

## Физико-механические процессы процесса погрузки при проходке тоннелей с учетом влияния характеристик материала

*А.С. Носенко, А.А. Домницкий, Е.А. Меньшенина*

*Шахтинский институт (филиал) ЮРГПУ(НПИ) имени М.И. Платова*

**Аннотация:** В статье рассмотрены факторы, определяющие эффективность применения комбайновой технологии строительства транспортных тоннелей. Поскольку одним из факторов, сдерживающих рост скорости проведения тоннелей, является нагребаящая часть комбайна, в статье выполнен анализ факторов, влияющих на эффективность погрузки. Рассмотрен стохастический характер взаимодействия с разрушенной горной массой. Выполнен анализ разработанных подходов к определению производительности и нагрузок исполнительного органа с нагребаящими лапами со штабелем разрушенной горной массы. Проанализировано влияние формы частиц погружаемого материала и геометрических соотношений погрузочного органа и средней крупности частиц материала. Выявлено, что степень влияния формы частиц не превышает статистических погрешностей, возникающих при исследовании процесса погрузки крупнокусковой горной массы, а геометрические соотношения оказывают существенное влияние на нагрузки и производительность. При определении нагрузок предлагается применять модель с учетом коэффициента линейных пропорций, а для расчета производительности нагребаящей части необходимо применять модель, учитывающую влияние активного объема на формирование выходных характеристик системы. С учетом влияния описанных факторов, расчетное значение производительности и нагрузок возрастает по сравнению с обобщенными моделями, что подтверждает целесообразность применения описанных зависимостей.

**Ключевые слова:** Проходка тоннелей, факторы формирования производительности, проходческие комбайны избирательного действия, коэффициент формы, коэффициент линейных пропорций, активный объем.

Строительство транспортных магистралей связано с повышенными требованиями к их долговечности, капитальности, эксплуатационным качествам, включая все инженерные конструкции и дорожные сооружения. Тоннели широко используются в современном дорожном строительстве, являются дорогостоящими конструктивными системами, включающими эксплуатационное оборудование; они относятся к первому классу сооружений по степени их капитальности.

Применение тоннелей в горных условиях является альтернативой обхода препятствий, сокращая протяженность и величину уклонов пути, повышая стабильность и скорость движения транспорта и безопасность

---

эксплуатации. В городских условиях применяются тоннели для обеспечения транспортных развязок в случаях многоуровневого движения транспорта, разделения потоков транспорта и снижения их интенсивности, а также повышения безопасности пешеходов [1,2].

Эффективность строительства тоннелей в первую очередь связано со скоростью их проходки. Данный факт установлен русским горным инженером Л.Д. Шевяковым в 50-х годах XX века. Он утверждал, что при повышении скорости проходки выработок повышается эффективность, сокращается срок окупаемости капиталовложений. Следует отметить, что повышение скорости проходки соответствует повышению коэффициента использования строительного оборудования, при этом эксплуатационная производительность оборудования приближается к технической. При этом постоянные (накладные) расходы остаются практически неизменными, и следовательно удельные расходы на 1 метр пройденной выработки (тоннеля) снижаются обратно пропорционально скорости проведения.

Для обеспечения высокоскоростной проходки необходима рациональная эксплуатационная работа, обеспечивающая организацию процессов проведения тоннелей, выдачу разрушаемой горной массы, перемещение в забой материалов для обеспечения вспомогательных процессов [3]. Инженерная задача заключается в том, что из поля допустимых типов оборудования с различными параметрами необходимо сформировать все возможные сочетания, из числа которых отбираются конструктивно реализуемые. Из полученных реализуемых вариантов отбираются те, которые реализуют целевую функцию - максимальную скорость проходки тоннеля - с учетом определенной системы ограничений. В рамках такой задачи возможны различные сочетания технологий, принципов и организации работ, позволяющих достичь высокую скорость проходки тоннелей [4].

---

При выполнении проходческих работ в тоннелях и рудниках как правило имеются технологические перерывы, связанные с применением средств периодического действия - автомашин для перемещения горной массы. Данный фактор приводит к цикличности технологических процессов. Возможны два варианта простоев - при недостаточном количестве автосамосвалов ожидание прибытия следующего автомобиля под погрузку; при большом количестве машин возникают трудности с разминровкой и возрастает стоимость проходки тоннелей (рост эксплуатационных расходов и амортизационных отчислений). При работе в комплекте со средствами транспорта цикличного действия недостаточно применения перегружателей, чтобы сократить простои; необходимо включение в комплект оборудования для проходки тоннелей бункера, аккумулирующего разрушенную породу в период обмена транспортных средств под погрузкой.

В случае строительства тоннелей методом проходки подземных выработок для закрепления их сводов могут быть применены обделки различных конструктивных и технологических решений: из монолитного железобетона, сборных железобетонных элементов; сводчатые комбинированные, а также из набрызг-бетона [5,6].

Для строительства тоннелей широко применяются проходческие комбайны, если позволяют горно-геологические условия. Преимуществом является отсутствие буровзрывных работ, которые неизбежно приводят к взрывным деформациям целого массива горных пород. Разрушение горных пород исполнительным органом комбайна происходит в процессе резания, который оказывает минимальное динамическое воздействие, сохраняя устойчивость массива горных пород. Комбайны избирательного действия имеют существенное преимущество, способствующее росту скорости проходки - они позволяют совместить основные технологические процессы: процесс разрушения и процесс погрузки горной массы, обеспечивается

---

формирование достаточно ровной поверхности свода тоннеля, сокращается время устройства обделки тоннеля. Одновременно осуществляется непрерывная перегрузка разрушенной породы на перегружатели, связанные с бункерами-накопителями, в результате чего темпы строительства тоннелей могут возрасти в 2 раза. При этом, благодаря отсутствию буровзрывных работ существенно снижается стоимость строительства тоннеля, улучшаются условия труда рабочих, лучше обеспечивается безопасность проведения работ.

Одним из факторов, сдерживающих рост скорости проведения тоннелей, зачастую становится нагребная часть комбайна - ее производительность оказывается ниже, чем производительность исполнительного органа по разрушению. В число задач исследования, направленного на повышение эффективности строительства тоннелей, входит анализ факторов, влияющих на эффективность работы погрузочного органа. Существенное влияние на формирование производительности и нагрузок на погрузочном органе оказывает стохастический характер взаимодействия с рабочей средой - разрушенной горной массой, которая может быть описана множеством характеристик, носящих случайный характер и формирующих представление о структуре и строении этой среды.

Чтобы оценить предельные значения производительности для условий эксплуатации конкретного объекта, применяется два подхода: определение достигнутой мгновенной производительности комбайна и достигнутой пропускной производительности конвейера. Первый подход соответствует соотношению максимального объема материала на конвейере к времени прохождения его по конвейеру; для второго производительность определяется как произведение максимальной площади поперечного сечения транспортируемого потока горной массы на скорость его перемещения.

Модель расчета производительности и нагрузок, разработанная Е.А.

---

Крисаченко, основана на экспериментальных исследованиях взаимодействия исполнительного органа с нагребными лапами со штабелем разрушенной горной массы. Было установлено, что и производительность, и нагрузка зависят от следующих величин: ширины захвата лап, глубины внедрения, высоты сдвигаемого при захвате слоя материала, плотности материала в насыпном состоянии. При погрузке горной массы ее перемещение осуществляется в двух плоскостях: в плоскости движения исполнительного органа и в плоскости, перпендикулярной ей. На форму и размеры этих зон влияют форма частиц погружаемого материала и их размеры. Неравномерность, дискретность и стохастичность строения горной массы описывается двумя коэффициентами. Первый из них, коэффициент формы предложен проф С.С. Музгиным [7] и служит для описания формы частиц;  $k_{\phi} = l_{max}/l_{min}$ , где в числителе максимальный, а в знаменателе минимальный размер частицы. Данный коэффициент для рядовой породы отражает средневзвешенное значение в зависимости от процентного содержания частиц разной формы. Причем форма кусков не зависит от степени дробления; на нее влияет вид горной породы, подвергаемой погрузке. Пропорции линейных размеров частиц и погрузочного органа описываются коэффициентом линейных пропорций  $k_d = l/d_{cp}$ , где  $l$  - габаритный линейный размер зоны захвата рабочего органа. Коэффициент линейных пропорций оказывает существенное влияние на весь комплекс физико-механических свойств породы: угол естественного откоса, насыпную плотность и коэффициент разрыхления. От значения коэффициента линейных пропорций зависит интерпретация свойств погружаемого материала как сыпучего или крупнокускового.

Для разработки и проектирования комплектов оборудования для проходки тоннелей необходима достоверная информация о величине нагрузок в приводах разрушающего и погрузочного органа. При

---

эксплуатации оборудования при проведении тоннелей могут возникать различные условия для формирования производительности:

- исполнительный (разрушающий) и погрузочный органы обеспечивают равные производительности; обеспечивается рациональный режим нагружения;

- производительность разрушающего органа превосходит максимальную производительность погрузочных элементов; в этом случае погрузка осуществляется под завалом, привод работает в условиях перегрузки, снижаются значения показателей надежности (наработка на отказ, ресурс до капитального ремонта);

- производительность погрузочного органа превосходит показатели разрушающего органа; снижаются нагрузки, коэффициент использования мощности двигателя погрузочного органа;

- возможен вариант переменного соотношения производительностей внутри процессов разрушения и погрузки горной; соответственно снижается долговечность нагруженных элементов привода.

В целом на функционирование системы "погрузочный орган - штабель" оказывают влияние следующие факторы [8]:

- коэффициент линейных пропорций и коэффициент формы частиц, через физико-механические свойства оказывают влияние на энергоемкость процесса погрузки;

- изменение активного объема при продвижении погрузочного органа вглубь штабеля разрушенного материала, в результате чего происходит изменение объема единичного черпания, от которого зависит величина производительности, нагрузок на погрузочном органе; сам же активный объем зависит от высоты штабеля, глубины внедрения, наличия боковых частей штабеля;

- свойства погружаемого материала: распределение частиц по

---

крупности и форме, средний размер куска, причем средний размер частиц формируется случайным образом в каждом цикле черпания;

- угол естественного откоса  $\varphi_0$  может достигать 25°-45°, но при значении масштабного фактора  $K_d \geq 10$   $\varphi_0$  зависит только от литологических свойств горной породы: крепости, абразивности, твердости, пористости; а при  $K_d \leq 10$  порода проявляет свойства дискретной крупнокусовой среды,

- динамические нагрузки в силу цикличности работы нагребавшей части влияют на силовые, кинематические характеристики и необходимый тип привода;

- крепость горных пород в толще которых прокладывается тоннель, описывается контактной прочностью  $p_k$ ; определяет возможную глубину резания короны разрушающего органа, а отсюда влияет на производительность как исполнительного органа, так и комбайна в целом;

- при формировании штабеля в результате разрушения может наблюдаться неравномерное распределения крепости, крупности и коэффициента разрыхления  $K_p$ .

Ранее в исследованиях было выявлено [9], что плотность материала в разрыхленном состоянии зависит от коэффициента линейных пропорций и коэффициента формы частиц. Для целей моделирования рабочих процессов комбайнов при проходке тоннелей исследования структуры частиц материала по форме требует проведения производственных исследований. Для частиц кубообразной формы выведена эмпирическая зависимость, отражающая влияние процентного содержания кубообразных частиц  $K_{\%}$  (горизонтальная ось) на насыпную плотность погружаемого материала  $\rho_p$  (вертикальная ось) (рис. 1). На основании данного графика можно сделать вывод о том, что

---

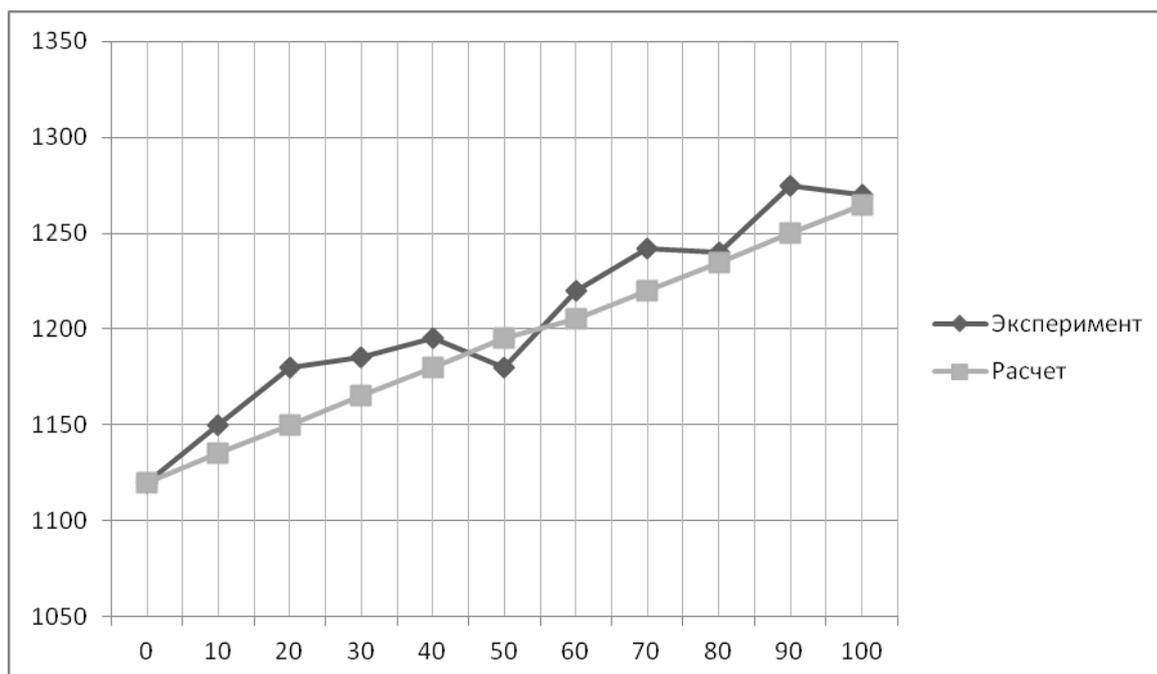


Рис. 1 - График зависимости плотности материала в разрыхленном состоянии  $\rho_p=f(K\%)$

форма частиц оказывает существенное влияние на плотность материала только в случае практически однородной структуры штабеля (100% кубообразных или 100% пластинчатых частиц). При реальных пропорциях содержания частиц (от 25 до 75% однотипных частиц) диапазон изменения насыпной плотности составляет 5% от минимального значения  $\rho_p$ , что меньше допустимой эмпирической погрешности при исследованиях машин, работающих в тяжелых условиях со стохастическим режимом нагружения. Таким образом, в целях исследования режима нагружения проходческих комбайнов в производственных условиях данным фактором влияния допустимо пренебречь.

Можно предположить, что влияние коэффициента линейных пропорций более существенно, так как с изменением геометрических пропорций размеров частиц погружаемого материала и ширины питателя (сечения движущегося потока погружаемого материала) изменяется характер физических процессов в штабеле погружаемого материала - проявление свойств сыпучего материала преобразуется в реализацию процесса погрузки

крупнокусковой среды.

Проведено экспериментальное исследование влияния коэффициента линейных пропорций  $K_d$  на насыпную плотность и коэффициент разрыхления погружаемого материала. Поставлена цель: получить зависимость насыпной плотности  $\rho_p$  и коэффициента разрыхления  $K_p$  от влияющих факторов. Коэффициент разрыхления - это увеличение объема грунта при его разработке (извлечении). Проведено исследование зависимостей  $\rho_p=f(K_d)$ ,  $K_p=f(K_d)$ . Исследуемый тип горной породы - песчаник, средний линейный размер частицы 50 мм, плотность материала в целике  $\rho_u=2540$  кг/м<sup>3</sup>. Исходя из соображений геометрического подобия коэффициент линейных пропорций принят  $1 \leq K_d \leq 10$ . При составлении программы опытов учтено, что в реальных условиях прокладки туннелей в толще горных пород высокой крепости соотношение размера частицы и линейного размера активной зоны питателя составляет 2,5 (длина гребка  $l=500$  мм, крупность материала  $d_{cp}=200$  мм). Для выявления влияния коэффициента линейных пропорций  $K_d$  для проведения экспериментов использовались цилиндрические сосуды, параметры которых приведены в табл. 2. Производилось взвешивание рядового материала в указанных емкостях, определены расчетным путем показатели  $\rho_p$  и  $K_p$ .

Таблица №1

Условия и результаты проведения экспериментов по исследованию зависимостей  $\rho_p=f(K_d)$ ,  $K_p=f(K_d)$

№ серии	Диаметр цилиндрической емкости, $D_u$ , мм	Высота емкости $H$ , мм	Объем, $V_u$ , м <sup>3</sup>	$K_d = D_u / d_{cp}$	Плотность в разрыхленном состоянии, $\rho_p$ , кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент разрыхления $K_p$
1	140	250	0,0039	2,8	1026	2,48
2	200	250	0,0079	4,0	1128	2,25
3	240	250	0,0113	4,8	1186	2,14
4	350	300	0,029	7,0	1247	2,03

Коэффициент разрыхления, таким образом, зависит от соотношения размерности частиц и рабочей зоны питателя, крупный материал создает большую пустотность, что приводит к снижению производительности (в целике) и, предположительно, возрастанию нагрузок в приводе нагребавшей части.

Путем аппроксимации данных зависимости  $K_p=f(K_d)$  методом наименьших квадратов получим  $K_p=K_d^\lambda$ , из чего следует  $\rho_p=\rho_u(1/K_d^\lambda)$ . В процессе аппроксимации значение степени влияния масштабного фактора  $\lambda$  установлено равным -0,12. В этом случае известная модель момента при погрузке идеально сыпучего материала, разработанная Е.А. Крисаченко:

$$M_{нд} = 144 r_d B h_{сл} \rho_p S_d \quad (1)$$

где  $r_d$  - радиус ведущего диска;

$B$  - ширина питателя;

$h_{сл}$  - высота сдвигаемого слоя;

$\rho_p$  - плотность материала в разрыхленном состоянии;

$S_d$  - глубина внедрения нагребавшего элемента -

может быть преобразована в следующее выражение:

$$M_{нд} = 144 r_d B h_{сл} \rho_u (1/K_d^\lambda) S_d \quad (2)$$

При сопоставлении расчетных данных по зависимостям (1) и (2) выявлено, что по ранее установленной зависимости вычисляемые значения моментов на нагребавших лапах оценивались ниже реальных и не зависели от степени дробления горной массы при буровзрывном или комбайновом способе разрушения. Данные исследования свидетельствуют также о низком уровне влияния на исследуемый процесс формы частиц погружаемого материала.

В целях моделирования рабочего процесса по погрузке горной массы комбайновым способом нам представляется целесообразным для

определения производительности погрузочного органа применять модель, учитывающую влияние активного объема на формирование выходных характеристик системы. Как утверждал С.Е. Лоховинин [10], объем материала активной зоны  $V_A$  при загрузке погрузочного органа в штабель на расстояние  $L(t)$  определяется как разность между суммарным накопленным объемом горной массы в заходке  $V_{нак}$  и захваченным в процессе черпания объемом  $V_{гр}$ . Производительность в этом случае может быть определена на основании следующего выражения:

$$q = 0,6 \cdot n_d \cdot V_{гр} \cdot \left( 1 - \exp\left(\frac{-0,48 \cdot V_A}{V_{гр}}\right) \right),$$

где  $n_d$  - частота вращения ведущего диска 1/мин;  $V_{гр}$  - объем материала, сдвигаемого лапой.

$$V_{гр} = \frac{V_k}{v_{гр}} \cdot B \cdot h_{сл} \cdot S_{л}$$

Объем материала в активной зоне определен ориентировочно из геометрических соображений, как объем криволинейной призмы, формирующейся на питателе при погрузке и ограниченной поверхностью штабеля, плитой питателя и поверхностью сдвига, по которой происходит обрушение материала при погрузке. Его величина составит:

$$V_A = \frac{1}{2} \cdot S_{л}^2 \cdot B \cdot \sin \varphi_1 \frac{\sin(180-\psi)}{\sin(\psi-\varphi_1)} \cdot K_{бок}$$

где  $\varphi_1$ - угол откоса штабеля;

$\psi$ - угол обрушения штабеля в зажатой среде;

$K_{бок}$  - коэффициент, учитывающий долю объема в боковых призмах.

Степень влияния боковых частей штабеля зависит от ряда факторов, таких как соотношение ширины тоннеля и питателя, может быть установлен экспериментально для конкретных условий эксплуатации. в нашем случае влиянием боковых частей можно пренебречь. С учетом влияния данных

факторов, расчетное значение производительности и нагрузок возрастает минимум в 1,5 раза, что подтверждает существенность принимаемых уточнений в расчетной модели.

В ходе исследований установлены зависимости, учитывающие влияние соотношения крупности материала к ширине захвата и влияние активного объема, которые могут быть применены при определении производительности и нагрузок при проходке автомобильных тоннелей, выбора комплектов оборудования для производства работ по проходке автомобильных тоннелей. Выбор на основании уточненных расчетных моделей обеспечит высокую эффективность и снижение удельной стоимости проходки за счет обоснованного определения нагрузок в приводе оборудования, энергоемкости процесса и достигаемой производительности.

### Литература

1. Домницкий, А.А. К вопросу о выборе комплектов оборудования для строительства транспортных тоннелей комбайновым способом/А.А. Домницкий, А.С.Носенко, Е.А.Шемшура, Р.В.Каргин // Дороги и мосты: сборник / ФГУП «РОСДОРНИИ». – М.: РОСДОРНИИ, 2014. – Вып. 32/2. – С. 40-54.
  2. Directive 2004/54/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Road Network URL: [bmvit.gv.at/verkehr/strasse/tunnel/downloads/EURL\\_200454EGvom762004en.pdf](http://bmvit.gv.at/verkehr/strasse/tunnel/downloads/EURL_200454EGvom762004en.pdf).
  3. Шемшура Е.А. Пути оптимизации системы эксплуатации горнопроходческого оборудования// Инженерный вестник Дона, 2013. №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2001](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2001)
  4. Носенко А.С., Каргин Р.В., Шемшура Е.А., Носенко В.В. Применение модульной компоновки горнопроходческих машин при строительстве транспортных тоннелей// Инженерный вестник Дона, 2015. № 1 (часть 2).
-



URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2832](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2832)

5. Petar Steva Vujasinovic. Tunnel Building United States Patent 3590590  
[freepatentsonline.com/3590590.html](http://freepatentsonline.com/3590590.html)

6. Agreement on Main. International Traffic Arteries (AGR)  
ECE/TRANS/SC.1/384 14 March 2008. URL: [unece.org/fileadmin/DAM/trans/conventn/ECE-TRANS-SC1-384e.pdf](http://unece.org/fileadmin/DAM/trans/conventn/ECE-TRANS-SC1-384e.pdf).

7. Музгин, С.С. Экскавация крупнокусковой горной массы. - Алма-Ата: Наука, 1973. - 106 с.

8. Меньшенина, Е.А. Обоснование параметров и режимов работы гидрофицированных погрузочных машин непрерывного действия. Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / Новочеркасск, 1994 - 20 с.

9. Ревякина, Е.А. Исследование физико-механических свойств горной массы штабеля подготовительных забоев. // Изв. Вузов. Сев. Кавк. Регион. Техн. науки. - 2004. - Приложение № 6. С. 119-124.

10. Лоховинин, С.Е. Повышение эффективности погрузочных машин типа ПНБ применением устройств автоматической прерывистой подачи: дис... канд. тех. наук. - Новочеркасск, 1986. - 252 с.

### References

1. Domnitskiy, A.A. К вопросу о выборе комплектов оборудования для строительства транспортный тоннелей комбайновым способом. А.А. Domnitskiy, А.С. Nosenko, Е.А. Shemshura, R.V. Kargin. Dorogi i mostyi: sbornik. FGUP «ROSDORNII». М.: ROSDORNII, 2014. Вып. 32/2. pp. 40-54.

2. Directive 2004/54/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Road Network URL: [bmvit.gv.at/verkehr/strasse/tunnel/downloads/EURL\\_200454EGvom762004en.pdf](http://bmvit.gv.at/verkehr/strasse/tunnel/downloads/EURL_200454EGvom762004en.pdf).

3. Shemshura E.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013. №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2001](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2001)
4. Nosenko A.S., Kargin R.V., Shemshura E.A., Nosenko V.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2015, №1, part 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2832](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2832)
5. Petar Steva Vujasinovic. Tunnel Building United States Patent 3590590 [freepatentsonline.com/3590590.html](http://freepatentsonline.com/3590590.html)
6. Agreement on Main. International Traffic Arteries (AGR) ECE/TRANS/SC.1/384 14 March 2008. URL: [unece.org/fileadmin/DAM/trans/conventn/ECE-TRANS-SC1-384e.pdf](http://unece.org/fileadmin/DAM/trans/conventn/ECE-TRANS-SC1-384e.pdf).
7. Muzgin, S.S. Ekskavatsiya krupnokuskovoy gornoy massyi. [Excavation of lump rock formation]. Alma-Ata: Nauka, 1973. 106 p.
8. Menshenina, E.A. Obosnovanie parametrov i rezhimov raboty gidrofitsirovannyih pogruzochnyih mashin nepreryivnogo deystviya. [Choice of criteria parameters and operating modes of hydraulically-driven continuously working loaders] Avtoref. dis. na soiskanie uchenoy stepeni kand. tehn. nauk. Novocherkassk, 1994. 20 p.
9. Revyakina, E.A. Izvestyia Vuzov. Sev. Kavk. Region. Tehn. nauki. - 2004. - Prilozhenie № 6. pp. 119-124.
10. Lohovinin, S.E. Povyishenie effektivnosti pogruzochnyih mashin tipa PNB primeneniem ustroystv avtomaticheskoy preryivistoy podachi [Increase of PNB model loaders efficiency using of devices of automatic faltering giving of a running gear]: dis... kand. teh. nauk. Novocherkassk, 1986. 252 p.