

К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ ЗАЩИТНЫХ РЕШЕТОК НА ПРИЕМНЫХ БУНКЕРАХ ДРОБИЛЬНО-ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ УСТАНОВОК

Журавлев А.Г.

Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург

Ключевые слова: дробильно-перегрузочная установка, приемный бункер дробилки, решетка, негабарит, гранулометрический состав, бутобой.

Аннотация. Представлены результаты расчетов технологических показателей при использовании защитной решетки на приемном бункере дробильно-перегрузочной установки, функционирующей в составе дробильно-конвейерного комплекса. Рассматриваемые в статье функции решетки – защита от попадания негабаритных кусков в дробилку, защита дробилки и элементов бункера от чрезмерных ударных нагрузок (решетка препятствует прямому движению крупных кусков, которые при разгрузке ударяются о решетку, таким образом их кинетическая энергия гасится). Приведены следующие аспекты: допустимый размер ячеек решетки в зависимости от типоразмера и количества одновременно разгружаемых автосамосвалов с учетом особенностей гранулометрического состава подаваемой горной породы; ударные нагрузки на решетку с учетом ее жесткости; металлоемкость решетки. Сделаны обобщающие выводы о целесообразности и области применения защитных решеток на приемных бункерах дробильно-перегрузочных установок.

ON THE ISSUE OF THE USE OF PROTECTIVE GRILLES ON THE RECEIVING BUNKERS OF CRUSHING AND RELOADING PLANTS

Zhuravlev A.G.

Institute of Mining of Ural branch of Russian academy of sciences, Ekaterinburg

Keywords: crushing and reloading unit, crusher receiving hopper, grate, oversized, granulometric composition, rock breaker.

Abstract. The results of calculations of technological indicators using a protective grid on the receiving hopper of a crushing and reloading unit operating as part of a crushing and conveyor complex are presented. The functions of the grate considered in the article are protection against ingress of oversized pieces into the crusher, protection of the crusher and hopper elements from excessive shock loads (the grate prevents the direct movement of large pieces that hit the grate during unloading, thus their kinetic energy is extinguished). The following aspects are given: the permissible size of the grid cells, depending on the standard size and number of dump trucks being unloaded at the same time, taking into account the characteristics of the granulometric composition of the supplied rock; impact loads on the grid, taking into account its rigidity; metal consumption of the grid. Generalizing conclusions are made about the expediency and scope of protective grilles on the receiving bins of the crushing and reloading unit.

Введение

Циклично-поточная технология является одним из вариантов применения комбинированного транспорта при добыче полезных ископаемых открытым способом и обеспечивает существенное снижение себестоимости при высокой производительности. Правильный выбор параметров оборудования дробильно-конвейерного комплекса, используемого в качестве магистрального звена транспорта при данной технологии, обеспечивает достижение требуемых показателей эффективности [1]. Важным его элементом является дробильно-перегрузочная установка (ДПУ). Приемная способность ДПУ, производительность установленной в ней дробилки определяют часовую и среднеэксплуатационную производительность комплекса в целом [2]. Поэтому их оптимизация является важным вопросом.

Параметры процесса загрузки приемного бункера ДПУ определяются большим количеством факторов, наиболее значимыми из которых являются:

– вид транспорта и грузоподъемность транспортных средств;

- схема разгрузки транспорта в бункер (количество мест разгрузки, их расположение, саморазгрузка или опрокид, предпочтительные направления загрузки в зависимости от типа дробилки под бункером и т.п.);
- форма бункера и его заполняемость с учетом параметров транспорта [3];
- тип и производительность дробилки или питателя, осуществляющего прием горной массы из бункера;
- предохранительные элементы в приемной части бункера.

В научно-технической литературе вопросу особенной выгрузки горной массы в бункеры и вообще оптимизации их элементов для горнорудной промышленности не уделяется значительного внимания (смотри, например, [4-10]). Это, скорее всего, связано с тем, что этапе исследований и определения структуры и компоновки бункера и ДПУ в целом решаются, как правило, более крупные задачи, обеспечивается беспрепятственное истечение материала, а оптимизация отдельных элементов бункера выполняется на инженерном этапе НИОКР методом вариантов с элементами ТРИЗ (теория решения инженерных задач) и нередко в дальнейшем охраняется производителями оборудования в режиме «ноу-хау». Однако создание современных ДПУ, адаптированных к конкретным горно-технологическим условиям [11], показало, что выбор рациональных параметров элементов приемного бункера существенно влияет на их работоспособность и фактические технологические показатели (приемная и пропускная способность, производительность, межремонтный ресурс и т.п.).

В связи с этим отдельно исследован вопрос применимости на приемных бункерах ДПУ защитных решеток, функционал которых:

- защита от попадания негабаритных кусков в дробилку для исключения ее повреждения и/или остановки технологического процесса для извлечения куска;
- исключения ударных нагрузок на элементы дробилки бункера от падающих с большой высоты негабаритных кусков;
- распределение потока по площади за счет обтекания балок решетки.

Из рисунка 1 видно, что увеличение грузоподъемности автосамосвалов уменьшает интенсивность их разгрузки на рампах. В то же время, введение приоритета для разгрузки автосамосвалов, учитывающего предпочтительные направления загрузки конусной дробилки, повышает интенсивность разгрузки на определенных рампах. Также видна разница интенсивности загрузки бункера, рассчитанной на номинальную производительность дробилки и по среднегодовым значениям использования ДПУ, которые ниже, учитывая простои оборудования по организационным, технологическим и техническим причинам. Таким образом, интенсивность, на которую должна быть рассчитана приемная способность ДПУ в целом и элементов ее приемного бункера прежде всего, как правило, превышает расчетную среднегодовую на 60-100%.

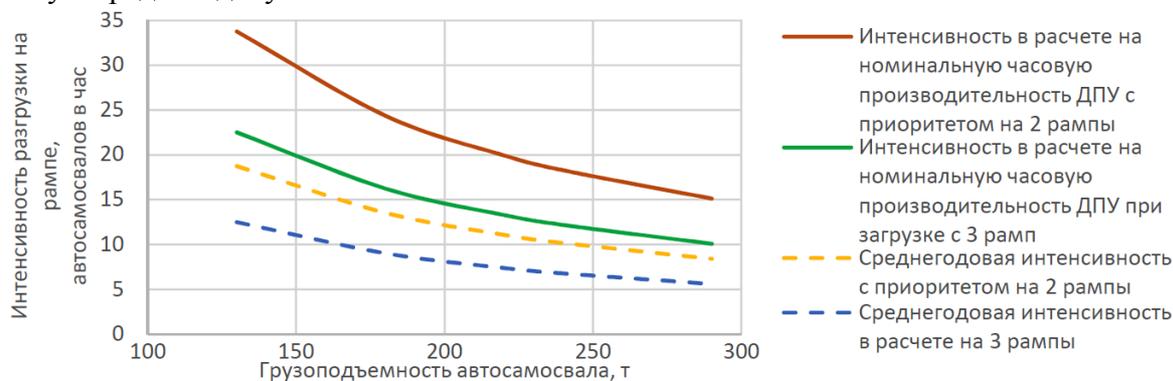


Рис. 1. Влияние грузоподъемности автосамосвалов и схемы их расположения на интенсивность загрузки ДПУ при заданной часовой производительности 7200 т/ч

Существенное влияние на приемно-пропускную способность ДПУ влияет гранулометрический состав поступающей руды. Пример гранулометрический состав, характерный для месторождения железистых кварцитов, приведен на рисунке 2. Видно, что

содержание в поступающей на ДПУ горной массе кусков размером менее 500 мм на порядок выше, чем более крупных. Тем не менее, при высокой производительности подачи руды в бункер, куски с размерами 1200 мм и более будут поступать на разгрузку в бункер в среднем в каждом из пяти-шести самосвалов грузоподъемностью 130 т или двух-трех самосвалов грузоподъемностью 240 т. С учетом критического размера негабаритов для дробилок типа ККД-1500 в 1500 мм такие куски будут по укрупненной оценке присутствовать в каждом пятом-шестом самосвале грузоподъемностью 240 т с вероятностью 85-90%. Такая частота вероятного попадания негабаритов в бункер требует предусматривать защиту от них. Одним из вариантов такой защиты является металлическая решетка в верхней части бункера.

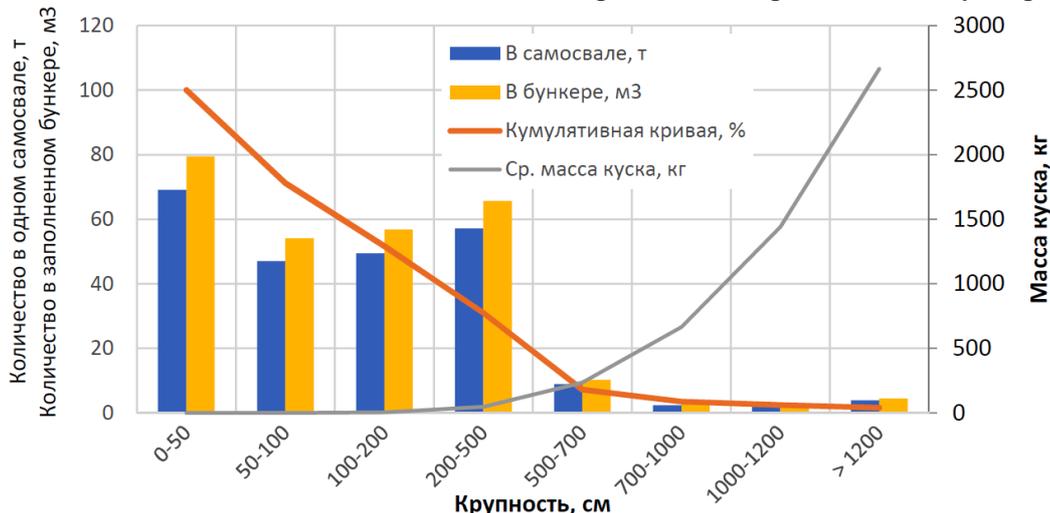


Рисунок 2 – Принятый в расчетах гранулометрический состав горной породы, доставляемой автосамосвалами на ДПУ с приемным бункером вместимостью 300 м³

Методы исследования

Оценка расположения, количества и формы развала горной массы на решетке после выгрузки из автосамосвалов определялась на основе:

- анализа схожих процессов разгрузки горной массы в бункер (процесс разгрузки горной массы из автосамосвала в бункер и на горизонтальную площадку, траектория падения крупногабаритных кусков при разгрузке и т.п.);
- мысленно-логического эксперимента с применением геометрических построений;
- сопоставлением результатов, полученных вышеуказанными способами, с отбросом не сходящихся их элементов.

Такой подход применялся по следующим причинам:

- значительная дороговизна проведения дорогостоящих натуральных экспериментов и по этой причине их нецелесообразность;
- наличие искажения рассматриваемых процессов за счет масштабирования при исследовании на уменьшенных масштабных макетах.

Ударные нагрузки на металлоконструкции решетки оценивались эквивалентной статической нагрузкой по известной методике расчета с применением коэффициента динамичности [12].

Задача определения допустимого размера ячеек решетки решалась графическим методом, как пересечение кривых продолжительности дробления и интервала между разгрузками автосамосвалов.

Результаты и их анализ

Анализ показал, что применимость защитной решетки на приемном бункере определяется следующими факторами:

- пропускная способность решетки с учетом гранулометрического состава, задерживаемого решеткой объема крупногабаритных кусков и скорости их очистки (рассматривалось применение гидравлического манипулятора с бутобоем);

- прочность и долговечность конструкции решетки;
- рациональная металлоемкость;
- технологичность с учетом частоты возникающей необходимости ее снятия в процессе работы и временных затрат на данную операцию с учетом потерь производительности ДПУ.

Предельно допустимая пропускная способность решетки оценивалась по сопоставлению расчетной интенсивности поступления автосамосвалов на ДПУ и скорости очистки решетки от задержанных ею негабаритных кусков, выраженные в показателях интервала времени между прибывающими на разгрузку самосвалами. Если время очистки решетки превышает интервал прибытия автосамосвалов, то наблюдается ограничение приемной способности ДПУ и такой вариант отбрасывается; принимается вариант со следующим большим размером решетки, пока не будет найден подходящий. Расчеты проведены для разных размеров ячеек решетки.

Соотношение размеров ячеек решетки и задерживаемых решеткой кусков (их размер) рассчитывалось через коэффициент. Этот коэффициент установлен по результатам анализа ряда практических данных применения решеток на горнодобывающих предприятиях; в данных расчетах принят коэффициент 1,1. Объем задерживаемой решеткой горной массы оценивался как объем пирамиды сложной формы с многогранником нерегулярной структуры в основании, который описывал задерживаемые решеткой негабариты с учетом «скругления» зазором между ними по периметру. Конфигурация данного многогранника принималась экспертным методом. Форма пирамиды на данном многограннике отстраивалась в программе КОМПАС вручную. Основой для определения формы пирамид служил анализ навала горной массы, образуемого на решетке по ряду фото- и видеоматериалов, отснятых на горнодобывающих предприятиях. В качестве угла наклона образующих пирамид принят угол откоса для рассматриваемой горной породы. Количество остающейся на решетке горной массы для разных размеров ячеек решетки и типоразмера автосамосвалов приведено на рисунке 3.

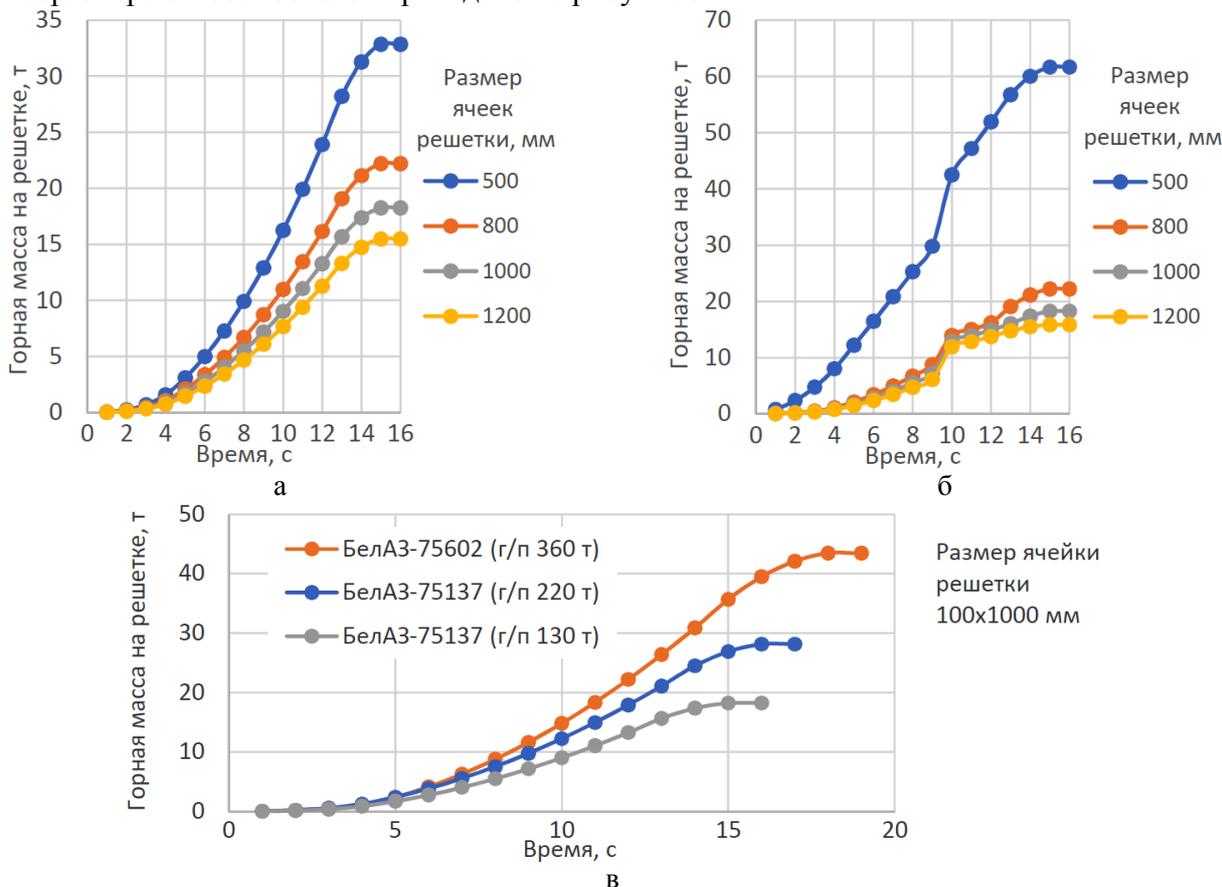


Рис. 3. Динамика накопления разгружаемой автосамосвалом горной массы на решетке: а – при отсутствии негабаритов; б – при наличии негабаритов (а, б – при грузоподъемности автосамосвалов 136 т); в – при наличии негабаритов для разной грузоподъемности самосвалов

Расчет проводился исходя из циклограммы скорости ссыпания горной массы из кузова автосамосвала, построенной по результатам визуальных наблюдений (в ходе анализа установлено, что общее время разгрузки карьерного автосамосвала мало зависит от его грузоподъемности). Принято допущение, что горная масса накапливается на ребрах решетки:

- в виде мелочи по площади рассыпания горной массы из кузова;
- в виде негабаритных кусков, удерживаемых решеткой;
- в виде мелочи, задерживаемой на площади негабаритных кусков.

Площадь негабаритов определена исходя из их количества и линейных размеров согласно гранулометрическому составу, размера ячейки и коэффициента лещадности кусков по трем измерениям 0,75 (т.е. форма незначительно вытянута).

Из результатов расчета (рис. 3,б) видно, что наличие негабаритов существенно (в 2-3 раза) увеличивает количество задерживаемых решеткой кусков и накапливающейся на них рудной мелочи. Влияние грузоподъемности автосамосвала на это количество приведено на рисунке 3,в.

Результаты расчетов минимально необходимого размера ячейки решетки приведены на рисунке 4. Видно, что время на очистку решетки (обозначено как время дробления негабаритов) имеет перегиб графика, который повторяет соответствующую форму графика гранулометрического состава (рис. 2) по мере того, как уменьшенная до определенного размера решетка задерживает более мелкие фракции. Первичный анализ показывает, что при размерах решетки менее 800 мм работа данного бункера в ритмичном режиме, очевидно, невозможна, поскольку на решетке будет массово скапливаться разгружаемая руда.

Детальный анализ позволил определить рациональный размер ячеек решетки исходя из обеспечения ритмичности работы ДПУ без образования очередей самосвалов в расчете на номинальную часовую производительность. Для данных условий (часовая производительность ДПУ 6500 т/ч и приведенный на рисунке 2 гранулометрический состав подаваемой руды) он составляет:

- не менее 1250 мм при схеме разгрузки самосвалов с одной рампы;
- не менее 960 мм при разгрузке с двух рамп;
- не менее 890 мм при разгрузке с трех рамп.

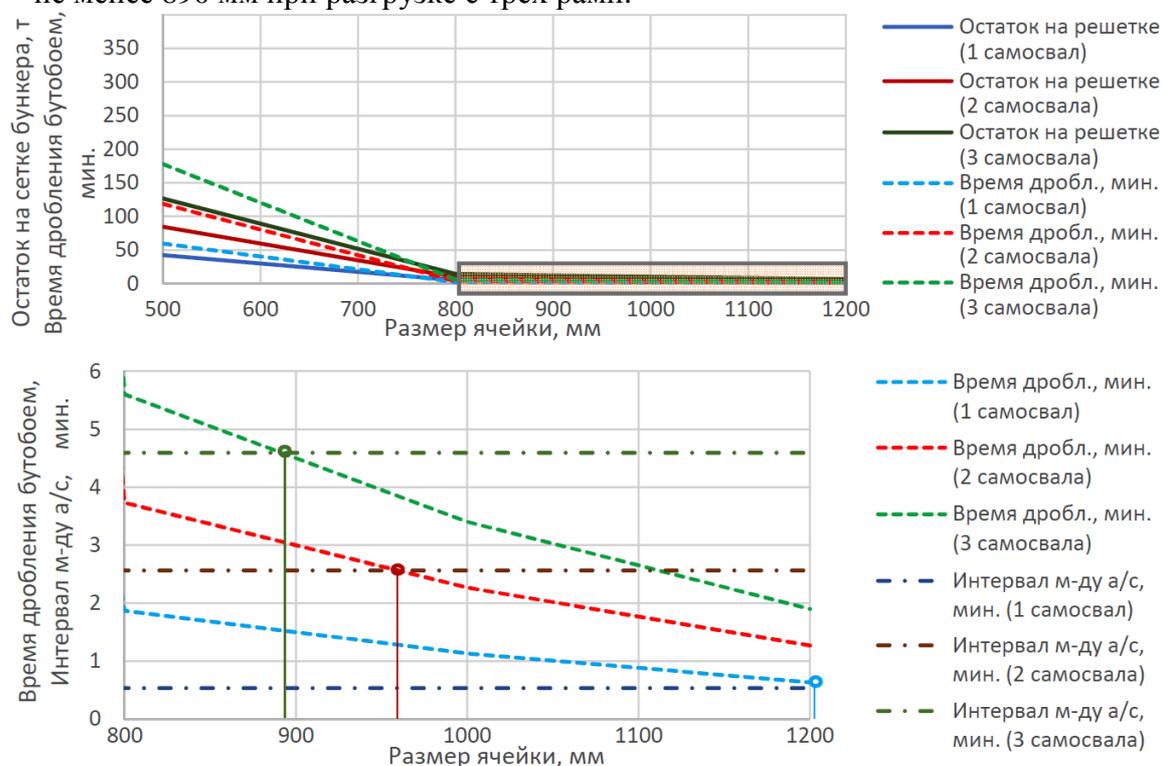


Рис. 4. Остаток горной массы на сетке приемного бункера ДПУ после разгрузки автосамосвала БелАЗ-75307 гр/п 220 т в зависимости от размера ячеек решетки

Такая закономерность объясняется увеличением интервала разгрузки автосамосвалов на каждом из мест при заданной часовой интенсивности подачи руды к бункеру, что обеспечивает возможность более длительной зачистки навала на решетке, а потому размер решетки может быть уменьшен с кратным повышением количества задерживаемой ею руды.

Помимо технологических показателей при принятии решения о применении решетки на приемном бункере важно определить технические ее параметры для оценки целесообразности по критерию рациональной металлоемкости. Главным образом металлоемкость зависит от необходимой прочности решетки, которая определяется технологическими нагрузками на нее: статическое давление от накопившейся на ребрах горной массы и ударные нагрузки от падающей горной массы.

Статические нагрузки определяются весом лежащей на решетке горной массы, который в свою очередь пропорционален её количеству, приведенному на рисунке 3.

Динамические нагрузки формируются:

- падающим потоком кусков горной массы, размер которых меньше ячеек решетки, а потому лишь частично взаимодействующих с решеткой;

- падающими крупногабаритными кусками, которые больше, чем размер ячеек решетки.

Наибольшие значения имеют вторые из перечисленных нагрузок. При расчете указанных ударных нагрузок принято, что решетка находится на уровне стояния автосамосвала, а высота падения соответствует положению негабарита на 2/3 длины его кузова при максимальном угле подъема.

Значения коэффициента динамичности от ударной нагрузки, рассчитанные по известной зависимости из теории прочности [12], приведены на рисунке 5,а. Видно, что с ростом жесткости решетки (например, коротких по длине или более жестких для работы в условиях крупных негабаритов) он существенно возрастает, что дополнительно увеличивает металлоемкость решетки для обеспечения долгосрочной прочности.

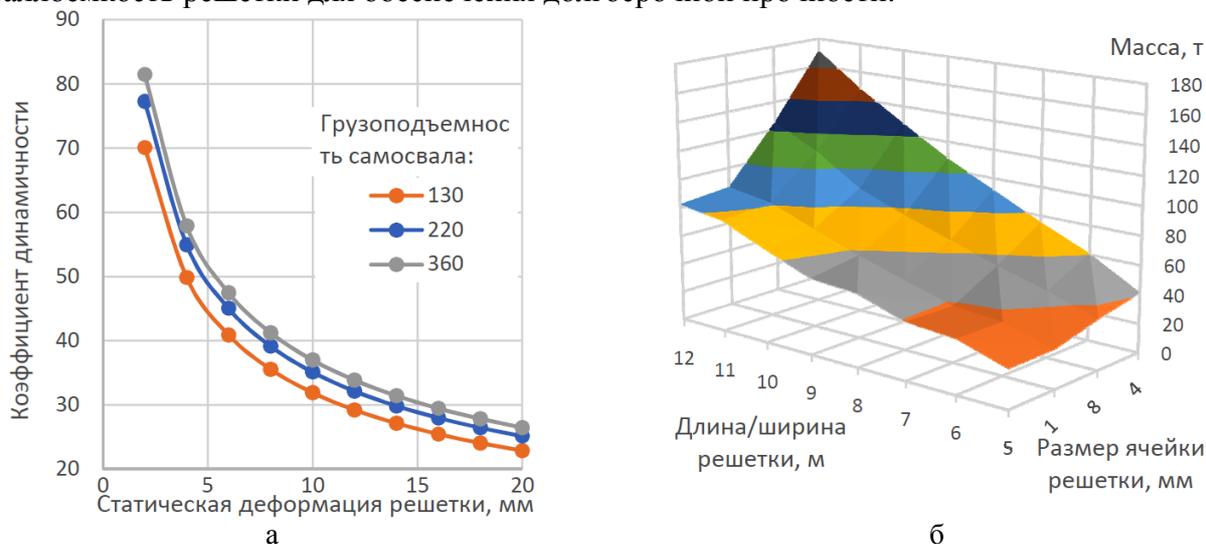


Рис. 5. Коэффициент динамичности ударных нагрузок на решетку от разгружаемой горной массы и соответствующая им по прочности металлоемкость решетки:

- а – коэффициент динамичности нагрузки от негабарита размером 1,5 м массой 9 т;
- б – металлоемкость решетки, рассчитанной на разгрузку самосвалов гр/п 220 т

Металлоемкость решетки определена приближенным расчетом на прочность балки под действием удара негабаритного куска породы, предел прочности которой увеличен относительно справочного значения для стали С245 кратно количеству ребер решетки в зоне структурной связанности с коэффициентом структурной связанности 0,35 (обусловлен многочисленными связями ребер решетки между собой). Зона структурной связанности учитывалась только в пределах площади падающего камня, спроецированной на решетку. Точка приложения нагрузки учитывает траекторию падения камня из кузова автосамосвала при нахождении его у края бункера.

Из результатов расчета (рис. 5,б) видно, что уменьшение по технологическим соображениям размера ячеек решетки ведет к существенному росту ее металлоемкости. Поэтому на практике следует стремиться к максимально возможному размеру ячеек, поскольку это заметно (в 1,5-2 раза) снижает металлоемкость.

Выводы

1. Применимость решетки определяется следующими критериями:
 - обеспечение защитных функций от чрезмерных ударных нагрузок падающей горной массы на элементы дробилки и предотвращения попадания негабаритных кусков в дробилку, вызывающего ее остановку;
 - приемлемые показатели технологичности, обусловленные пропускной способностью решетки, обеспечивающей дробление негабаритов и очистку ее от насыпной горной массы (задача решается совместно с подбором типоразмера манипулятора-бутобоя);
 - рациональная металлоемкость решетки, которая зависит от количества задерживаемой ею горной массы с учетом гранулометрического состава и предельных параметров кусков, перерабатываемых дробилкой.
2. Установлены закономерности влияния грузоподъемности автосамосвалов и размеров ячеек решетки на количество задерживаемой решеткой горной массы. Определены рациональные размеры ячеек решетки в зависимости от количества мест разгрузки для автосамосвалов грузоподъемностью 220 т при высокой интенсивности подачи руды в бункер (6500 т/ч).
3. Практическое применение результатов расчета при проектировании дробильно-перегрузочной установки показало, что описанной в статье глубины и точности проработки математических моделей достаточно для предпроектного выбора рациональных вариантов конструкции решеток и принятия решения об их применении или не применении.
4. Приведенные в данной статье зависимости в графическом виде описывают закономерности применительно к принятым условиям (гранулометрический состав, насыпная и истинная плотность пород, угол естественного откоса и т.п.). В каждом ином случае такие расчеты должны проводиться для соответствующих конкретных условий.
5. Выполненные исследования позволили сделать вывод о рациональной области применения защитных решеток рудных бункеров:
 - при относительно невысокой пропускной способности бункера (до 1000 т/ч – без оптимизации технологических ее параметров, 1000-4000 т/ч – с оптимизацией);
 - в технологических цепочках, не предполагающих дробильные машины, для предотвращения попадания негабаритных кусков в технологический процесс (при этом производительность цепочки, как правило, не должна превышать 2000 т/ч);
 - применение защитных решеток на бункерах с производительностью >4000 т/ч должно рассматриваться только при наличии специальных требований для ее применения, а ее параметры должны тщательно оптимизироваться под конкретные условия;
 - во всех случаях при применении решетки должны быть предусмотрены мероприятия по оперативной очистке навала на ней (при пропускной способности бункера более 1000 т/ч – механизированные подходящего типа, а при производительности более 2000 т/ч – обязательно манипуляторная установка с бутобоем).

Финансирование. Статья подготовлена в рамках выполнения Государственного задания №075-00412-22 ПР. Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горнотехнических систем (FUWE-2022-0005), рег. №1021062010531-8-1.5.1, рег. №123012300005-3.

Список литературы

1. Кармаев Г.Д., Глебов А.В. Выбор горно-транспортного оборудования циклично-поточной технологии карьеров. – Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 2012. – 295 с.
2. Журавлев А.Г., Черепанов В.А. Резервы повышения производительности подсистемы «карьерный транспорт – дробильный передел» с учетом коэффициентов использования дробильного оборудования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331, №11. – С. 195-207. – DOI: 10.18799/24131830/2020/11/2902.

3. 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.
4. Руководство по расчету и проектированию железобетонных, стальных и комбинированных бункеров. – М: Стройиздат, 1983. – 199 с.
5. Плетнев М.П. Автоматизированное оптимальное проектирование монолитных железобетонных бункеров: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. – 24 с.
6. Ягофаров Х. Стальные бункеры как пространственные системы: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. – Екатеринбург: УрГАПС, 1998. – 46 с.
7. Eduardo Rojas, Víctor Vergara, Rodrigo Soto. Case study: Discrete element modeling of wear in mining hoppers // Wear. 2019, vol. 430-431, pp. 120-125. doi.org/10.1016/j.wear.2019.04.020.
8. Megan Danczyk, Tom Meaclem, Maral Mehdizad, Daniel Clarke, Petrik Galvosas, Luke Fullard, Daniel Holland. Influence of contact parameters on Discrete Element method (DEM) simulations of flow from a hopper: Comparison with magnetic resonance imaging (MRI) measurements // Powder Technology. 2020, vol. 372, pp. 671-684. doi.org/10.1016/j.powtec.2020.06.002.
9. Evgeny Rabinovich, Haim Kalman, Per F. Peterson. Parametric study and design procedure for planar silos and hoppers // Powder Technology. 2021, vol. 388, pp. 333-342. doi.org/10.1016/j.powtec.2021.04.086.
10. Changhao Guo, Mingsheng Ya, Youlin Xu, Jiaqiang Zheng. Comparison on discharge characteristics of conical and hyperbolic hoppers based on finite element method // Powder Technology. 2021, vol. 394, pp. 300-311. doi.org/10.1016/j.powtec.2021.08.064.
11. Журавлёв А.Г., Семёнкин А.В., Черепанов В.А., Глебов И.А., Чендырев М.А. Задачи развития перспективных циклично-поточных технологий для глубоких карьеров // Горная промышленность. – 2022. – №1S. – С. 53-62. – DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-53-62.
12. Галанцев В.А. Сопrotивление материалов. Динамическое действие нагрузки. – Великие Луки: ФГБОУ ВО ВГСА, 2021. – 24 с.

References

1. Karmaev G.D., Glebov G.D. Selection of mining and transport equipment for cyclic flow technology of quarries. – Ekaterinburg: Ural Branch of RAS, 2012. – 295 p.
2. Zhuravlev A.G., Cherepanov V.A. Reserves for increasing the productivity of the "quarry transport – crushing conversion" subsystem, taking into account the coefficients of use of crushing equipment // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2020, vol. 331, no. 11, pp.195-207. DOI: 10.18799/24131830/2020/11/2902.
3. Chendyrev M.A., Zhuravlev A.G. Rationalization of geometric parameters of receiving bins of crushers in road transport // Mining informational and analytical bulletin. 2022, no. 5-1, pp. 158-170. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_158.
4. Guidelines for the calculation and design of reinforced concrete, steel and combined bunkers. – М.: Stroyisdat, 1983. – 199 p.
5. Pletnev M.P. Automated optimal design of monolithic reinforced concrete bunkers: Abstract of the diss. ... cand. of tech. sc. – Ekaterinburg: Ural state technical university, 2005. – 24 p.
6. Yagofarov Kh. Steel bunkers as spatial systems: Abstract of the diss. ... cand. of tech. sc. – Ekaterinburg: Ural state academy of rail way, 2005. – 24 p.
7. Eduardo Rojas, Víctor Vergara, Rodrigo Soto. Case study: Discrete element modeling of wear in mining hoppers // Wear. 2019, vol. 430-431, pp. 120-125. doi.org/10.1016/j.wear.2019.04.020.
8. Megan Danczyk, Tom Meaclem, Maral Mehdizad, Daniel Clarke, Petrik Galvosas, Luke Fullard, Daniel Holland. Influence of contact parameters on Discrete Element method (DEM) simulations of flow from a hopper: Comparison with magnetic resonance imaging (MRI) measurements // Powder Technology. 2020, vol. 372, pp. 671-684. doi.org/10.1016/j.powtec.2020.06.002.
9. Evgeny Rabinovich, Haim Kalman, Per F. Peterson. Parametric study and design procedure for planar silos and hoppers // Powder Technology. 2021, vol. 388, pp. 333-342. doi.org/10.1016/j.powtec.2021.04.086.
10. Changhao Guo, Mingsheng Ya, Youlin Xu, Jiaqiang Zheng. Comparison on discharge characteristics of conical and hyperbolic hoppers based on finite element method // Powder Technology. 2021, vol. 394, pp. 300-311. doi.org/10.1016/j.powtec.2021.08.064.
11. Zhuravlev A.G., Cherepanov V.A., Glebov I.A., Chendyrev M.A. The tasks of developing promising cyclic flow technologies for deep quarries // Russian mining industry, 2022, no. 1S, pp. 53-62. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-53-62.
12. Galantsev V.A. The resistance of materials. Dynamic load action. – Velikie luki: FGBOU VO VSSA, 2021. – 24 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Журавлев Артем Геннадиевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией juravlev@igduran.ru	Zhuravlev Artem Gennadievich – candidate of technical sciences, assistant professor, laboratory chief
---	--

Получена 11.04.2024