

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ БУНКЕР-ПЕРЕГРУЖАТЕЛЯ С ГИДРАВЛИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ ТРАНСПОРТИРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

А.С. Носенко¹, А.А. Домницкий², М.С. Алтунина¹, В.В. Зубов¹

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

² Российский дорожный научно-исследовательский институт, Москва, Россия

Аннотация: Объектом исследования является бункер-перегрузатель с гидравлическим приводом транспортирующего элемента периодического действия. Принят и обоснован критерий оптимальности при математическом моделировании процесса работы бункер-перегрузателя. Приведена расчетная схема для определения параметров бункер-перегрузателя. Обоснована система ограничений и принятых допущений при моделировании. Разработанная система уравнений позволяет определять допустимую длину бункер-перегрузателя на стадии проектирования. Введено понятие коэффициента вида груза и установлено его влияние на величину допустимой длины бункер-перегрузателя периодического действия. Разработана методика проведения экспериментальных исследований и обработки полученных данных с целью проверки адекватности и уточнения теоретически полученных зависимостей, составляющих основу математической модели, описывающей работу бункер-перегрузателя. Разработана и создана экспериментальная установка для проверки результатов, полученных при помощи математического моделирования. В качестве главного исследуемого параметра принята фактическая максимально допустимая длина перегружателя. Приведены в графическом виде результаты теоретических исследований по изучению влияния переменных факторов на искомые функции, а также результаты расчетов по определению параметров бункер-перегрузателя периодического действия в заданных условиях работы. В результате проведенных экспериментальных исследований и обработки результатов уточнены теоретически разработанные модели за счет получения численных значений коэффициента вида груза, учитывающего влияние гранулометрического состава транспортируемого материала.

Ключевые слова: горнопроходческое оборудование, математическое моделирование, бункер-перегрузатель периодического действия, транспортирующий элемент, экспериментальные исследования, погрузочное устройство, допустимая длина, коэффициент вида груза, система ограничений, допустимая длина бункер-перегрузателя.

Для цитирования: Носенко А. С., Домницкий А. А., Алтунина М. С., Зубов В. В. Результаты теоретических и экспериментальных исследований бункер-перегрузателя 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.

Theoretical and experimental research findings on batch-operation bin loader with hydraulically driven conveying element

A.S. Nosenko¹, A.A. Domnickiy², M.S. Altunina¹, V.V. Zubov¹

¹ Shakhty Road Institute (branch) of Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),
Shakhty, Russia, e-mail: mariyaltunina@mail.ru

² Russian Road Research Institute, Moscow, Russia

Abstract: The subject of the research is a batch-operation bin loader with hydraulically driven conveying element. The criterion of optimality is assumed and validated for mathematical modeling of the bin loader operation. The analytical model of the bin loader parameters is presented. The set of assumed constraints and assumptions in modeling is justified. The developed system of equations enables finding the allowable length of the loader bin at the blue-print stage. The article introduces the notion of a load category factor and finds its influence on the allowable length of the batch bin loader. The procedure is developed for the experimental research and processing of the obtained results for validity check and refinement of the theoretical relations within the mathematical model describing the bin loader performance. The experimental plant is designed and manufactured for testing the mathematical modeling results. The main test parameter is the actual maximum allowable length of the bin loader. The theoretical research findings on the influence exerted by variables on the target functions, as well as the calculated data on parameters of the batch-operation bin loader in present working conditions are given in graphical form. The experimental research and the data processing have refined the theoretical models by means of the obtained numerical value of the load category factor taking into account grain-size composition of load.

Key words: heading equipment, mathematical modeling, batch-operation bin-loader, conveying element, experimental research, loader, allowable length, load category factor, constraints, allowable length of bin loader.

For citation: 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;(11):119-130. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-0-119-130.

Введение

На протяжении последних лет актуальность повышения эффективности горно-проходческих работ не вызывает сомнений, что подтверждается рядом публикаций, посвященных рассматриваемой тематике [1–7]. Установлены закономерности формирования производительности проходческих машин при строительстве автомобильных тоннелей и разработке рудных месторождений, учитывающие взаимосвязь между производительностью исполнительного, погрузочного и транспортирующего органов. Предложены и обоснованы решения, позволяющие усовершенствовать конструкцию и

повысить надежность применяемой техники.

Необходимость моделирования и выбора параметров перегружателей в составе комплектов проходческого оборудования для проведения горных выработок связано с тем, что процесс погрузки и транспортирования горной массы в условиях рудников и тоннелей имеет существенное отличие — цикличность. Это связано с затратами времени на обмен автотранспортных средств [8]. Обеспечить непрерывность процесса погрузки и повысить эффективность производства работ на рудниках и в тоннелях возможно применением бункер-перегружателя,

который во время обмена (ожидания) автомобиля служит накопителем горной массы, поступающей от погрузочной машины (проходческого комбайна), а в процессе загрузки автомобиля является одновременно и накопителем и перегружателем [9].

Математическое моделирование работы бункер-перегрузателя

С целью повышения производительности и эффективности транспортирования сыпучих и кусковых материалов предложен и разработан бункер-перегрузатель с гидравлическим приводом транспортирующего элемента периодического действия [10].

Для определения оптимальных параметров бункер-перегрузателя периодического действия необходимо математическое моделирование процесса его работы.

Принципиальным при формулировании целевой функции и системы ограничений является вопрос о технологии работы бункер-перегрузателя в составе горнопроходческого оборудования.

Необходимо стремиться к такому сочетанию параметров бункер-перегру-

жателя, при котором загрузка последующего транспортного средства производилась бы с минимальным количеством циклов, желательно за один проход транспортирующего элемента по желобу перегружателя. Математически это условие можно записать в виде неравенства, которое будет главным ограничением при выборе параметров бункер-перегрузателя периодического действия

$$V_{\max} \geq V_{\text{тр.с}},$$

где $V_{\max}$ — максимальный объем материала в бункер-перегрузателе, м³; $V_{\text{тр.с}}$ — объем кузова транспортного средства (самоходного вагона), м³.

В качестве критерия оптимальности выбираемых параметров бункер-перегрузателя периодического действия в данном случае принята производительность за чистое время погрузки Q . Расчетная схема для определения параметров бункер-перегрузателя периодического действия представлена на рис. 1.

Целевая функция

$$Q = B_n \cdot H_{\text{сн}} \cdot v, \text{ м}^3/\text{с} \Rightarrow \max,$$

где B_n — ширина бункер-перегрузателя, м; v — скорость транспортирующего элемента, м/с; $H_{\text{сн}}$ — высота слоя материала в бункере, м.

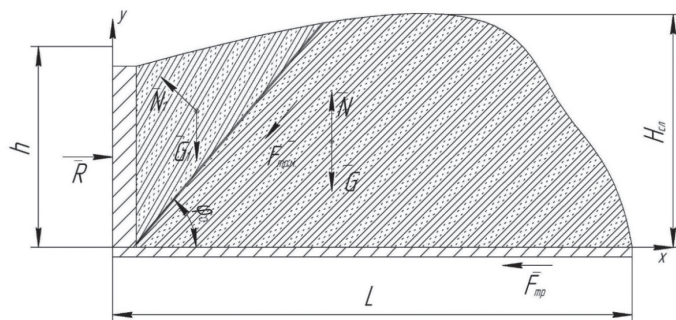


Рис. 1. Расчетная схема для определения параметров бункер-перегрузателя периодического действия: N, N_1 — силы реакций опор; G, G_1 — силы тяжести; $F_{\text{тр}}$ — сила трения материала по днищу бункер-перегрузателя; $F_{\text{тр.м}}$ — сила, соответствующая предельному напряженному состоянию штабеля; φ_0 — угол естественного откоса; L — длина бункер-перегрузателя; h — высота транспортирующего элемента; $H_{\text{сн}}$ — высота слоя материала; R — сила перемещения материала

Fig. 1. Analytical model of batch-operation bin loader parameters: N, N_1 —reactions of supports; G, G_1 —gravity forces; F_{fr} —friction force of material on bin loader bottom; $F_{\text{fr,m}}$ —force conformable with limiting stress state of stockpile; φ_0 —angle of repose; L —length of bin loader; h —height of conveying element; $H_{\text{сн}}$ —height of material layer; R —force of material conveying

Максимальный объем материала в бункер-перегрузателе, м³

$$V_{\max} = B_{\text{п}} \cdot H_{\text{сл}} \cdot L.$$

Максимальная длина перегружателя, обеспечивающая неразрывность грузопотока, определяется из соотношения

$$R = F_{\text{тр}} \leq F_{\text{тр.м}}$$

Данное выражение подразумевает состояние исследуемой системы, при котором объем погружаемого материала перемещается по перегружателю непрерывным потоком. То есть состояние, когда сила на перемещение материала R , равная силе трения $F_{\text{тр}}$, не превышает силу, соответствующую предельному напряженному состоянию штабеля $F_{\text{тр.м}}$, которая в свою очередь зависит от физико-механических свойств транспортируемого материала, в том числе от угла внутреннего трения ρ_0 , коэффициента трения погружаемого материала по желобу перегружателя $\mu_{\text{тр}}$ и коэффициента внутреннего трения транспортируемого материала $\mu_{\text{тр.м}}$.

Процесс взаимодействия транспортирующего элемента со штабелем сыпучего материала рассмотрен на основе закона Ш. Кулона. В настоящее время известен ряд методов решения плоской задачи предельного равновесия. При решении частных задач при малом объеме исследований рекомендуются использовать графоаналитический метод интегрирования уравнений предельного напряженного состояния сыпучей среды, разработанный проф. С.С. Голушкевичем. Этот метод получил наиболее широкое распространение в теории погрузочно-транспортных машин, он обеспечивает необходимую для практических целей точность при расчетах усилий, действующих на транспортирующие элементы в процессе взаимодействия их со штабелем сыпучей среды.

Со стороны транспортирующего элемента на призму выпирания материала,

находящегося в предельном напряженном состоянии, в поверхности скольжения возникают кулоновские силы: сила трения грунта по грунту F_1 , сила сцепления грунта $F_{\text{сц}}$ и нормальная сила N .

Силы сцепления обусловлены слипанием частиц материала, именно эти силы превращают глину и грунт в камнеподобное тело при уменьшении влаги.

Таким образом, физическое свойство сцепления присуще материалам, в составе которых имеется соответствующее количество мельчайших частиц, которые при увлажнении превращаются в цементобразное тело, придающее связность более крупным частицам. Таким свойством не обладают: щебень, галька, кусковые полезные ископаемые в горной промышленности и другие материалы. Кроме того, сыпучие материалы при малой влажности обладают незначительным сцеплением, поэтому в расчетах силы сцепления не учитываются [11, с. 174].

Основными параметрами кусковых сыпучих материалов являются: средний размер куска, коэффициент трения скольжения материала по стальному днищу, коэффициент трения материала по неподвижному материалу, насыпная объемная плотность материала в штабеле и др. Относительная кусковатость материала характеризуется отношением размера (диаметра) куска $d_{\text{ср}}$ к высоте транспортирующего элемента h , которая может изменяться в пределах $0,025 \div 0,3$ [11, с. 173].

Коэффициент трения скольжения материала по стали $\mu_{\text{тр}}$ равен тангенсу угла скольжения материалов по стальной поверхности, значение которого обычно не превышает 40° . Поэтому коэффициент $\mu_{\text{тр}}$ в реальных условиях изменяется в пределах $\mu_{\text{тр}} = 0,3 \div 0,84$ [11, с. 173]. Коэффициент внутреннего трения транспортируемого материала $\mu_{\text{тр.м}} = \text{tg} \rho_0$.

После ряда преобразований согласно расчетной схеме, представленной на

рис. 1, получим следующее исходную систему уравнений:

$$F_{\text{тр}} = B_{\text{п}} \cdot H_{\text{сч}} \cdot L \cdot \rho \cdot g \cdot \mu_{\text{тр}};$$

$$F_{\text{тр.м}} = S_{\text{пр}} \cdot B_{\text{п}} \cdot L \cdot \rho \cdot g \cdot \mu_{\text{тр.м}},$$

где ρ — плотность материала, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с².

Из этой системы следует исходное уравнение:

$$B_{\text{п}} \cdot H_{\text{сч}} \cdot L \cdot \rho \cdot g \cdot \mu_{\text{тр}} \leq S_{\text{пр}} (\cos \varphi_0 \cdot \mu_{\text{тр.м}} + \sin \varphi_0) \cdot B_{\text{п}} \cdot \rho \cdot g / \cos \varphi_0,$$

где $S_{\text{пр}}$ — площадь призмы выпирания материала.

После сокращения равных параметров, входящих в обе части уравнения, получим следующее выражение для определения допустимой длины бункер-перегрузателя периодического действия:

$$L \leq S_{\text{пр}} (\cos \varphi_0 \cdot \mu_{\text{тр.м}} + \sin \varphi_0) / \cos \varphi_0 \cdot H_{\text{сч}} \cdot \mu_{\text{тр}}.$$

Объем погружаемого материала перемещается по желобу непрерывным потоком, при неизменной высоте слоя, совпадающим по величине с высотой транспортирующего элемента. В этом случае площадь призмы выпирания можно определить по формуле

$$S_{\text{пр}} = h^2 \cdot \text{ctg} \varphi_0 / 2.$$

Тогда допустимая длина бункер-перегрузателя периодического действия определяется как

$$L \leq H_{\text{сч}} \cdot \text{ctg} \varphi_0 \cdot (\mu_{\text{тр.м}} + \text{tg} \varphi_0) / 2 \mu_{\text{тр}}.$$

В случае равенства углов естественного откоса и угла внутреннего трения, т.е. когда $\mu_{\text{тр.м}} = \text{tg} \varphi_0 = \text{tg} \varphi_0$ выражение принимает вид

$$L \leq H_{\text{сч}} / 2 \mu_{\text{тр}}.$$

Искомая функциональная система

$$Q = f(B_{\text{п}}, H_{\text{сч}}, v);$$

$$L = f(\mu_{\text{тр}}, \mu_{\text{тр.м}}, B_{\text{п}}, h, H_{\text{сч}}, \rho, \varphi_0);$$

$$R = f(\mu_{\text{тр}}, \mu_{\text{тр.м}}, B_{\text{п}}, h, H_{\text{сч}}, \rho, \varphi_0).$$

Разработана методика проведения эксперимента по изучению влияния переменных факторов на искомые функции с последующим подтверждением адекватности математических моделей реальному процессу погрузки. В частности, зависимость допустимой длины бункер-перегрузателя периодического действия от высоты слоя материала, высоты толкающего элемента, коэффициента трения материала по желобу.

$$L = f(\mu_{\text{тр}}, \mu_{\text{тр.м}}, B_{\text{п}}, h, H_{\text{сч}}, \rho, \varphi_0, d_{\text{ср}});$$

В эксперименте использован метод исследования влияния одного из параметров при постоянных значениях остальных, так называемых базовых параметров. При этом значения угла естественного откоса принимается в зависимости от вида транспортируемого материала, характеризуемого значением плотности. Скорость перемещения транспортирующего элемента, не варьируется, а принимается по результатам исследований [12], равной 0,1 м/с.

При принятой системе допущений такие переменные параметры, как $\mu_{\text{тр.м}}$, $B_{\text{п}}$, ρ , φ_0 , $d_{\text{ср}}$ на допустимую длину бункер-перегрузателя периодического действия не оказывают существенного влияния. Поэтому фактически проведены исследования по изучению влияния высоты слоя материала и коэффициента его трения на допустимую длину бункер-перегрузателя периодического действия при значениях базовых параметров, приведенных в табл. 1.

Таблица 1

Значения базовых параметров исследуемой системы
Values of basic parameters in the test system

$\mu_{\text{тр}}$	$\mu_{\text{тр.м}}$	$B_{\text{п}}$	h	$H_{\text{сч}}$	ρ (φ_0)
0,3	0,85	2	0,5	0,5	2200 (40)

Однако, как свидетельствуют проведенные ранее исследования [11], гранулометрический состав транспортируемого материала, характеризуемый средним диаметром куска, оказывает существенное влияние на формирование зон деформации и, как следствие, на допустимую длину бункер-перегрузателя периодического действия. Влияние указанного параметра планируется учесть коэффициентом вида груза $k_{в.г.}$, полученным в результате проведения экспериментальных исследований. Тогда выражение для допустимой длины бункер-перегрузателя периодического действия принимает вид

$$L \leq k_{в.г.} \cdot H_{св} / \mu_{тр}.$$

Экспериментальная установка для проведения исследований

Для проверки результатов, полученных при математическом моделировании процесса работы бункер-перегрузателя периодического действия, разработана и создана экспериментальная установка, которая представляет собой действующий макет бункер-перегрузателя, выполненного в масштабе 1:10 (рис. 2).

Установка состоит из рамы маслостанции 1, выполненной из металлическо-

го уголка 50×50×3, емкости для масла (бак) 2, емкости с материалом 11, электродвигателя асинхронного 3, работающего от сети 380В (50Гц) (мощность 1,1 кВт, скорость вращения вала 1450 об/мин, ГОСТ Р 51689-2000), масляного насоса шестеренного Г11-22А 4 (производительность 17 л/мин, номинальное давление 2,5 мПа), гидрораспределителя 5 моноблочного типа Badestnost 01P40-A1GKz1 (номинальное давление 25 мПа, номинальный расход 40 л/мин), рамы 7, на которую установлен гидроцилиндр 8 и желоба 10, в котором расположен толкающий элемент 9, шарнирно соединенный с гидроцилиндром 8.

Рама 7 изготовлена путем электродуговой сварки из металлической трубы прямоугольного профиля (высота 40 мм, ширина 80 мм, толщина металла 3 мм). Конструктивно предусмотрены кронштейны для установки гидроцилиндра 8 и измерительных приборов: манометра и датчика давления 6.

Желоб выполнен из листового металла толщиной 3 мм для исключения деформации стенок и дна желоба при проведении испытаний. Жестко закреплен к раме, имеет днище и два борта, выполнен в масштабе 1:10 и имеет раз-

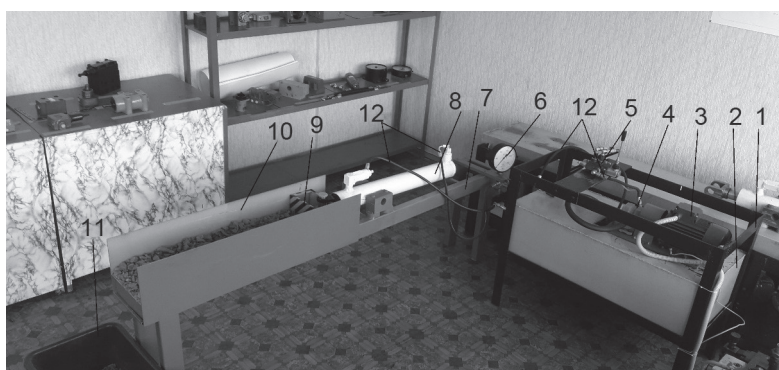


Рис. 2. Экспериментальная установка: 1 — рама маслостанции; 2 — бак; 3 — электродвигатель; 4 — насос; 5 — гидрораспределитель; 6 — манометр; 7 — рама; 8 — гидроцилиндр; 9 — толкающий элемент; 10 — желоб; 11 — емкость с материалом; 12 — рукав высокого давления (РВД)

Fig. 2. Experimental plant: 1—oil station frame, 2—container; 3—electric motor, 4—pump; 5—distributive valve; 6—manometer; 7—frame; 8—hydraulic cylinder; 9—pushing element; 10—chute; 11—reservoir with material; 12—high pressure hose (NPH)

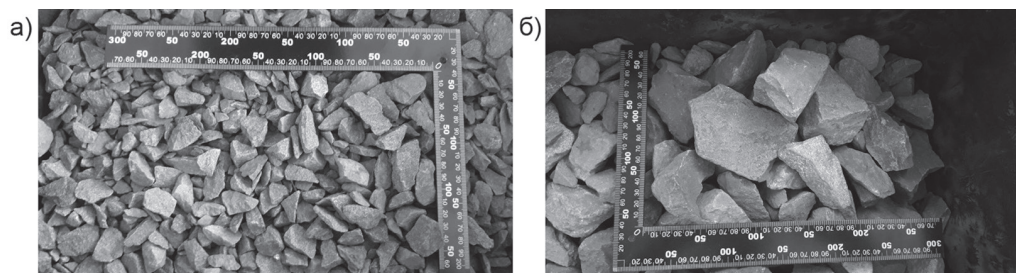


Рис. 3. Сыпучий материал: фракция 15–30 мм (а); фракция 50–70 мм (б)

Fig. 3. Granular material: (a) 15–30 mm size; (b) 50–70 mm size

меры: ширина 250 мм высота 150 мм длина 1000 мм.

Гидроцилиндр 8 двухстороннего действия имеет диаметр и длину штока 50 мм и 800 мм соответственно. Он шарнирно закреплен на раме с возможностью изменения угла наклона относительно горизонтальной плоскости.

Толкающий элемент выполнен в виде металлической плиты (ширина — 250 мм, высота — 100 мм, толщина — 3 мм), закрепленной на кронштейне, изготовленном из трубы квадратного профиля 10×10 мм. С помощью кронштейна толкающий элемент шарнирно соединяется с проушинами гидроцилиндра 8 стопорным пальцем.

Для гидравлических линий используются рукава высокого давления (РВД) powermaster 1sn en 853 1/4" 12, соединенные при помощи обжимных муфт и резьбовых фитингов. РВД усилены одной высокопрочной металлической оплеткой. Внутренний слой РВД состоит из синтетической резины, стойкой к маслам, а наружный слой — из абразивостойкой синтетической резины, стойкой к воздействию масла, топлива, атмосферных осадков, ультрафиолетового излучения. Рабочая температура РВД: от –40 до +100 °С.

Исходя из принятого масштаба установки в качестве сыпучего материала, выбран щебень двух фракций: 15–30 мм и 50–70 мм (рис. 3). Сыпучий материал загружается в желоб перегружателя

вручную, выгрузка происходит в специальную емкость выталкиванием массы материала транспортирующим элементом при помощи гидроцилиндра.

Экспериментальные исследования

Для проверки адекватности и уточнения теоретически полученных зависимостей, составляющих основу математической модели, описывающей работу бункер-перегрузателя с гидравлическим приводом толкающего элемента периодического действия, и используемую для выбора его параметров на стадии проектирования необходимо проведение экспериментальных исследований.

В качестве главного исследуемого параметра принята фактическая максимально допустимая длина перегружателя, обеспечивающая в заданных условиях реализацию одного из режимов работы.

Программа экспериментальных исследований для одного из режимов схематично представлена в табл. 2.

Методика определения фактической допустимой длины перегружателя заключается в следующем. В соответствии с табл. 2 формируется исследуемый погружаемый материал в желобе конвейера длиной, равной расчетному значению, и производится его перемещение посредством толкающего элемента с фиксацией выполнения или невыполнения требуемого режима движения. Каждый

Таблица 2

Программа эксперимента
Experimentation program

Исследуемый режим	Крупность кусков материала, d_{cp} , м	Высота слоя, H_{cl} , м	Фактическая допустимая длина перегружателя, L_{ϕ} , м
Режим 1	0,015	0,025	X
		0,05	X
		0,1	X
Режим 1	0,05	0,05	X
		0,1	X

опыт выполняется не менее 7 раз. Затем определяется вероятность достижения положительного результата, и если она оказывается выше заданного значения, то длина увеличивается на величину, пропорциональную среднему диаметру погружаемого куска, и опыт повторяется. В случае, если вероятность меньше заданной, то длина соответственно уменьшается. Фактической допустимой длиной перегружателя считается математическое ожидание зафиксированных длин, при которых полученная вероятность соответствует заданной.

После выполнения всех опытов, соответствующих одному режиму, определяется математическое ожидание значений фактической допустимой длины и вычисляется коэффициент корреляции полученных результатов, которые сопоставляются с результатами расчетов. Данные заносятся в табл. 3.

После проведения экспериментов и обработки результатов уточняются теоретически разработанные модели за счет

получения численных значений коэффициента $k_{в.г.}$, учитывающего влияния гранулометрического состава транспортируемого материала.

Приведем результаты обработки экспериментальных исследований на примере одной из серии опытов, численные показатели которой приведены в табл. 4.

Задавшись доверительной вероятностью равной 0,8, получим значение фактической допустимой длины перегружателя

$$L_{\phi} = \frac{1}{n_i} \sum_{i=1}^n L_i \quad \text{при } p \geq p_{доп}$$

$$L_{\phi} = 1/4(0,4 + 0,385 + 0,415 + 0,43) = 0,41 \text{ м.}$$

Расчетное значение допустимой длины перегружателя для данных условий составляет

$$L \leq H_{cl} / \mu_{тр};$$

$$L \leq 0,1/0,25 = 0,4.$$

Таким образом, эксперимент практически полностью подтверждает теоретические выкладки для данных условий.

Таблица 3

Обработка результатов эксперимента
Experimental data processing

Высота слоя, м	Длина слоя материала L_i , м	Количество опытов, n	Количество положительных результатов, n_i	Статистическая вероятность, $P = n_i/n$	Фактическая допустимая длина, L_{ϕ} , м
H_{cl}	$L_1 = L$	7			$L_{\phi} = \frac{1}{n_i} \sum_{i=1}^n L_i$ при $p \geq p_{доп}$
	$L_2 = L - d_{cp}$	7	X	X	
	$L_3 = L + d_{cp}$	7	X	X	
	$L_i = L_{i-1} + d_{cp}$	7	X	X	

Таблица 4

Результаты обработки экспериментальных исследований
Interpretation of experimental research results

Отношение диаметр куска к высоте слоя $d_{\text{ср}}/H_{\text{сл}}$	Длина слоя материала L_i , м	Количество опытов, n	Количество положительных результатов, n_i	Статистическая вероятность, $P = n_i/n$	Фактическая допустимая длина, L_ϕ , м
0,015/0,1 = 0,15	0,4	7	7	1	$L_\phi = \frac{1}{n_i} \sum_{i=1}^n L_i$ при $p \geq p_{\text{доп}}$
	0,385	7	7	1	
	0,415	7	6	0,86	
	0,43	7	6	0,86	
	0,445	7	4	0,57	

Далее приведем результаты эксперимента, характерные для другой точки (табл. 5).

Задавшись доверительной вероятностью равной 0,8, получим значение фактической допустимой длины перегружателя

$$L_\phi = \frac{1}{n_i} \sum_{i=1}^n L_i \quad \text{при } p \geq p_{\text{доп}}$$

$$L_\phi = 1/7(0,4 + 0,35 + 0,45 + 0,5 + 0,55 + 0,6 + 0,65) = 0,5 \text{ м.}$$

Расчетное значение допустимой длины перегружателя для данных условий составляет

$$L \leq 0,1/0,25 = 0,4.$$

В данном случае экспериментальное значение допустимой длины перегружателя значительно превышает расчетное. При построении гипотезы, было сделано предположение, что гранулометрический состав погружаемого материала будет влиять на физическую картину взаимодействия транспортирующего элемента

с сыпучей средой, что предложено учитывать коэффициентом, зависящим от среднего размера погружаемого куска. Более точно коэффициентом, функционально зависящим от отношения размера куска к высоте слоя материала. Результаты эксперимента при $d_{\text{ср}} = H_{\text{сл}}$ показали наибольшее отклонение фактической длины перегружателя по отношению к расчетной в сторону увеличения. Объяснение данному факту можно найти в том, что при приближении размера среднего погружаемого куска к высоте слоя материала значение $\text{tg}\varphi_0$ превышает $\text{tg}\varphi_0$, теоретически стремясь к бесконечно большому числу. В нашем случае можно считать, что математическая интерпретация коэффициента имеет вид:

$$k_{\text{в.г.}} = 1 + (d_{\text{ср}}/H_{\text{сл}})^2.$$

Формула справедлива в диапазоне проведенных экспериментальных исследований $0 \leq d_{\text{ср}}/H_{\text{сл}} \leq 1$.

Таблица 5

Результаты обработки экспериментальных исследований
Interpretation of experimental research results

Отношение диаметр куска к высоте слоя $d_{\text{ср}}/H_{\text{сл}}$	Длина слоя материала L_i , м	Количество опытов, n	Количество положительных результатов, n_i	Статистическая вероятность, $P = n_i/n$	Фактическая допустимая длина, L_ϕ , м
0,05/0,1 = 0,5	0,4	7	7	1	$L_\phi = \frac{1}{n_i} \sum_{i=1}^n L_i$ при $p \geq p_{\text{доп}}$
	0,35	7	7	1	
	0,45	7	7	1	
	0,5	7	7	1	
	0,55	7	6	0,86	
	0,6	7	6	0,86	
	0,65	7	4	0,57	

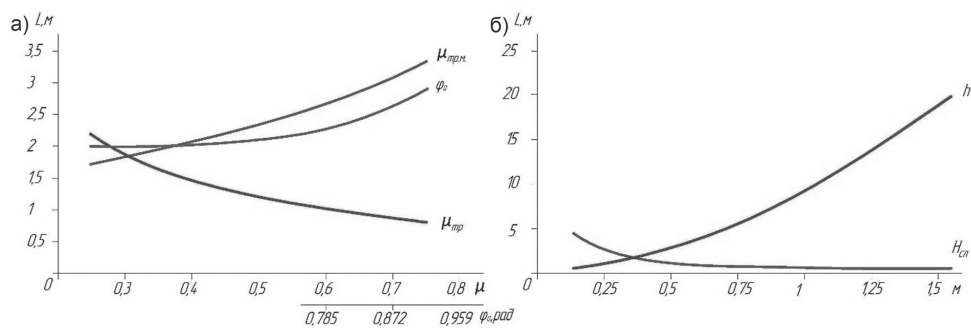


Рис. 4. Зависимости длины перегружателя: от коэффициентов трения и угла естественного откоса (а); от высоты слоя материала и высоты толкателя (б)

Fig. 4. Dependence of loader length on: (a) friction coefficient and angle of repose; (b) height of material layer and height of push-type actuator

Таким образом, формула для определения допустимой длины перегружателя принимает вид:

$$L \leq (1 + (d_{\text{ср}} / H_{\text{сл}})^2) H_{\text{сл}} / \mu_{\text{тр}}.$$

Результаты исследований

Теоретические расчеты показали, что при высоте толкающей плиты и слоя материала 1 м и ширине 2 м длина бункер-перегружателя периодического действия может достигать 10 м, т.е. объем материала составит 20 м³ (рис. 4).

Бункер-перегружатель такого объема за один проход толкающей плиты может, например, целиком загрузить самосвал МоАЗ-7529 емкостью 12 м³ примерно за 60 с. Это соответствует производительности 10 м³/мин, а усилие на штоке приводного гидроцилиндра составит 132 кН, что при скорости движения поршня 0,1 м/с соответствует потребляемой мощности порядка 15 кВт.

Результаты эксперимента графически представлены на рис. 4.

Исследования на экспериментальной установке показали, что при тех же параметрах толкающей плиты и слоя материала длина бункер-перегружателя периодического действия составит 7 м, при этом его производительность — 12 м³/мин, усилие на штоке приводного гидроцилиндра — 88 кН, а значение коэффициента вида груза — 1,0225.

Проведенные экспериментальные исследования позволили уточнить математическую модель определения допустимой длины бункер-перегружателя с гидравлическим приводом транспортирующего элемента периодического действия и подтвердили ее адекватность. Результаты исследования в дальнейшем будут использованы при разработке методики выбора основных параметров бункера-перегружателя в составе комплекта горнопроходческого оборудования, что позволит обоснованно производить их параметрическую оптимизацию на стадии проектирования по критерию оптимальности (производительность за чистое время погрузки).

Заключение

В результате проведенного математического моделирования процесса работы бункер-перегружателя с гидравлическим приводом толкающего элемента периодического действия на основании принятого критерия оптимальности и обоснованной системы ограничений разработана система уравнений, позволяющая определить основные геометрические параметры бункер-перегружателя на стадии проектирования. А также предложено понятие коэффициента вида груза, устанавливающего зависимость формирования зон деформации

от гранулометрического состава транспортируемого материала и оценено его влияние на величину допустимой длины бункер-перегрузателя.

Экспериментальные исследования, проведенные при помощи действующей модели бункер-перегрузателя периодического действия, выполненной в масштабе 1:10, позволили получить числен-

ные значения коэффициента вида груза. Они также подтвердили адекватность тематических моделей реальному процессу с максимальным расхождением расчетных и экспериментальных данных, не превышающим 12%. Ошибка в определении средних опытных значений составляет не более 20% при уровне доверительной вероятности 0,9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Roby J., Willis D. Achieving fast EPB advance in mixed ground. A study of contributing factors // Proc. North American Tunneling, 2014, pp. 182—194.
5. 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.
6. 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.
7. Хазанович Г. Ш. Актуальные направления научных исследований горнопроходческого оборудования // Горное оборудование и электромеханика. — 2018. — № 2. — С. 41—45.
8. Хазанович В. Г., Филоненко А. А. Актуальность оптимизации рабочих процессов, конструкций и параметров погрузочных органов проходческих комбайнов избирательного действия / Перспективы развития Восточного Донбасса: сборник научных трудов. Ч. 2. — Новочеркасск: ЮРГТУ, 2009. — С. 318—321.
9. Носенко А. С., Домницкий А. А., Шемшур Е. А. Строительство транспортных тоннелей с применением комбайновой технологии // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2016. — № 3. — С. 63—70.
10. Хазанович Г. Ш., Носенко А. С., Домницкий А. А., Носенко В. В., Зубов В. В. Патент РФ № 2017110437, 21.03.2018. Конвейер для транспортирования сыпучих и кусковых материалов. 2018. Бюл. № 24.
11. Бояркина И. В. Технологическая механика одноковшовых фронтальных погрузчиков: монография. — Омск: СибАДИ, 2011. — 336 с.
12. Носенко А. С., Исаков В. С., Домницкий А. А., Зубов В. В. Моделирование переходных процессов в гидроприводе погрузочно-транспортных модулей // Интернет-журнал «Наукоедение». — 2017. — Т. 9. — № 2. <http://naukovedenie.ru/PDF/94TVN217.pdf>. — Загл. с экрана. — яз. рус., англ. **МИАБ**

REFERENCES

1. 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.
2. 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.

3. 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.

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

5. 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

6. 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.

7. Khazanovich G.Sh. Actual directions of scientific research of mining equipment. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2018, no 2, pp. 41–45. [In Russ].

8. Khazanovich V.G., Filonenko A.A. Relevance of optimization of working processes, designs and parameters of loading bodies of selective-drive heading combines. *Perspektivy razvitiya Vostochnogo Donbassa: sbornik nauchnykh trudov*. Ch. 2 [Prospects of development of Eastern Donbass: Collection of scientific papers. Part. 2], Novocherkassk, YURGTU, 2009, pp. 318–321.

9. Nosenko A.S., Domnitskiy A.A., Shemshura E.A. onstruction of transport tunnels using combine technology. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki*. 2016, no 3, pp. 63–70. [In Russ].

10. Khazanovich G.Sh., Nosenko A.S., Domnitskiy A.A., Nosenko V.V., Zubov V.V. *Patent RU 2017110437*, 21.03.2018.

11. Boyarkina I.V. *Tekhnologicheskaya mekhanika odnokovshovykh frontal'nykh pogruzchikov: monografiya* [Technological mechanics of single-bucket front loaders, monograph], Omsk, SibADI, 2011, 336 p.

12. Nosenko A.S., Isakov V.S., Domnitskiy A.A., Zubov V.V. Simulation of transient processes in excessive handling and transport modules. *Internet-zhurnal «Naukovedenie»*. 2017. Vol. 9, no 2. <http://naukovedenie.ru/PDF/94TVN217.pdf>. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Носенко Алексей Станиславович¹ — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой, e-mail: asnosenko@mail.ru,

Домницкий Алексей Александрович — канд. техн. наук, заместитель директора по инновационному развитию, Российский дорожный научно-исследовательский институт,

Алтунина Мария Сергеевна¹ — канд. техн. наук, доцент, e-mail: mariyaltunina@mail.ru,

Зубов Виктор Владимирович¹ — старший преподаватель,

¹ Шахтинский автодорожный институт (филиал) Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова.

Для контактов: Алтунина М.С., e-mail: mariyaltunina@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.S. Nosenko¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Chair, e-mail: asnosenko@mail.ru,

A.A. Domnitskiy, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Director for Innovation Development, Russian Road Research Institute, Moscow, Russia,

M.S. Altunina¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

V.V. Zubov¹, Senior Lecturer,

¹ Shakhty Road Institute (branch) of Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), 346500, Shakhty, Russia.

Corresponding author: M.S. Altunina, e-mail: mariyaltunina@mail.ru.