

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА МЕТАЛЛОЕМКОСТЬ ПРИЕМНОГО БУНКЕРА ДРОБИЛЬНО-ПЕРЕГРУЗОЧНОЙ УСТАНОВКИ

Е.Д. Кардашин¹, А.Г. Журавлёв¹

¹ Институт горного дела Уральского отделения РАН,
Екатеринбург, Россия, e-mail: kardashin@igduran.ru

Аннотация: Рассмотрено влияние технологических факторов на металлоемкость приемного бункера дробильно-перегрузочной установки (ДПУ) в условиях открытых горных работ. Основное внимание уделено анализу нагрузок, возникающих при эксплуатации бункера, включая статические нагрузки от горной массы и динамические нагрузки от ударов крупнокусковой руды. Рассматривается влияние массы и высоты падения руды, полной массы руды, разгружаемой в бункер, а также различных геометрических параметров на металлоемкость его конструкции. Результаты расчетов показывают, что ударные нагрузки от падающих кусков руды являются определяющими для прочности конструкции при длине балок до 19–20 м, тогда как при больших длинах преобладает статическая нагрузка от руды в бункере. Учитывается влияние изменения длины и ширины бункера на динамику нагрузок, включая, включая снижение коэффициента динамичности ударной нагрузки для длинных балок. Представлены зависимости и их анализ применительно к практике проектирования. Расчеты на прочность выполнены по аналитическим методикам, а динамическая нагрузка оценивалась через коэффициент динамичности. Результаты исследования позволяют оптимизировать параметры бункеров для снижения металлоемкости при сохранении необходимой прочности и надежности конструкции, исключая нерациональные варианты и снижая трудоемкость расчетов.

Ключевые слова: приемный бункер, дробильно-перегрузочная установка, металлоемкость, ударная нагрузка, оптимизация конструкции, статическая нагрузка, динамическая нагрузка, коэффициент динамичности, рудная подушка, проектирование, горная промышленность, надежность, конструкционная прочность.

Благодарность: Исследования выполнены в рамках государственного задания № 075-00410-25-00. Г.р. № 1022040200004-9-1.5.1. Тема 1 (2025–2027). Методология обоснования перспектив технологического развития комплексного освоения минерально-сырьевых ресурсов твердых полезных ископаемых России (FUWE-2025-0001).

Для цитирования: Кардашин Е. Д., Журавлёв А. Г. Влияние технологических факторов на металлоемкость приемного бункера дробильно-перегрузочной установки // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 6. – С. 139–152. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_6_0_139.

Influence of processing factors on metal consumption of receiving hopper of crushing-and-transfer facility

E.D. Kardashin¹, A.G. Zhuravlev¹

¹ Institute of Mining of the Ural Branch Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia, e-mail: kardashin@igduran.ru

Abstract: The article discusses the influence of processing factors on metal consumption of receiving hoppers of crushing-and-transfer facilities in open pit mining. Spotlight is on loads generated during hopper operation, including static loads from rocks and dynamic loads from impact of coarse ore. The scope of the analysis embraces effects exerted by mass and fall height of ore, total mass of ore loaded in the hopper, and by some other geometrical parameters on metal consumption of the hopper structure. The calculations show that impact loads exerted by falling ore have the determining influence on the hopper structure at the length of the beams up to 19–20 m, while at the longer beams, the static loads applied by ore on the hopper prevail. It is taken into account how the change of the length and width of the hopper influences loading dynamics, including the decrease of the dynamic impact load factor for the long beams. Relations and their analysis in the context of the design practices are presented. The strength calculations by analytical methods are described. The dynamic load was calculated in terms of the dynamic factor. The research findings allow optimizing hopper design parameters with a view to reducing metal consumption at the same strength and reliability of the structure, at zero inefficiency and with the decreased hours of calculations.

Key words: receiving hopper, crushing-and-transfer facility, metal consumption, impact load, design optimization, static load, dynamic load, dynamic factor, ore cushion, design, mining industry, reliability, structural strength.

Acknowledgements: The study was carried out under the State Contract No. 75-00410-25-00, State Registration No. 1022040200004-9-1.5.1, Topic 1 (2025–2027): Justification Methodology for Technological Development Prospects in Integrated Solid Mineral Mining and Management in Russia (FUWE-2025-0001).

For citation: Kardashin E. D., Zhuravlev A. G. Influence of processing factors on metal consumption of receiving hopper of crushing-and-transfer facility. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(6):139-152. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_6_0_139.

Введение

В современных условиях развития горнодобывающей промышленности важную роль играет не только эффективность эксплуатации дробильно-перегрузочных установок (ДПУ), но также их надежность и долговечность. В связи с увеличивающимися темпами подвигания (понижения) горных работ все более востребованными становятся полустационарные (полумобильные) ДПУ,

основная часть конструкций которых выполнена из металла [1–4]. Актуальной задачей является снижение их металлоемкости при неуклонном обеспечении заданного уровня технологических показателей, эффективности и надежности. Исследования ИГД УрО РАН [5] показывают, что габаритные параметры ДПУ определяются дробилкой и приемным бункером, а также схемой и компо-

новой транспортирующей части (питатели, передаточный конвейер). Поэтому важное внимание следует уделить изучению соответствующих закономерностей и обоснованию рациональных соотношений параметров приемных бункеров ДПУ, обеспечивающих минимальную или приемлемую металлоемкость.

Обоснованию геометрических параметров приемных бункеров, ориентированных на обеспечение технологических показателей, посвящен целый ряд научных работ [6–10]. В то же время при выборе геометрических параметров бункера требуется учитывать их влияние на металлоемкость с учетом нагрузок. Этому вопросу уделяется недостаточное внимание в научно-технической литературе, его рассмотрение ограничивается, как правило, проверочным прочностным расчетом, описанием специфических конструкций либо уточнением методик расчета на прочность или оптимизации формы для прохождения материала [11, 12].

Металлические бункеры в горнорудной промышленности требуют более тщательного конструктивно-прочностного расчета, поскольку, во-первых, испытывают значительные ударные нагрузки при загрузке их из транспорта крупнокусковой горной массой, во-вторых, в отличие, например, от железобетонных бункеров, стальные конструкции более подвижны при упругих деформациях, что влечет повышенный усталостный износ при циклическом нагружении.

Кроме того, плотность стали в 3 раза больше плотности бетона, что требует более тщательной проработки конструкции для минимизации металлоемкости.

В связи с вышесказанным целью исследований выбрано установление закономерностей влияния нагрузок на приемный бункер и его геометрических параметров на металлоемкость.

Методы исследования

Наибольшие нагрузки от воздействий горной массы испытывает днище бункера:

- от находящейся в бункере горной массы (статическая нагрузка);
- от удара падающего крупного куска (динамическая нагрузка).

В части динамического воздействия нагрузка на бункер оценивалась как удар крупного куска горной массы, разгруженного из карьерного автосамосвала. Для первоначальных расчетов принят следующий диапазон массы падающего куска: 1 т (крупный из рядовых кусков), 4 т (крупный кусок более средневзвешенного), 8 т (пределный по допустимому габариту приемного отверстия дробилки ККД-1500/180), 11 т (негабаритный кусок, который не пригоден для приема дробилкой, однако имеется вероятность его поступления в бункер; его габариты определялись как $2/3$ линейных размеров ковша наибольшего экскаватора, в качестве которого принят ЭКГ-35). Плотность руды в целике принята $3,5 \text{ т/м}^3$.

Варьировались высота бункера (и, соответственно, высота падения руды, примерно равная высоте бункера) и размеры бункера в плане. Для упрощения расчетов и универсализации модели днище бункера принято квадратной формы (длина равна ширине). Во всех расчетах рассматривалось днище плоское горизонтальное, с отверстием диаметром 6 м по центру под выпуск руды.

Динамическая (ударная) нагрузка рассматривалась как произведение статической нагрузки и коэффициента динамичности, вычисленного по известной методике [13] через скорость в момент удара о днище бункера. Рассмотрены случаи ударной нагрузки непосредственно по балке, а также по рудной подушке [14], находящейся на балке, выполняющей функцию самофутеровки и

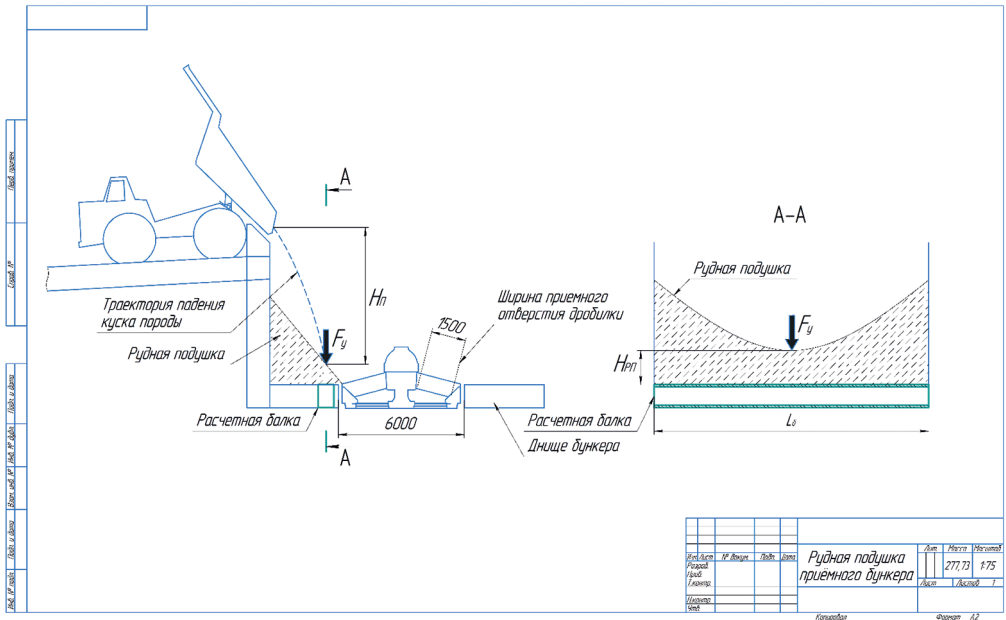


Рис. 1. Расчетная схема бункера [составлено авторами]
 Fig. 1. Design scheme of the bunker [compiled by the authors]

частичного демпфирования удара. Коэффициент демпфирования принят 0,85.

Рудная подушка является важным элементом, обеспечивающим снижение динамического воздействия от удара за счет демпфирования благодаря следующим факторам:

- упругой и пластической деформации подушки;
- частичному гашению импульса падающего камня при передаче его через подушку вследствие ее существенной массы;
- распределению ударной нагрузки по площади днища бункера.

Учитывая, что расчетным сечением балки является сечение, расположенное в центре пролета, как испытывающее наибольшие изгибные напряжения, ударная нагрузка прикладывалась именно по центру. Конструктивным взаимодействием между соседними балками, влияющим на распределение нагрузки, пренебрегли для того, чтобы упростить модель, поскольку цель исследования —

установить общие закономерности, а конкретная схема распределения нагрузок и параметры конструкции бункера в любом случае должны рассчитываться в каждом случае индивидуально.

Скорость куска горной породы в момент удара по днищу бункера (рудной подушке на днище) определена расчетом следующим образом (рис. 1):

1) движение куска начинается в момент страгивания его под действием силы тяжести по мере изменения угла наклона грузовой платформы самосвала к горизонту; учитывая, что этот угол и достигаемая куском руды на сходе с грузовой платформы скорость разнятся при его скольжении по насыпи руды и по металлическому дну платформы, выполнялся расчет для обоих случаев и принималась наибольшая скорость;

2) после схода с грузовой платформы кусок горной массы падает под действием силы тяжести, с учетом достигнутой на момент схода горизонтальной составляющей вектора скорости. Сопро-

тивление воздуха не учитывается ввиду малого его значения;

3) в момент удара о рудную подушку или балку днища бункера учитывается вертикальная составляющая полного вектора скорости.

Расчет напряжений в балке выполнен упрощенно по известной методике теории сопротивления материалов [15].

Результаты и их анализ

Установлено, что значения нагрузок, оказываемых падением крупного куска горной массы на днище бункера и от давления находящейся в бункере горной массы, сопоставимы. При этом можно выделить крайние расчетные случаи, соответствующие реальной ситуации, когда действует практически только одна из этих нагрузок:

- при пустом бункере днище обнажено (или покрыто только самофутеровкой из руды — рудной подушкой), и крупный кусок ударяет по днищу;
- при заполненном полностью бункере толщина руды такова, что ударное воздействие полностью демпфируется,

и можно считать, что воздействует на балку только статическая нагрузка от находящейся в бункере руды.

Промежуточным состоянием нагрузок является частичное заполнение бункера с воздействием как статической, так и ослабленной рудной насыпью динамической нагрузки.

Высокие значения коэффициента динамичности (рис. 2, а) определяют значительную величину ударной нагрузки. В данном случае рассчитано воздействие, приходящееся на единичную расчетную балку (конструктивные связи балки с другими, входящими в днище бункера, не учитывались). Интересно, что влияние высоты бункера и соответствующей высоты падения руды линейно и не так существенно, как влияние длины балок днища бункера (в расчетах длина балок принималась равной ширине бункера). Это объясняется тем, что с ростом длины балки повышается ее податливость (на рис. 2, б видно, что перемещения балки под нагрузкой с увеличением ее длины возрастают), которая демпфирует удар за счет упругого

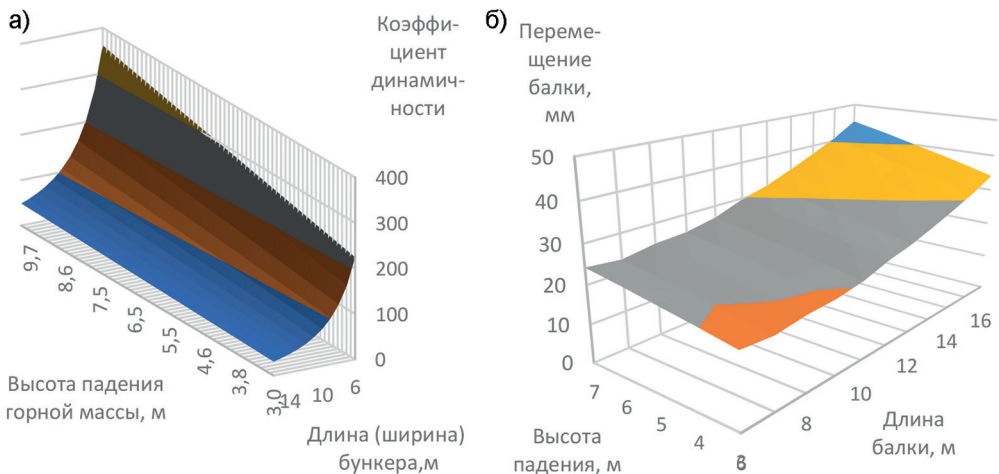


Рис. 2. Влияние высоты падения и размеров бункера на коэффициент динамичности (а) и упругую деформацию (б) расчетной балки при массе падающего камня 4000 кг [составлено авторами]

Fig. 2. The effect of the height of the fall and the size of the hopper on the coefficient of dynamism (a) and elastic deformation (b) of the design beam at a falling stone weight of 4000 kg [compiled by the authors]

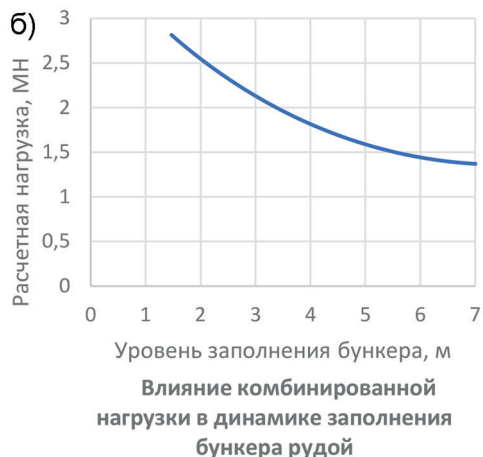
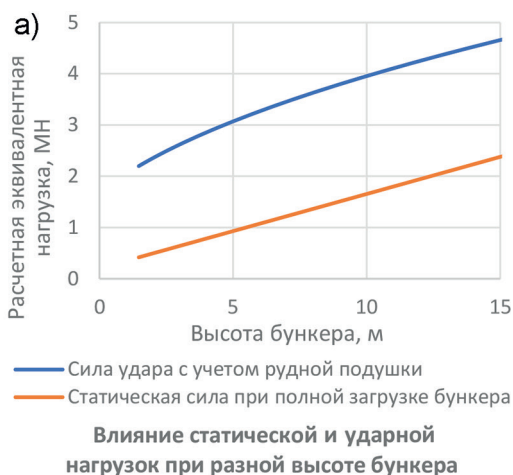


Рис. 3. Влияние высоты бункера на нагрузку, оказываемую горной массой на расчетную балку его дна при ширине бункера 12 м [составлено авторами]

Fig. 3. The effect of the height of the hopper on the load exerted by the rock mass on the design beam of its bottom with a hopper width of 12 m [compiled by the authors]

прогиба, вызванного динамической нагрузкой. Установлено, что изменение коэффициента динамичности при длинах балки в диапазоне 6–15 м составляет 5–7-кратную величину. Следовательно, при разработке конструкции бункера предпочтительнее с точки зрения прочности могут оказаться варианты с увеличенной длиной/шириной.

Оценим влияние высоты падения руды в бункер на оказываемые ею воздействия.

На рис. 3 показано влияние нагрузки на расчетную балку шириной 1 м и длиной 12 м по вариантам:

- статическая нагрузка от находящейся в полностью заполненном бункере руды;
- динамическая нагрузка от удара куска руды массой 4 т по дну пустого бункера, перекрытого только рудной подушкой (высота подушки в месте удара 1,5 м).

Считается, что бункер заполняется по высоте до верхней кромки (вариант расчета по статической нагрузке), там же находится нижний край платформы автосамосвала при разгрузке (вариант

расчета на удар). Размеры дна бункера приняты 12×12 м. Все значения воздействий приведены к сопоставимой эквивалентной величине: динамическая нагрузка — через коэффициент динамичности, а статическая распределенная нагрузка от давления руды на дно бункера — через коэффициент приведения распределенной нагрузки к сосредоточенной, приложенной в центре расчетной балки (принимался коэффициент 0,492, установленный расчетным экспериментом). Мерой приведения воздействий являлись равные вызываемые ими напряжения в расчетном (центральной) сечении балки.

Из результатов на рис. 3, а видно, что ударная нагрузка имеет нелинейную зависимость от высоты падения куска руды, а нагрузка от заполнения бункера рудой — линейную. При этом во всех рассмотренных случаях превалирует ударная нагрузка, что следует учитывать при расчете металлоконструкций бункеров на прочность.

Согласующаяся с вышеуказанными результатами картина имеет место при расчете нагрузок в процессе заполне-

ния рудой бункера высотой 7 м и размерами дна 12×12 м (рис. 3, б). С одной стороны, по мере накопления на дне бункера руды она выполняет демпфирующую роль и смягчает удары тем больше, чем толще слой, с другой — давление от столба руды на расчетную балку увеличивается. Из графика видно, что суммарная нагрузка уменьшается по мере заполнения бункера, причем в начальный момент времени нагрузка совпадает с соответствующей точкой на графике динамической нагрузки (см. рис. 3, а), а в конечный момент времени — с точкой на графике статической нагрузки.

Результаты расчета влияния массы падающих крупных кусков на эквивалентную нагрузку, прикладываемую к расчетной балке бункера, приведены на рис. 4.

Видно, что с ростом массы она изменяется практически линейно. Следовательно, металлоемкость днища и всего бункера в целом с ростом типоразмера дробилки [16], устанавливаемой под бункером, и, соответственно, гранулометри-

ческого состава принимаемой им руды будет изменяться линейно.

Учитывая этот факт для оптимизации объема дальнейших расчетов, выберем удобный и наиболее распространенный размер куска руды, вероятность воздействия которого на бункер наиболее велика. негабаритные (более размеров приемного отверстия дробилки ККД-1500/180) и близкие к ним, с размерами 1,2 м и более, зачастую находятся на грузовой платформе автосамосвала в толще руды, и, соответственно, к моменту их падения на дно бункера на нем уже формируется слой более мелких фракций, которые смягчают удар. Следовательно, в качестве наиболее вероятного куска, который может ударять в непокрытую рудой балку бункера, может выступать тот, который достаточно подвижен ввиду относительно небольших габаритов, но при этом массивен и способен вызывать значительную динамическую нагрузку. С учетом данных о гранулометрическом составе подаваемой руды (за основу взяты данные о гранулометрическом составе Михайловского ГОКа [5])

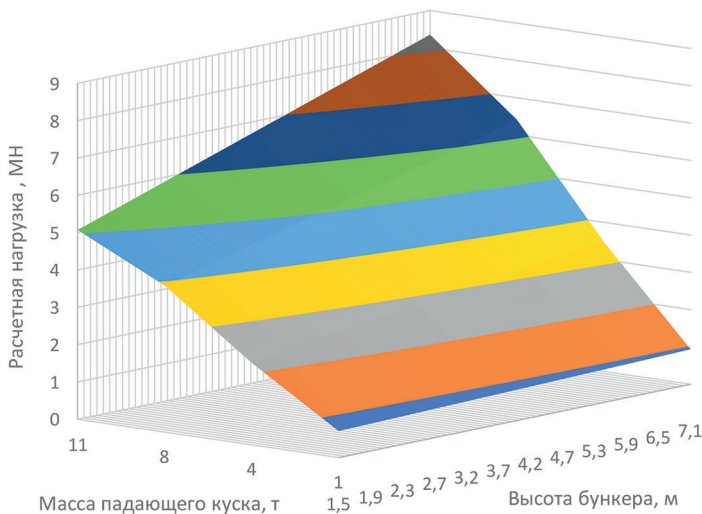


Рис. 4. Влияние массы падающего куска руды на эквивалентную нагрузку балки [составлено авторами]
 Fig. 4. The effect of the mass of the falling piece of ore on the equivalent load of the beam [compiled by the authors]

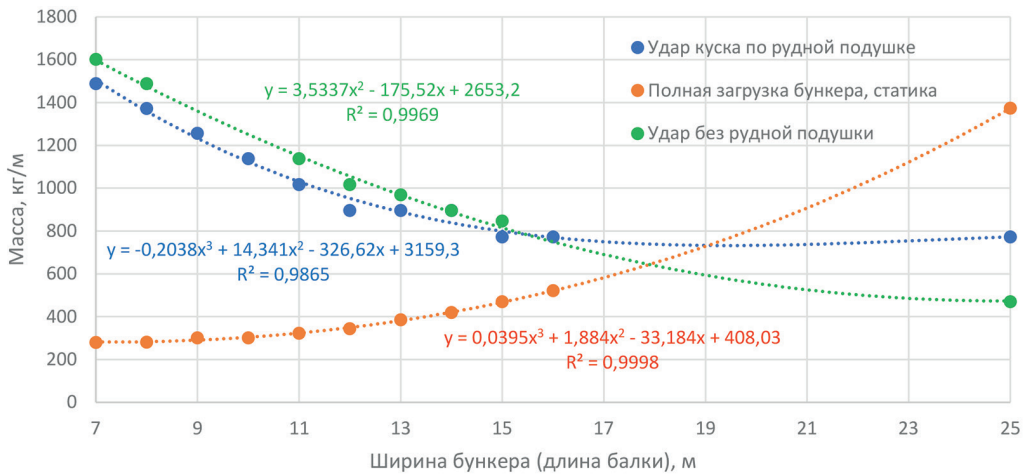


Рис. 5. Влияние характера нагружения на массу погонного метра расчетной балки днища бункера при разных размерах бункера в плане [составлено авторами]

Fig. 5. The influence of the nature of loading on the mass of the linear meter of the design beam of the bottom of the bunker for different sizes of the bunker in the plan [compiled by the authors]

такие размеры приняты как $1,05 \times 1,01 \times 1,05$ м, что при плотности руды $3,5 \text{ т/м}^3$ составляет 4 т. Примем указанные типоразмер и массу для дальнейших расчетов.

Оценено влияние параметров бункера и воздействий на него от руды с учетом вышеприведенных закономерностей.

С этой целью на первом этапе выполнены [17] на персональном компьютере расчеты металлоемкости несущей балки днища бункера при разной ее длине и характере нагружения. Характер нагружения по вариантам принят аналогично вышеописанным вариантам. Для сопоставимости вариантов при разной длине балки металлоемкость определялась методом подбора путем изменения толщины листов прямоугольной балки с подбором такого ее сечения по центру пролета, при котором коэффициент запаса прочности по нормальным напряжениям приблизительно равнялся 1. С целью оценки характера кривых и поиска возможных экстремумов (переходных точек, свидетельствующих об

изменении соотношения влияния комплекса факторов) выполнен расчет особо длинных балок — 25 м.

Результаты показали следующее (см. рис. 5):

- наибольшее влияние на металлоемкость оказывает ударная нагрузка от падения в пустой бункер крупнокусковой руды (что согласуется с результатами, представленными на рис. 3);
- при увеличении длины балки, рассчитанной на ударную нагрузку, удельная ее металлоемкость снижается;
- при расчете балки только на статическую нагрузку ее металлоемкость растет с длиной балки сначала по близкой к линейной зависимости, а далее нелинейно нарастает, превышая при длинах более 17–18 м металлоемкость, определяемую ударной нагрузкой.

Последний факт объясняется существенным ростом нагрузки от увеличенной массы руды, а также массы самой балки.

Интересно, что для балки, рассчитанной на ударную нагрузку с учетом демпфирования рудной подушкой (кри-

вая «Удар куска по рудной подушке» на рис. 5), удельная металлоемкость также снижается, однако затем, после достижения минимума при длине балки порядка 20 м, возрастает. Это объясняется увеличением влияния статической нагрузки на балку от рудной подушки, масса которой существенно возрастает с длиной, поскольку:

- рудная подушка в сечении над балкой имеет форму верхней границы в виде вогнутой кривой, ограничиваемой по краям высотой бункера, и ее объем и масса резко растут с увеличением длины;
- растет нагрузка на балку от ее собственной массы, что требует наращивания металла для прочности и жесткости.

Ростом давления от рудной подушки объясняется и то, что балка, рассчитанная на жесткий удар без рудной подушки, имеет при длинах более 15,5–16 м (точка пересечения кривых) меньшую удельную металлоемкость, чем балка, рассчитанная под рудную подушку.

На втором этапе исследования вышеуказанной проблемы оценивалась металлоемкость днища бункера в целом.

По результатам расчетов видно следующее (рис. 6):

- сообразно вышеприведенным выводам металлоемкость днища бункера определяется при длине бункера до 18 м — ударной нагрузкой как наибольшей из учитываемых, а при длине более 19 м — статической нагрузкой от заполнения рудой;
- также масса днища, рассчитанная на жесткий удар без рудной подушки, несколько больше, чем рассчитанная на удар с демпфированием подушкой, однако при размерах днища более 16–17 м соотношение меняется на противоположное;
- зависимость металлоемкости от длины бункера имеет линейный характер до 17–18 м, а далее — резко возрастающий нелинейный, определяемый статической нагрузкой.

Отметим, что установленные закономерности в конкретных значениях относятся к рассмотренным параметрам бункера и будут несколько изменяться в зависимости от соотношения длины, ширины и высоты бункера, а также

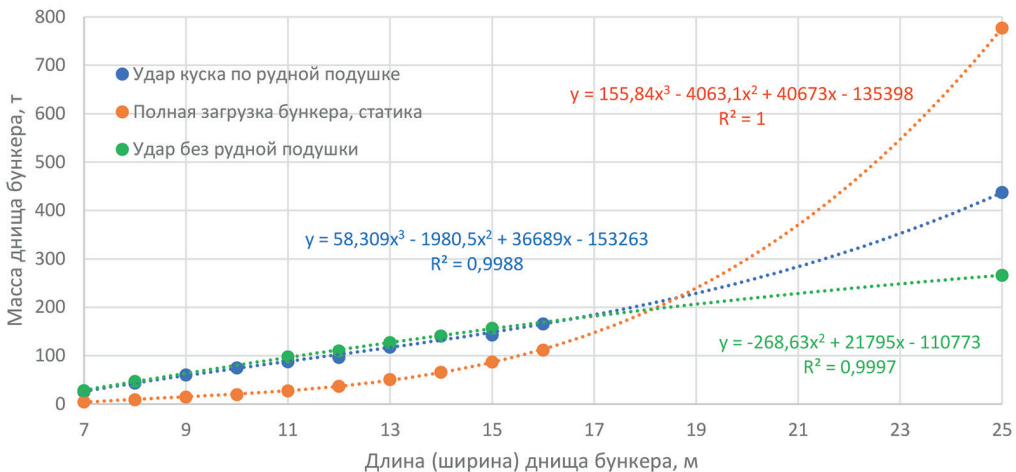


Рис. 6. Влияние разных нагрузок и размеров днища бункера в плане на его металлоемкость [составлено авторами]

Fig. 6. The influence of different loads and sizes of the bottom of the hopper in terms of its metal consumption [compiled by the authors]

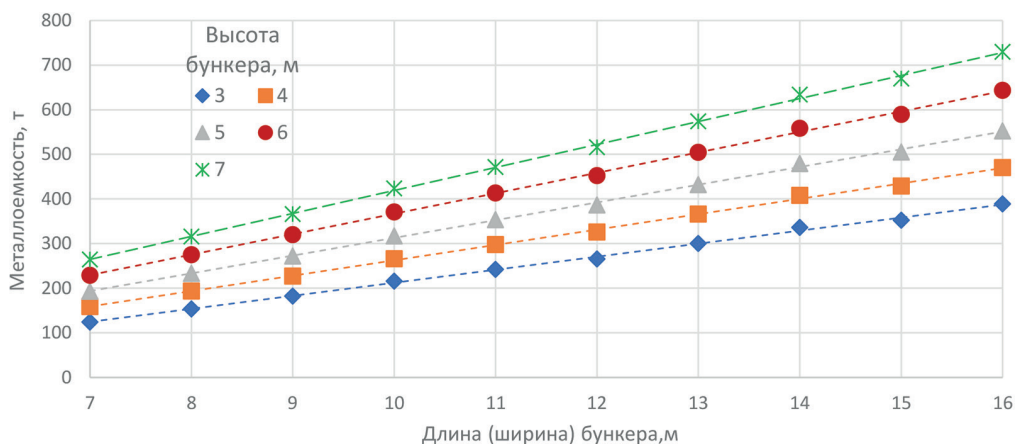


Рис. 7. Расчетная металлоемкость бункера с квадратным горизонтальным плоским дном и вертикальными стенками, две из которых выполняют функцию опор для подъездных рампов автосамосвалов [составлено авторами]

Fig. 7. Estimated metal consumption of a hopper with a square horizontal flat bottom and vertical walls, two of which act as supports for the access ramps of dump trucks [compiled by the authors]

грузоподъемности применяемых автосамосвалов и типоразмера дробилки. Также заметное влияние окажет изменение формы дна, например, применение наклонных стенок [18–20].

На практике бункеры с длиной балок дна более 15–18 м применяются крайне редко. Поэтому в большинстве случаев можно считать, что металлоемкость дна подчиняется линейному закону изменения в зависимости от размеров бункера.

С учетом этого на третьем этапе определена расчетная металлоемкость бункера в целом по элементам: дну и четыре одинаковые по высоте стенки. Принято, что две из стенок являются несущими для опирания подъездных рампов, на которые заезжают автосамосвалы для разгрузки. Автосамосвалы учтены грузоподъемностью 180 т (полная масса 326 т). Удельная металлоемкость принята исходя из обобщения данных по конкретным конструкциям, разработанным в рамках работы [5].

Результаты расчетов приведены на рис. 7.

Видно, что, несмотря на уменьшение значения ударной нагрузки в целом (см. рис. 2, а), масса бункера с увеличением его длины (ширины) возрастает. Такая зависимость связана с тем, что увеличение массы балок при росте их геометрических параметров преобладает над эффектом от снижения удельной массы погонного метра. Характер влияния высоты бункера на металлоемкость также линейный, что объясняется, с одной стороны, практически линейным возрастанием коэффициента динамичности с высотой падения руды на дно (см. график на рис. 2, а), с другой — пропорциональным ростом массы металла относительно геометрической высоты стенок бункера.

Выводы

1. Установлены основные закономерности влияния параметров бункера на напряженно-деформированное состояние расчетной балки его дна:

- в большинстве случаев при длине балки до 19–20 м нагрузкой, определяющей прочность балки, является удар-

ная от падающего крупногабаритного куска руды в пустой бункер, а при значительной длине балок — статическая нагрузка от находящейся в бункере руды;

- увеличение длины балок днища положительно влияет на снижение коэффициента динамичности ударной нагрузки от падающих камней, это снижение существенно и изменяется нелинейно;

- по мере заполнения бункера горной массой расчетная приведенная нагрузка на днище бункера плавно уменьшается от пика динамической нагрузки до уровня статической нагрузки, что объясняется нарастанием демпфирования от перекрытия днища рудой и ростом давления на него от столба руды.

2. Металлоемкость прямоугольного бункера с плоским горизонтальным дном в целом с увеличением его геометрических размеров возрастает пропорционально им. Несмотря на уменьшение значения ударной нагрузки (коэффициент динамичности) с увеличением длины балок днища, превалирует нарастание их металлоемкости из-за увеличения соответствующего геометрического размера. Таким образом, увеличение размеров бункера во всех случаях ведет к увеличению суммарной металлоем-

кости. С учетом этого положительный фактор снижения коэффициента динамичности с увеличением длины балок может быть использован при проектировании для увеличения ресурса металлоконструкций.

3. Показано, что для наиболее распространенных размеров бункеров длиной (шириной) не более 15–17 м наличие на дне предохранительной рудной подушки или иного демпфера, смягчающего удар от разгружаемой руды, снижает металлоемкость днища бункера на 10–15%.

4. Приведенные в статье закономерности являются общими и позволяют при исследовании оптимальных вариантов параметров или разработке конкретных компоновок дробильно-перегрузочных установок определять из всего множества вариантов рациональные. Это помогает упростить и ускорить работу. Тем не менее, в каждом конкретном случае соотношения и закономерности будут иметь специфический вид в зависимости от соотношения длины, ширины и высоты бункера, грузоподъемности применяемых автосамосвалов и типоразмера дробилки, а также формы днища и дополнительных нагрузок, воздействующих на металлоконструкции приемного бункера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wu Fengbiao, Ma Lifeng, Zhao Guanghui, Wang Zhijian* Chamber optimization for comprehensive improvement of cone crusher productivity and product quality // *Mathematical Problems in Engineering*. 2021, article 5516813. DOI: 10.1155/2021/5516813.

2. *Maleki M., Zare S.* Investigating the chamber filling effect on the jaw crusher, cone crusher and HPGR performance // *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2024, pp. 1–10. DOI: 10.1080/00084433.2024.2400727.

3. *Annakulov T., Gaibnazarov S., Askarov A., Mamadiyeva L.* Prospects for the use of cyclic-flow technology for the transportation of rocks at the «Yoshlik-1» quarry of JSC Almalyk mining and metallurgical combine // *E3S Web of Conferences*. 2023, vol. 417, article 06007. DOI: 10.1051/e3s-conf/202341706007.

4. *Zhang Z., Ren T., Cheng J., Zhu J.* An improved capacity model of the cone crushers based on the motion characteristics of particles considering the influence of the spatial compound motion of the mantle // *Minerals*. 2022, vol. 12, no. 2, article 235. DOI: 10.3390/min12020235.

5. Исмагилов Р. И., Журавлев А. Г., Фурин В. О. Проектирование современных российских дробильно-перегрузочных установок для комплексов ЦПТ // Горная промышленность. — 2024. — № 3. — С. 104–111. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-3-104-111.
6. Юдин А. В., Шестаков В. С., Сайтов В. И., Абдулкаримов М. К. К определению вместимости бункера в составе перегрузочной системы при комбинированном транспорте // Известия вузов. Горный журнал. — 2020. — № 4. — С. 99–112.
7. Жариков И. Ф. О вместимости приемного бункера карьерной дробильной установки // American Scientific Journal. 2021, vol. 49, pp. 49–51. DOI: 10.31618/asj.2707-9864.2021.1.49.103.
8. Чендырев М. А., Журавлев А. Г. Рационализация геометрических параметров приемных бункеров дробилок ККД при автомобильном транспорте // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 5-1. — С. 158–170. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_158.
9. Воробьев А. А., Мигров А. А. Анализ и выбор геометрических параметров бункера для изучения процесса выгрузки сыпучих материалов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2022. — № 1. — С. 97–104. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-19-1-97-104.
10. Журавлев А. Г., Кардашин Е. Д. Особенности моделирования работы дробильно-перегрузочной установки при оптимизации ее конструктивно-технологических параметров // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. — 2024. — № 24. — С. 112–121. DOI: 10.26160/2658-3305-2024-24-112-121.
11. Плетнев М. П. Автоматизированное оптимальное проектирование монолитных железобетонных бункеров: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2005. — 24 с.
12. Ягофаров Х. Стальные бункеры как пространственные системы: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. — Екатеринбург: УрГАПС, 1998. — 46 с.
13. Галанцев В. А. Соппротивление материалов. Динамическое действие нагрузки. — Великие Луки: ФГБОУ ВО ВГСА, 2021. — 24 с.
14. Just M., Peschiutta A. M., Hippe F., Useldinger R., Baller J. Determination of the angle of repose of hard metal granules // Powder Technology. 2022, vol. 407, article 117695. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117695.
15. Бирбаер А. Н., Роледер А. Ю. Экстремальные воздействия на сооружения. — СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2009. — 594 с.
16. Yamashita A. S., Thivierge A., Euzébio T. A. M. A review of modeling and control strategies for cone crushers in the mineral processing and quarrying industries // Minerals Engineering. 2021, vol. 170, article 107036. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107036.
17. Балашов А. М. Тенденции цифровизации производственных процессов в горном деле // Горная промышленность. — 2023. — № 3. — С. 134–137. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-3-134-137.
18. Чиркин А. А., Кантемиров В. Д. Обоснование методики проектирования передвижных дробильно-перегрузочных установок // Известия вузов. Горный журнал. — 2020. — № 7. — С. 33–40.
19. Груздев А. В., Осадчий А. М., Фурин В. О. Стационарные и полустационарные дробильно-перегрузочные установки Уралмашзавода // Горный журнал. — 2012. — № 11. — С. 70–72.
20. Глебов А. В., Берсенев В. А., Кармаев Г. Д., Семенкин А. В. Новые подходы и решения по применению циклично-поточной технологии на карьерах // Горный журнал. — 2017. — № 6. — С. 49–52. **ПАБ**

REFERENCES

1. Wu Fengbiao, Ma Lifeng, Zhao Guanghui, Wang Zhijian Chamber optimization for comprehensive improvement of cone crusher productivity and product quality. *Mathematical Problems in Engineering*. 2021, article 5516813. DOI: 10.1155/2021/5516813.
2. Maleki M., Zare S. Investigating the chamber filling effect on the jaw crusher, cone crusher and HPGR performance. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2024, pp. 1–10. DOI: 10.1080/00084433.2024.2400727.
3. Annakulov T., Gaibnazarov S., Askarov A., Mamadiyeva L. Prospects for the use of cyclic-flow technology for the transportation of rocks at the «Yoshlik-1» quarry of JSC Almalayk mining and metallurgical combine. *E3S Web of Conferences*. 2023, vol. 417, article 06007. DOI: 10.1051/e3s-conf/202341706007.

4. Zhang Z., Ren T., Cheng J., Zhu J. An improved capacity model of the cone crushers based on the motion characteristics of particles considering the influence of the spatial compound motion of the mantle. *Minerals*. 2022, vol. 12, no. 2, article 235. DOI: 10.3390/min12020235.
5. Ismagilov R. I., Zhuravlev A. G., Furin V. O. Design of modern Russian crushing and reloading plants for CPT complexes. *Russian Mining Industry Journal*. 2024, no. 3, pp. 104–111. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-3-104-111.
6. Yudin A. V., Shestakov V. S., Saitov V. I., Abdulkhairimov M. K. On determining the capacity of a hopper as part of a reloading system for combined transport. *Minerals and Mining Engineering*. 2020, no. 4, pp. 99–112. [In Russ].
7. Zharikov I. F. On the capacity of the receiving hopper of a quarry crushing plant. *American Scientific Journal*. 2021, vol. 49, pp. 49–51. [In Russ]. DOI: 10.31618/asj.2707-9864.2021.1.49.103.
8. Chendyrev M. A., Zhuravlev A. G. Rationalization of geometric parameters of receiving hoppers of KKD crushers for automobile transport. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 5-1, pp. 158–170. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_158.
9. Vorobyov A. A., Migrov A. A. Analysis and selection of geometric parameters of a hopper for studying the process of unloading bulk materials. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2022, no. 1, pp. 97–104. [In Russ]. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-19-1-97-104.
10. Zhuravlev A. G., Kardashin E. D. Features of modeling the operation of a crushing and reloading plant when optimizing its design and technological parameters. *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2024, no. 24, pp. 112–121. [In Russ]. DOI: 10.26160/2658-3305-2024-24-112-121.
11. Pletnev M. P. *Avtomatizirovannoe optimal'noe proektirovanie monolitnykh zhelezobetonnykh bunkerov* [Automated optimal design of monolithic reinforced concrete bunkers], Candidate's thesis, Ekaterinburg, UGTU–UPI, 2005, 24 p.
12. Yagofarov Kh. *Stal'nye bunkery kak prostranstvennye sistemy* [Steel bunkers as spatial systems], Doctor's thesis, Ekaterinburg, UrGAPS, 1998, 46 p.
13. Galantsev V. A. *Soprotivlenie materialov. Dinamicheskoe deystvie nagruzki* [Strength of materials. Dynamic action of loads], Velikie Luki, 2021, 24 p.
14. Just M., Peschiutta A. M., Hippe F., Useldinger R., Baller J. Determination of the angle of repose of hard metal granules. *Powder Technology*. 2022, vol. 407, article 117695. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117695.
15. Birbaer A. N., Roleder A. Yu. *Ekstremal'nye vozdeystviya na sooruzheniya* [Extreme impacts on structures], Saint-Petersburg, 2009, 594 p.
16. Yamashita A. S., Thivierge A., Euzébio T. A. M. A review of modeling and control strategies for cone crushers in the mineral processing and quarrying industries. *Minerals Engineering*. 2021, vol. 170, article 107036. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107036.
17. Balashov A. M. Trends in the digitalization of production processes in mining. *Russian Mining Industry Journal*. 2023, no. 3, pp. 134–137. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-3-134-137.
18. Chirkin A. A., Kantemirov V. D. Justification of the methodology for designing mobile crushing and reloading plants. *Minerals and Mining Engineering*. 2020, no. 7, pp. 33–40. [In Russ].
19. Gruzdev A. V., Osadchiy A. M., Furin V. O. Stationary and semi-stationary crushing and reloading plants of Uralmashplant. *Gornyi Zhurnal*. 2012, no. 11, pp. 70–72. [In Russ].
20. Glebov A. V., Bersenev V. A., Karmaev G. D., Seminkin A. V. New approaches and solutions for the application of cyclic-flow technology in quarries. *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 6, pp. 49–52. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кардашин Егор Дмитриевич¹ – младший научный сотрудник,
e-mail: kardashin@igduran.ru,
ORCID ID: 0000-0003-1164-0065,
Журавлев Артем Геннадиевич¹ – канд. техн. наук,
зав. лабораторией, e-mail: juravlev@igduran.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7643-3994,

¹ Институт горного дела Уральского отделения РАН.

Для контактов: Кардашин Е.Д., e-mail: kardashin@igduran.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*E.D. Kardashin*¹, Junior Researcher,
e-mail: kardashin@igduran.ru,
ORCID ID: 0000-0003-1164-0065,
*A.G. Zhuravlev*¹, Cand. Sci. (Eng.),
Head of Laboratory, e-mail: juravlev@igduran.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7643-3994,

¹ Institute of Mining of the Ural Branch Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia.

Corresponding author: Kardashin E.D., e-mail: kardashin@igduran.ru.

Получена редакцией 13.02.2025; получена после рецензии 25.02.2025; принята к печати 10.05.2025.

Received by the editors 13.02.2025; received after the review 25.02.2025; accepted for printing 10.05.2025.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА В ПРОЦЕССЕ ПРОХОДКИ ТОННЕЛЕЙ МЕТРО ПОД ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМИ ПУТЯМИ

(2025, № 2, СБ 1, 28 с.)

Набатов Владимир Вячеславович — канд. техн. наук, доцент, НИТУ МИСИС,

Насибуллин Рамиль Раильевич — аспирант, НИТУ МИСИС, e-mail: vopros@misis.ru.

На основании анализа результатов инклинометрических и геодезических измерений, произведенных в зонах пересечений железнодорожных путей и трасс строящихся тоннелей метро, а также на основании анализа результатов конечно-элементного моделирования, был выявлен ряд закономерностей деформирования грунтового массива в процессе закрытой проходки с помощью тоннелепроходческого механизированного комплекса (ТПМК). Выявлено несимметричное относительно оси железной дороги распределение областей пластических деформаций, способное приводить к различным величинам вертикальных деформаций рельсов. Эта ситуация может вызывать перекосы железнодорожных путей. Показано, что описываемая разница вертикальных деформаций способна приводить к значениям перекоса, превышающим допустимые значения согласно действующей нормативной документации. Другая особенность деформирования породного массива связана с возникновением на определенных глубинах двух временных максимумов абсолютных значений скоростей горизонтальных деформаций с одним минимумом между ними. Соотношение абсолютных значений скоростей в этих двух максимумах предлагается использовать в качестве параметра, опираясь на который можно добиваться снижения деформаций и минимизации нежелательных изменений напряженно-деформированного состояния грунтового массива путем подбора оптимального давления нагнетания тампонажного раствора.

Ключевые слова: тоннель, тоннелепроходческий механизированный комплекс, железные дороги, деформации, моделирование, инклинометрия, геодезия, контроль, прогноз.

ANALYSIS OF CHANGES IN THE STRESS-STRAIN STATE OF THE ROCK MASS DURING THE EXCAVATION OF SUBWAY TUNNELS UNDER RAILWAY TRACKS

V.V. Nabatov, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, NUST MISIS, 119991, Moscow, Russia,

R.R. Nasibullin, Graduate Student, NUST MISIS, 119991, Moscow, Russia, e-mail: vopros@misis.ru.

In the article, based on the analysis of the results of inclinometric and geodetic measurements made in the areas of intersections of railway tracks and routes of metro tunnels under construction, as well as based on the analysis of the results of finite element modeling, a number of patterns of soil deformation during closed tunneling using a mechanized tunnel boring machine were identified. In particular, an asymmetric distribution of plastic deformation areas relative to the railway axis was revealed, which can lead to different values of vertical deformations of rails, leading to oblique setting of the railway tracks. It is shown that the described difference in vertical deformations can lead to oblique setting values exceeding the permissible values according to regulatory documentation. If the oblique setting of the railway tracks exceeds the permissible values, there is a risk of an accident. Another identified feature of the deformation of the rock mass is associated with the appearance at certain depths of two temporary maximums in the absolute values of the rates of horizontal deformations with one minimum between them. The ratio of the absolute values of the velocities in these two maxima is proposed to be used as a parameter, based on which it is possible to achieve a reduction in deformations and minimization of changes in the stress-strain state of the soil mass by selecting the optimal injection pressure of grouting.

Key words: tunnel, tunnel boring machine, railways, deformations, modeling, inclinometry, geodesy, monitoring, forecast.