угла происходит в задней части перегружателя, т.е. в зоне погрузки. При превышении углом значения, равного углу трения $\mu_{\text{тр}}$, часть материала скользит по днищу и покрывает его слоем толщиной, равной диаметру куска $d_{\text{ср}}$. С увеличением конуса материала, формирующегося под углом естественного откоса φ_0 , и угла наклона φ наблюдается скатывание отдельных кусков в переднюю зону желоба, что объясняется наличием инерционной составляющей.

При достижении углом наклона φ значения, равного φ_0 , а в нашем случае и ρ_0 , физическая картина меняется. Материал сразу ссыпается к переднему борту, и формирование конуса под углом φ_0 начинается снизу.

Сказанное позволяет сделать вывод о том, что максимальный объем материала будет соответствовать положению перегружателя, близкому к углу есте-

ственного откоса. Это подтверждают и расчеты, проведенные с использованием разработанной модели.

Разработанная методика позволила получить рациональные параметры бункер-перегрузателя для следующих условий:

- погружаемый материал (песчаник) крепостью до 12 ед. по шкале проф. М.М. Протодьяконова, крупностью $d_{\text{ср}} = 50$ мм, углами естественного откоса и внутреннего трения $\varphi_0 = \rho_0 = 450$;
- сечение выработки 20 м^2 ,
- применяемое горнопроходческое и транспортное оборудование — комбайн КП21, самосвал МоАЗ-7529 емкостью 12 м^3 .

Получены следующие результаты:

- при высоте выталкивающей задней стенки и толщине штабеля транспортируемого сыпучего материала 1 м и ширине 2,0 м допустимая длина проектируемого бункер-перегрузателя составляет 7 м, т.е. его полезный объем может достигать 20 м^3 . Угол наклона, при котором реализуется полное заполнение желоба перегружателя, находится в пределах $33\text{--}35^\circ$.

Бункер-перегрузатель с такими параметрами за один цикл, соответствующий одному проходу выталкивающей задней стенки по желобу, обеспечит полную загрузку самосвала МоАЗ-7529 за 50–60 с.

При этом производительность перегружателя составит $12 \text{ м}^3/\text{мин}$; усилие на штоке приводного гидроцилиндра — 150 кН, что при скорости движения поршня силового гидроцилиндра $0,1 \text{ м/с}$

соответствует эффективной мощности 10–15 кВт.

Заключение

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Предложены и защищены патентами РФ оригинальные технические решения горнопроходческих бункер-перегрузателей на основе использования гравитационной загрузки с горизонтальной разгрузкой, выполняемой толкателем совместно с обратным перемещением секционного подвижного днища, без дополнительных технологических операций.

2. Разработаны и научно обоснованы методические подходы к выбору рациональных параметров предложенных бункер-перегрузателей.

3. Выполнены теоретические исследования и проведены предварительные расчеты для обоснования рациональных параметров предложенных схем бункер-перегрузателя.

Авторы выражают признательность за помощь коллегам и людям, чей вклад в данную работу носил чисто технический характер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хазанович Г. Ш. Актуальные направления научных исследований горнопроходческого оборудования // Горное оборудование и электромеханика. — 2018. — № 2. — С. 41–45.

2. 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.

3. Воронова Э. Ю., Хазанович Г. Ш. Методология параметрической оптимизации агрегированных проходческих систем // Горное оборудование и электромеханика. — 2020. — № 5. — С. 16–21. DOI: 10.26730/1816-4528-2020-5-16-21.

4. Rostami J., Chang S. H. A closer look at the design of cutterheads for hard rock tunnel-boring machines // Engineering. 2017, vol. 3, no. 6, pp. 892–904. DOI: 10.1016/j.eng.2017.12.009.

5. 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.

6. Roby J., Willis D. Achieving fast EPB advance in mixed ground. A study of contributing factors / Proceedings North American Tunneling. 2014, pp. 182–194.

7. Tunc 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


8. 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.

9. Носенко А. С., Домницкий А. А., Алтунина М. С., Зубов В. В. Результаты теоретических и экспериментальных исследований бункер — перегружателя с гидравлическим приводом транспортирующего элемента периодического действия // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 11. — С. 119-130. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-0-119-130.

10. Носенко А. С., Домницкий А. А., Хазанович В. Г., Носенко В. В., Зубов В. В., Кирсанов И. А. Патент RU 2702211 МПК В65G11/02. Конвейер для транспортирования сыпу-

чих и кусковых материалов; патентообладатель Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ) им. М.И. Платова — № 2018144214; заявл. 13.12.18; опубл. 04.10.2019, Бюл. № 28.

11. Носенко А. С., Домницкий А. А., Носенко В. В., Алтунина М. С., Зубов В. В. Патент RU2724041, МПК B65G 25/08. Конвейер для транспортирования сыпучих и кусковых материалов; патентообладатель Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ) им. М.И. Платова — № 2019133253; заявл. 17.10.2019; опубл. 18.06.2020, Бюл. № 17.

12. Бояркина И. В. Технологическая механика одноковшовых фронтальных погрузчиков: монография. — Омск: СибАДИ, 2011. — 336 с. 

REFERENCES

1. Khazanovich G. Sh. Actual directions of scientific research of mining equipment. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2018, no. 2, pp. 41 – 45. [In Russ].

2. Zhabin A. V., Polyakov A. V., Averin E. A., Linnik Yu. N. Design basis for tunnel boring machine cutter heads. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 6, pp. 156 – 164. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-156-164.

3. Voronova E. Yu., Khazanovich G. Sh. Methodology of parametric optimization of aggregated tunneling systems. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2020, no. 5, pp. 16 – 21. [In Russ]. DOI: 10.26730/1816-4528-2020-5-16-21.

4. Rostami J., Chang S. H. A closer look at the design of cutterheads for hard rock tunnel-boring machines. *Engineering*. 2017, vol. 3, no. 6, pp. 892 – 904. DOI: 10.1016/j.eng.2017.12.009.

5. 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.

6. Roby J., Willis D. Achieving fast EPB advance in mixed ground. A study of contributing factors. *Proceedings North American Tunneling*. 2014, pp. 182 – 194.

7. Tumas 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

8. 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.

9. Nosenko A. S., Domnickiy A. A., Altunina M. S., Zubov V. V. Theoretical and experimental research findings on batch-operation bin loader with hydraulically driven conveying element. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 11, pp. 119-130. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-0-119-130.

10. Nosenko A. S., Domnitsky A. A., Khazanovich V. G., Nosenko V. V., Zubov V. V., Kirsanov I. A. *Patent RU 2702211 IPC B65G11/02*. 04.10.2019. [In Russ].

11. Nosenko A. S., Domnitsky A. A., Nosenko V. V., Altunina M. S., Zubov V. V. *Patent RU 2724041, IPC B65G 25/08*. 18.06.2020. [In Russ].

12. Boyarkina I. V. *Technologicheskaya mekhanika odnokovshovykh frontal'nykh pogruchikov: monografiya* [Technological mechanics of single-bucket front-end loaders: monograph. Омск, SibADI, 2011, 336 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Носенко Алексей Станиславович¹ — д-р техн. наук, профессор, e-mail: asnosenko@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-9345-7709,

*Домницкий Алексей Александрович*¹ — д-р техн. наук,
e-mail: dom-a-a@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-9400-3365,
*Носенко Виктория Владимировна*¹ — канд техн. наук,
доцент, e-mail: vvnosenko@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-3003-8440,
*Зубов Виктор Владимирович*¹ — старший преподаватель,
e-mail: dyadkazub0@rambler.ru,
ORCID ID: 0000-0002-3629-8545,
*Кирсанов Иван Анатольевич*¹ — ассистент,
e-mail: hexomen@rambler.ru,
ORCID ID: 0000-0002-6632-904X,
¹ Шахтинский автодорожный институт (филиал)
Южно-Российского государственного политехнического
университета (НПИ) имени М.И. Платова.
Для контактов: Носенко А.С., e-mail: asnosenko@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*A.S. Nosenko*¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: asnosenko@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-9345-7709,
*A.A. Domnitsky*¹, Dr. Sci. (Eng.),
e-mail: dom-a-a@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-9400-3365,
*V.V. Nosenko*¹, Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor,
e-mail: vvnosenko@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-3003-8440,
*V.V. Zubov*¹, Senior Lecturer,
e-mail: dyadkazub0@rambler.ru,
ORCID ID: 0000-0002-3629-8545,
*I.A. Kirsanov*¹, Assistant,
e-mail: hexomen@rambler.ru,
ORCID ID: 0000-0002-6632-904X,
¹ Shakhty Automobile Road Institute,
Branch of the Platov South-Russian
State Polytechnic University (NPI),
346500, Shakhty, Russia.
Corresponding author: A.S. Nosenko, e-mail: asnosenko@mail.ru.

Получена редакцией 13.12.2021; получена после рецензии 25.06.2022; принята к печати 10.07.2022.
Received by the editors 13.12.2021; received after the review 25.06.2022; accepted for printing 10.07.2022.

