

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ДРОБИЛЬНО-ПЕРЕГРУЗОЧНОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ЕЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Журавлев А.Г., Кардашин Е.Д.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург

Ключевые слова: компьютерное имитационное моделирование, дробильно-перегрузочная установка, рациональные параметры дробильно-перегрузочной установки, циклично-поточная технология, оптимизация конструктивно-технологических параметров.

Аннотация. В статье исследуются вопросы поиска рациональных параметров дробильно-перегрузочных установок входящих в состав дробильно-конвейерных комплексов, используемых для транспортирования горной массы в карьерах со средней и высокой производственной мощностью. Рассматривается решение данной задачи с применением компьютерного моделирования функционирования дробильно-перегрузочной установки. Задачей представленного исследования является оценка применимости имитационной модели дробильно-перегрузочной установки простой одноуровневой структуры для решения задач по обоснованию рациональных технологических и компоновочных параметров дробильно-перегрузочной установки. Делается акцент на оптимизации конструктивно-технологических параметров основных элементов дробильно-перегрузочной установки: приемного и разгрузочного бункеров, дробилки. Рассмотренное имитационное моделирование обеспечивает более точное определение параметров дробильно-перегрузочной установки за счет учета динамики процессов, изменяемых во времени с учетом алгоритма работы дробильно-перегрузочной установки конкретной структуры. Показано, что применение модели, требующей минимальной трудоемкости на ее построение (заполнение исходных данных), может позволить решать задачи определения основных технологических параметров дробильно-перегрузочной установки в рациональном диапазоне. Эксперименты с разработанной моделью показали, что учет реальных потоков материала и связанных с ними неочевидных закономерности при ее применении позволяет оптимизировать конструктивные параметры дробильно-перегрузочной установки на существенную величину. Например: вместимость приемного бункера на 10-20%, разгрузочного бункера на 10-35% производительность дробилки 5-7%.

FEATURES OF MODELING THE OPERATION OF A CRUSHING AND RELOADING PLANT WHILE OPTIMIZING ITS DESIGN AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS

Zhuravlev A.G., Kardashin E.D.

Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg

Keywords: computer simulation, crushing and reloading plant, rational parameters of crushing and reloading plant, cyclic flow technology, optimization of structural and technological parameters.

Abstract. The article examines the issues of searching for rational parameters of crushing and transshipment plants included in crushing and conveyor complexes used for transporting rock mass in quarries with medium and high production capacity. The solution of this problem is considered using computer simulation of the operation of a crushing and reloading plant. The objective of the presented study is to assess the applicability of a simulation model of a crushing and reloading plant of a simple single-level structure to solve problems of substantiating rational technological and layout parameters of a crushing and reloading plant. The emphasis is on optimizing the design and technological parameters of the main elements of the crushing and unloading plant: receiving and unloading bunkers, crushers. The considered simulation provides a more accurate determination of the parameters of the crushing and reloading plant by taking into account the dynamics of processes that change over time, taking into account the algorithm of operation of the crushing and reloading plant of a specific structure. It is shown that the application of a model requiring minimal labor intensity for its construction (filling in the initial data) can allow solving the problems of determining the main technological parameters of a crushing and transshipment plant in a rational range. Experiments with the developed model have shown that taking into account the real flows of material and the associated non-obvious patterns in its application makes it possible to optimize the design parameters of the crushing and reloading plant by a significant amount. For example: the capacity of the receiving hopper is 10-20%, the unloading hopper is 10-35%, the productivity of the crusher is 5-7%.

Введение

Развитие горнодобывающей промышленности требует постоянного совершенствования и оптимизации рабочих процессов для повышения эффективности и безопасности добычных операций. В этом контексте моделирование работы горного оборудования становится важным инструментом для анализа и оптимизации этих процессов. Оно позволяет виртуально воссоздать и изучить различные сценарии работы оборудования, предоставляя ценные сведения и рекомендации для принятия решений.

Циклично-поточная технология (ЦПТ) является одним из эффективных направлений развития горно-транспортных комплексов карьеров [1]. Дробильно-перегрузочные установки (ДПУ), входящие в состав дробильно-конвейерного комплекса (ДКК), составляющего основу ЦПТ, являются главными технологическими объектами и определяют как производительность комплекса в целом, так и качество подготовки горной массы к транспортированию, а, соответственно, во многом задают уровень эффективности работы ДКК в целом. Поэтому выбор рациональных их технологических и конструктивных параметров является актуальной задачей [2].

При оптимизации параметров дробильно-перегрузочной установки можно выделить 2 уровня задач.

1) Выбор рациональных технологических и компоновочных параметров ДПУ (как правило, уровень эскизного технического проекта, общего горно-технологического проекта). Основная задача – выбор рациональных параметров ДПУ в увязке с параметрами ДКК и транспортной системы в целом, оценка ее пропускной способности и укрупненных технико-экономических показателей.

2) Оптимизация конструктивно-технологических параметров ДПУ при конкретной конструктивной проработке (как правило, уровень рабочего горно-технологического или машиностроительного проекта). Основная задача – оптимизация конкретных конструктивных, строительных параметров ДПУ, уточнение технологических параметров ДПУ с учетом совокупности факторов и ограничений, оптимизация капитальных затрат, оптимизация эксплуатационных параметров, оптимизация технико-экономических показателей, оптимизация ремонтно-технологического обслуживания ДПУ.

Решению задач оптимизации как технологических, так и конструктивных параметров дробильных комплексов с применением компьютерного моделирования в настоящее время уделяется значительное внимание, поскольку такой подход позволяет учитывать закономерности и явления, не отражаемые в имеющихся расчетных методиках. В наибольшей степени современные исследования направлены на оптимизацию параметров дробилок (например, [3-5]) и на оптимизацию параметров и схем размещения дробильно-конвейерных комплексов в технологических комплексах в целом и дробильно-конвейерных комплексов в частности (например, [6-10]). Российское машиностроение имеет задел для создания современных как стационарных, так и полустационарных (перемещаемых) ДПУ [11], адаптированные под особенности конкретных месторождений. Таким образом, тема представленного исследования актуальна. Несмотря на значительный объем исследований пока не найдены методические инструменты, которые обладали бы оптимальным соотношением по сложности, точности и применимости в практике проектирования как горнодобывающих предприятий, так и комплексов технологического оборудования. В связи с этим продолжается поиск методов оптимизации конструктивно-технологических параметров ДПУ методами компьютерного моделирования разного уровня.

Задачей представленного исследования является оценка применимости имитационной модели дробильно-перегрузочной установки (ДПУ) простой одноуровневой структуры для решения задач первого уровня по обоснованию рациональных технологических и компоновочных параметров ДПУ. Основная идея – применение модели, требующей минимальной трудоемкости на ее построение (заполнение исходных данных), может позволить решать задачи определения основных технологических параметров ДПУ.

Методы

В основу подхода по поиску рациональных параметров ДПУ положено следующее:

- производительность ДПУ должна быть не меньше заданной с учетом алгоритмов функционирования и пропускной способности всех входящих в нее элементов (бункеры, дробилка, питатели, конвейеры, перепускные точки и т.п.);
- минимально необходимая вместимость бункера определяется по отсутствию его переполнения при заданных входящем и исходящем потоках (в т.ч. их неравномерности) за период оптимизации;
- максимальная вместимость бункера ограничивается его металлоемкостью и габаритами, в том числе высотой встраивания;
- рациональная компоновка ДПУ оценивается по минимальной высоте встраивания, достаточности размеров верхней площадки для маневрирования транспорта и достаточностью приемной способности ДПУ по количеству мест разгрузки для входящего транспорта.

Для оценки наилучшего варианта параметров ДПУ используется поиск минимума материалоемкости или максимума производительности. Минимум находится доступным рациональным способом: при малом количестве рассматриваемых вариантов – методом перебора, при значительном их количестве – методом «мини-макса».

Инструментом моделирования является разработанная в ИГД УрО РАН имитационная модель ДПУ (рис. 1). Она представляет собой специализированное программное обеспечение (ПО), которое позволяет укрупненно воссоздать и анализировать рабочие процессы данного типа оборудования. Она позволяет варьировать схему оборудования ДПУ, количество загрузочных мест, производительность и вместимость всех основных агрегатов ДПУ. Также ПО выдает расчетные параметры по каждому агрегату (текущее заполнение, производительность, количество переработанной горной массы и т.п.) как непосредственно в процессе моделирования, так и сохраняемый архив с детализацией во времени.

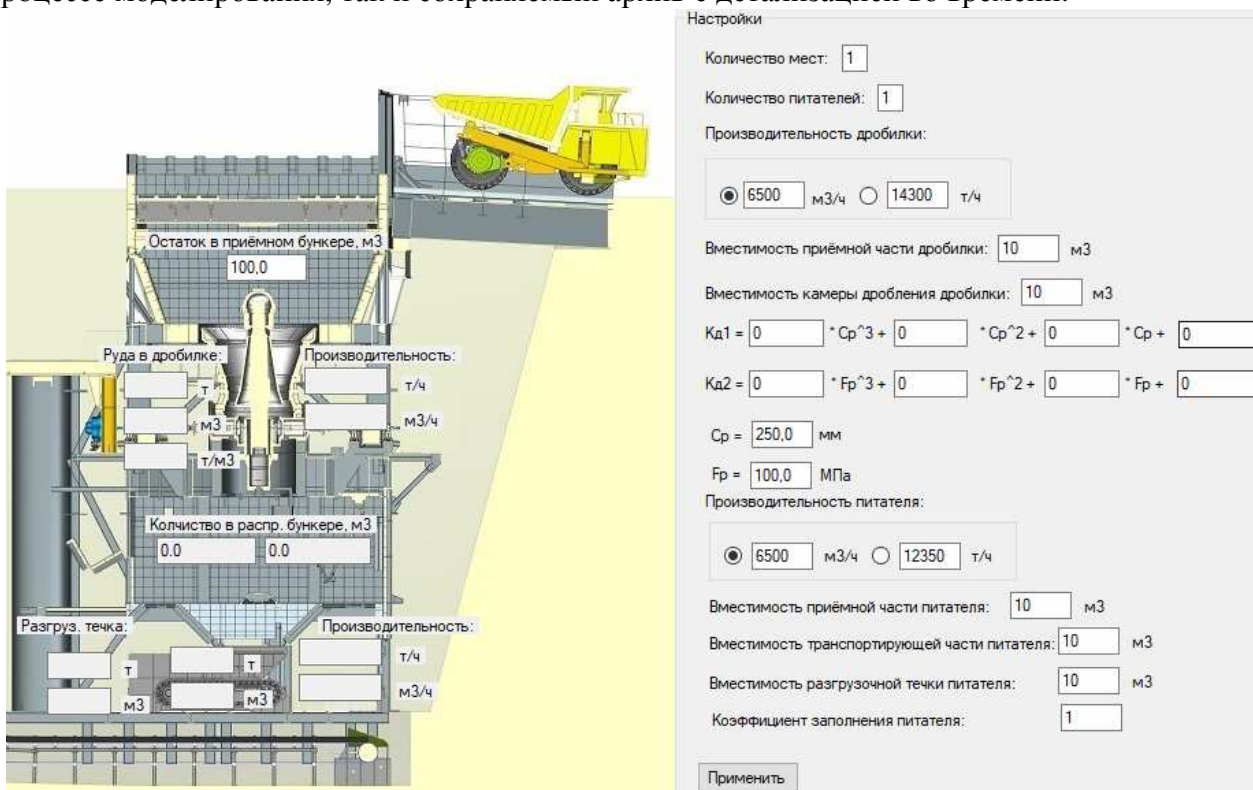


Рис. 1. Окно программы для моделирования работы ДПУ (разработчик – ИГД УрО РАН)

Программа предоставляет возможность воспроизводить работу ДПУ по вариантам, как в исследовательских целях, так и при оптимизации работы дробильно-перегрузочной установки. Например, с ее помощью можно моделировать и изучать влияние различных

факторов (таких как скорость подачи материала, параметры и производительность дробилки, нагрузка на конвейеры и другие параметры) на производительность работы установки.

Исследование проводилось на модели ДПУ со следующей структурой (варьируемые по вариантам параметры отмечены «var»):

- приемный бункер (var), снабженный от 1 до 3 разгрузочных мест для карьерных автосамосвалов;
- конусная дробилка ККД-1500 с заданной производительностью и объемом приемной части и камеры дробления (var);
- разгрузочный бункер заданной вместимости (var);
- 1 или 2 пластинчатых питателя с постоянной производительностью (var), обеспечивающих дозированную выгрузку из бункера на конвейер
- передаточный конвейер с заданной производительностью (var).

Результаты и их анализ

Установлено, что основными компоновочными параметрами ДПУ рассматриваемой конструкции, влияющими на оптимизацию ее габаритов, металлоемкости и схемы встраивания, являются:

- вместимость приемного бункера;
- количество разгрузочных мест для автосамосвалов и их расположение;
- тип и производительность дробилки;
- вместимость разгрузочного бункера;
- количество и производительность пластинчатых питателей.

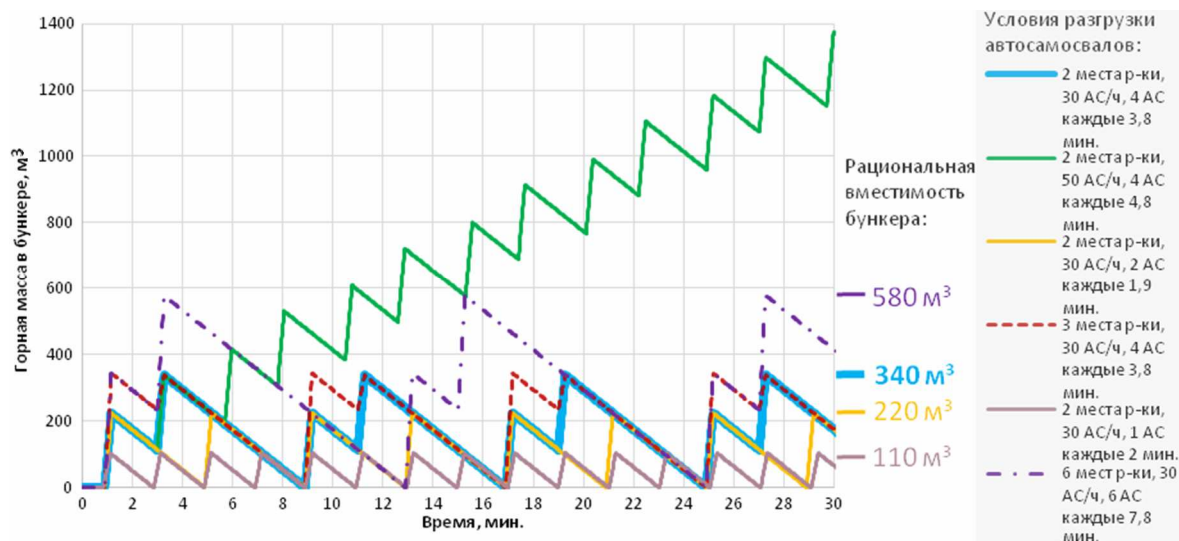
Рассмотрим возможности и результаты моделирования, обеспечивающие выбор их рациональных значений.

Расчеты показали, что одним из важных внешних факторов, который необходимо учитывать, является неравномерность прибытия автосамосвалов, поскольку она существенно влияет как на требуемую вместимость приемного бункера для компенсации колебаний, так и на резерв производительности дробилки.

При оценке рациональной вместимости приемного бункера должен учитываться комплекс параметров: количество мест разгрузки самосвалов, интенсивность прибытия автосамосвалов, определяемая в том числе неравномерностью их потока, производительность дробилки [12]. Применение имитационного моделирования обеспечивает возможность найти оптимум сочетания указанных параметров в отличие от линейного расчета. Из рисунка 2 видно, что количество горной массы в приемном бункере имеет специфическую динамику в зависимости от вышеуказанных параметров и факторов. Так, при превышении интенсивности прибытия автосамосвалов над производительностью ДПУ (прежде всего дробилки) наблюдается нарастающее заполнение бункера, что говорит о необходимости выбирать более производительную дробилку для данных горно-технологических условий.

Анализ показал, что для вышеописанного комплекса параметров обобщающими показателями являются: интенсивность разгрузки автосамосвалов (определяется заданной производственной мощностью добычного участка, количеством мест разгрузки и неравномерностью прибытия), продолжительность непрерывной разгрузки автосамосвалов (определяется заданной производственной мощностью добычного участка и неравномерностью прибытия самосвалов). Поэтому они использованы на нижеприведенных графиках.

Из рисунка 3 видно, что количество мест разгрузки с одной стороны приводит к повышению приемной способности ДПУ, с другой – влечет более интенсивное заполнение приемного бункера до предела (см. рис. 3,а), после которого требуется пауза в разгрузке самосвалов для переработки этого объема дробилкой. Поэтому для конкретной вместимости и производительности дробилки на основе моделирования может быть найдена допустимая интенсивность разгрузки автосамосвалов (см. рис. 3,б), причем она тем меньше, чем больше грузоподъемность автосамосвалов.



Примечания: «3 места р-ки» – при наличии в ДПУ 3-х мест для одновременной разгрузки автосамосвалов в приемный бункер; «50 АС/ч» – при интенсивности разгрузки 50 самосвалов в час; «4 АС каждые 3,8 мин» – неравномерность прибытия автосамосвалов определяется одновременным групповым их прибытием по 4 ед. с интервалом 3,8 мин.

Рис. 2. Изменение во времени количества горной массы в приемном бункере

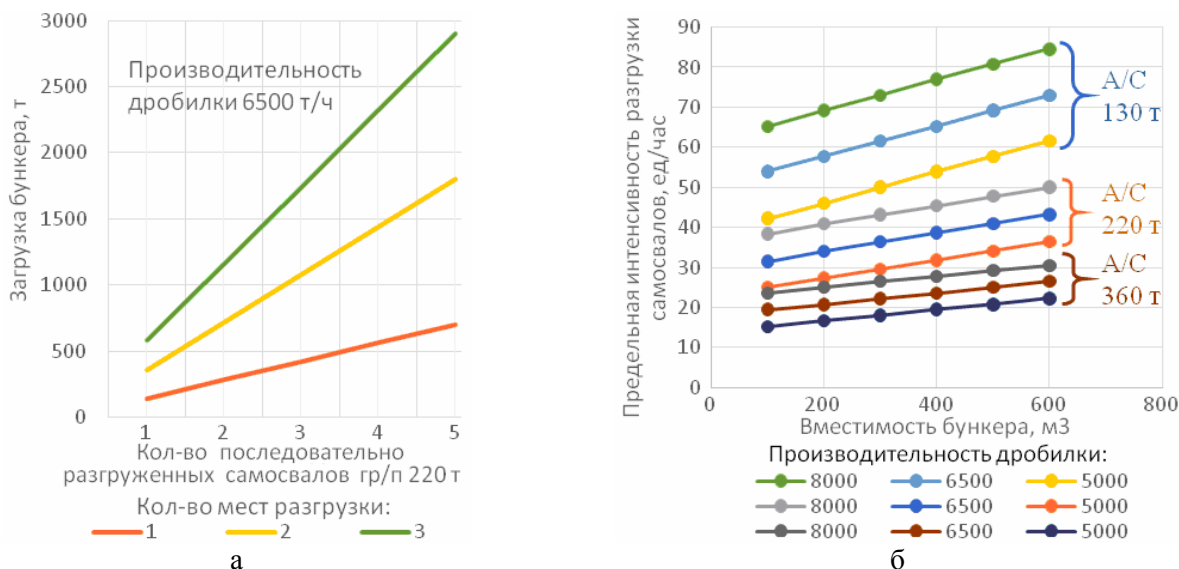


Рис. 3. Влияние параметров входящего и исходящего потоков руды на динамику заполнения приемного бункера ДПУ при насыпной плотности руды $2,5 \text{ т/м}^3$ (продолжительности разгрузки 1-го самосвала 1,5 мин., «А/с 130 т» – автосамосвалы грузоподъемностью 130 т):

а) динамика заполнения бункера при разном количестве мест разгрузки;

б) предельная интенсивность разгрузки автосамосвалов

Влияние интенсивности и неравномерности загрузки на необходимую вместимость приемного бункера хорошо иллюстрируется трехмерным графиком, приведенным на рисунке 4. В данном случае превышение интенсивности загрузки бункера самосвалами над производительностью дробилки отражает неравномерность прибытия автосамосвалов с временным превышением, а продолжительность непрерывной загрузки отражает предельную продолжительность такого периода, при которой бункер с заданной вместимостью обеспечивает прием всего поставляемого объема горной массы (руды). Видно, что рост интенсивности загрузки вызывает резкое падение допустимую продолжительность непрерывной разгрузки, что на практике требует:

- либо периодического ожидания самосвалами опорожнения бункера при эксплуатации ДПУ;
- либо увеличения вместимости приемного бункера при проектировании ДПУ.

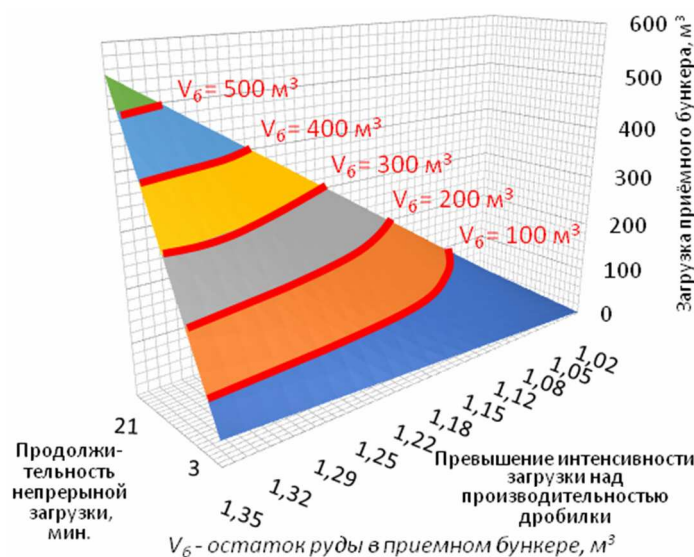
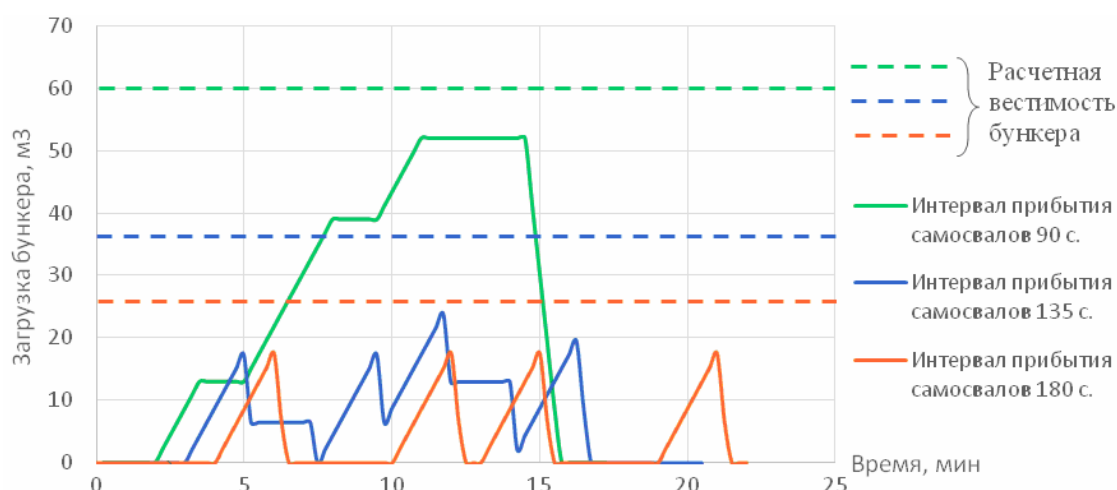


Рис. 4. Зависимость скорости заполнения бункера относительно интенсивности прибытия самосвалов грузоподъемностью 220 т, производительности дробилки 6500 т/ч и насыпной плотности руды 2,5 т/м³

Важным элементом дробильно-перегрузочной установки является разгрузочный бункер (называемый в литературе также промежуточным или накопительным). Он обеспечивает сглаживание колебаний производительности дробилки и пластинчатых питателей, а также (редко) колебаний производительности конвейера, если предусматривается регулирование его производительности в зависимости от технологических задач. Колебания производительности дробилки связаны как с различающейся крупностью поступающей на дробление руды, так и изменением в определенном диапазоне ее физико-механических свойств. Такая картина имеет место достаточно часто в связи с неоднородностью свойств руды в пределах разрабатываемого месторождения.

Выполнено математическое моделирование для разных по интенсивности прибытия автосамосвалов и дробимости руды вариантов (рис. 5). Рассматривалась переработка на ДПУ привозимой руды из 7 автосамосвалов грузоподъемностью 220 т. На момент начала моделирования приемный и разгрузочный бункеры были пусты. Интенсивность и неравномерность прибытия автосамосвалов варьировались за счет различного интервала между прибытием, а разница в дробимости руды учитывалась коэффициентом 1,2 к номинальной производительности дробилки (6500 т/ч) для руды из некоторых автосамосвалов. Учитывался приток руды в бункер от дробилки и отток руды из бункера за счет выпуска руды пластинчатыми питателями с производительностью 6500 т/ч. Вместимость разгрузочного бункера определялась как максимум загрузки бункера в процессе оборота руды в нем с учетом запаса на переполнение в 20%. Видно, что колебания фактической производительности дробилки при изменении крупности и физико-механических свойств поступающей горной породы ведут к заметному росту необходимой вместимости разгрузочного (промежуточного) бункера ДПУ. Очевидно, что рост требуемой вместимости бункера ведет как к повышению материалоемкости ДПУ, так и к ухудшению ее технологической применимости из-за роста высоты встраивания ДПУ. Также отрицательно влияет на требуемую вместимость разгрузочного бункера неравномерность прибытия автосамосвалов. В целом вышеуказанное увеличение требуемой вместимости бункера составляет 35-120%.

Таким образом, разработанная модель позволяет за счет моделирования во времени движения горной массы по элементам ДПУ позволяет определить с одной стороны работоспособные параметры ДПУ, учитывающие реальные потоки материала и неочевидные процессы и закономерности, а с другой – оптимизировать эти параметры под конкретные условия, нивелируя необоснованно принимаемые запасы по мощности и вместимости (которые в конечном итоге определяют материалоемкость и стоимость).



Интервал разгрузки – продолжительность времени между прибытием автосамосвалов
 Рис. 5. Динамика заполнения разгрузочного бункера с учетом колебаний производительности дробилки

Опытным путем в процессе определения параметров ДПУ с указанной выше структурой установлено, что применимость рассматриваемой имитационной модели для обоснования укрупненных технологических и компоновочных параметров ДПУ определяется нахождением таких их значений, которые близки к оптимальному с отклонением: предпочтительно – не более 5%, в ряде случаев – не более 10% (в случаях, когда затруднительно достичь 5%-ного приближения, например, когда для более точного определения требуется подробная конструктивная проработка ДПУ, которая не целесообразна на этапе эскизного проекта). Способ оптимизации – сравнением вариантов по набору показателей функционирования ДПУ за рассматриваемый промежуток времени (8-12 часов), при этом варианты должны отличаться конструктивными параметрами элементов ДПУ (производительность отдельных элементов, вместимость бункеров и т.п.). Критерий окончания циклической оптимизации: разница не более 1-3% в значениях искомого параметра при последовательном итерационном пересчете параметров ДПУ (очевидно, что они взаимосвязаны, и изменение одного влияет на значение другого либо на значение эксплуатационных показателей, обусловленных их совместным влиянием).

Результаты оценки применимости имитационной модели для обоснования укрупненных технологических и компоновочных параметров ДПУ приведены в таблице 1.

Табл. 1. Оценка применимости имитационной модели для обоснования укрупненных технологических и компоновочных параметров ДПУ

Параметр ДПУ	Влияющие факторы	Влияющие параметры ДПУ	Зависимые параметры	Оптимизация параметра с применения ИМ	ДС*	Эффект от применения имитационного моделирования
Кол-во мест разгрузки самосвалов	Грузоподъемность и габариты самосвала. Схема верхней площадки дробильно-перезрузочного пункта	Схема размещения дробилки. Вместимость приемного бункера. Производ. ДПУ (дробилки)	Схема размещения дробилки. Вместимость приемного бункера	до 50%	1%	Позволяет уменьшить кол-во мест разгрузки по предельной приемной способности приемного бункера с учетом производительности дробилки (как правило при первичном кол-ве 3 места до 2 мест, реже с 2-х мест до 1-го места)
Вместимость приемного бункера	Грузоподъемность и габариты самосвала. Схема верхней площадки дробильно-перезрузочного пункта.	Схема размещения дробилки. Производительность ДПУ (дробилки)	Схема размещения дробилки. Количество и расположение мест разгрузки самосвалов	10-20%	2%	1) Снижение геометрического объема на 10-20% (конечный эффект по металлоемкости) при сохранении приемной способности ДПУ. 2) То же до 40-60% при оптимизации всех параметров ДПУ с некоторым снижением приемной способности с целью большего снижения металлоемкости ДПУ

Табл. 1. Продолжение

Параметр ДПУ	Влияющие факторы	Влияющие параметры ДПУ	Зависимые параметры	Оптимизация параметра с применения ИМ	ДС*	Эффект от применения имитационного моделирования
Номинальная производ. дробилки	Физико-механические свойства пород, гранулометр. состав, способ загрузки дробилки	Вместимость и геометрия приемного бункера, количество мест разгрузки автосамосвалов и их местоположение	Вместимость приемного бункера. Вместимость разгрузочного бункера	5-7%	1%	Номинальная производительность достаточно надежно определяется расчетом по годовому объему переработки. Моделирование полезно для оценки рисков при отклонении производительности при колебании физ.-мех. свойств породы
Вместимость разгрузочного бункера	Неравномерность производ. дробилки в зависимости от свойств породы	Производ. дробилки. Производ. пластинчатых питателей. Вместимость приемного бункера	Диапазон регулирования производ. пластинчатых питателей	20-50%	2%	1) Снижение геометрического объема на 10-35% (конечный эффект по металлоемкости) при сохранении приемной способности ДПУ. 2) Позволяет найти приемлемое соотношение технологических параметров ДПУ при необходимости максимально уменьшить ее высоту и/или металлоемкость
Производ. и количество пластинчатых питателей		Производ. конвейера	Вместимость разгрузочного бункера	Производ. – 5-20%. Кол-во – до 2 раз	2%	Позволяет учесть компенсирующую способность бункера. Выполняется совместно с расчетом основных параметров питателя для проверки их достижимых значений

* Достигнутая сходимость – разница значений параметра на смежных итерационных циклах при итерационном определении параметра.
ИМ – имитационное моделирование.

Дальнейшим развитием разрабатываемой модели является учет факторов динамики входящего потока горной массы [13], а также надежности ДПУ, влияющих на эффективное время работы и соответственно производительность ДПУ во времени.

Выводы

1. Разработана имитационная модель дробильно-перегрузочной установки, включающей в состав приемный и разгрузочный бункеры, дробилку, пластинчатый(ые) питатель(и) и передаточный конвейер, обеспечивающая воспроизведение движения потока горной массы по элементам ДПУ.

2. Рассмотренное имитационное моделирование обеспечивает более точное определение параметров дробильно-перегрузочной установки за счет учета динамики процессов, изменяемых во времени с учетом алгоритма работы ДПУ конкретной структуры. Таким образом, показана возможность применения имитационной модели простой одноуровневой структуры для решения задач по обоснованию рациональных технологических и компоновочных параметров ДПУ в увязке с внешними факторами, определяемыми работы сборочного транспорта и дробильно-конвейерного комплекса, что соответствует задачам эскизного технического проектирования и общего горно-технологического проектирования.

3. Эксперименты с разработанной моделью ДПУ показали, что учет реальных потоков материала и связанных с ними неочевидных закономерности при ее применении позволяет оптимизировать конструктивные параметры ДПУ на существенную величину. Например: вместимость приемного бункера на 10-20%, разгрузочного бункера на 10-35% производительность дробилки 5-7%.

Финансирование

Исследования выполнены в рамках 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. Глебов А.В., Берсенов 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.
2. Журавлев А.Г., Семенкин 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: 10.3686/1609-9192-2022-1S-53-62.
3. Andre S. Yamashita, Alex Thivierge, Thiago A.M. Euzébio. A review of modeling and control strategies for cone crushers in the mineral processing and quarrying industries // Minerals Engineering. 2021, vol. 170, p. 107036. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107036.
4. Zeren Chen, Guoqiang Wang, Duomei Xue, Qiushi Bi. Simulation and optimization of gyratory crusher performance based on the discrete element method // Powder Technology. 2020, vol. 376, pp. 93-103. DOI 10.1016/j.powtec.2020.07.034.
5. Липатов А.Г., Фурин В.О., Холодков А.А., Журавлёв А.Г. Инновационные решения в повышении эффективности крупного дробления железорудных горно-обогатительных комбинатах // Горная промышленность. – 2023. – №3. – С. 93-100. – DOI: 10.30686/1609-9192-2023-3-93-100.
6. Ostroukh A., Surkova N. Automated process control system of mobile crushing and screening plant // Journal of Applied Engineering Science. 2018, vol. 16, pp. 343-348. DOI: 10.5937/JAES16-15586.
7. Shirong Zhang, Wei Mao. Optimal operation of coal conveying systems assembled with crushing using model predictive control methodology // Applied Energy. 2017, vol. 198, pp. 65-76. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.04.037.
8. Ehsan Purhamadani, Raheb Bagherpour, Hossein Tudeshki. Energy consumption in open-pit mining operations relying on reduced energy consumption for haulage using in-pit crusher systems // Journal of Cleaner Production. 2021, vol. 291, p. 125228. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125228.
9. Kanishk Bhadani. Optimization Capabilities for Crushing Plants: Thesis for the degree of Doctor of Philosophy. – Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2022. – 61 p.
10. Fei Zeng, Cheng Yan, Qing Wu. Dynamic behavior of a conveyor belt considering non-uniform bulk material distribution for speed control // Applied Sciences. 2020, vol. 10(13), p. 4436. DOI: 10.3390/app10134436.
11. Груздев А.В., Осадчий А.М., Фурин В.О. Стационарные и полустационарные дробильно-перегрузочные установки Уралмашзавода // Горный журнал – 2012. – №11. – С. 70-72.
12. 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.
13. 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.

References

1. Glebov A.V., Bersenev V.A., Karmaev G.D., Semenkin A.V. New approaches and solutions for the use of cyclic flow technology in quarries // Mining Journal. 2017, no. 6, pp. 49-52.
2. Zhuravlev A.G., Semenkin A.V., Cherepanov V.A., Glebov I.A., Chendyrev M.A. Tasks of developing promising cyclic flow technologies for deep quarries // Mining Industry. 2022, no. 1S, pp. 53-62. DOI: 10.3686/1609-9192-2022-1S-53-62.
3. Andre S. Yamashita, Alex Thivierge, Thiago A.M. Euzébio. A review of modeling and control strategies for cone crushers in the mineral processing and quarrying industries // Minerals Engineering. 2021, vol. 170, p. 107036. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107036.
4. Zeren Chen, Guoqiang Wang, Duomei Xue, Qiushi Bi. Simulation and optimization of gyratory crusher performance based on the discrete element method // Powder Technology. 2020, vol. 376, pp. 93-103. DOI 10.1016/j.powtec.2020.07.034.
5. Ostroukh A., Surkova N. Automated process control system of mobile crushing and screening plant // Journal of Applied Engineering Science. 2018, vol. 16, pp. 343-348. DOI: 10.5937/JAES16-15586.
6. Shirong Zhang, Wei Mao. Optimal operation of coal conveying systems assembled with crushing using model predictive control methodology // Applied Energy. 2017, vol. 198, pp. 65-76. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.04.037.
7. Ehsan Purhamadani, Raheb Bagherpour, Hossein Tudeshki. Energy consumption in open-pit mining operations relying on reduced energy consumption for haulage using in-pit crusher systems // Journal of Cleaner Production. 2021, vol. 291, p. 125228. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125228.
8. Kanishk Bhadani. Optimization Capabilities for Crushing Plants: Thesis for the degree of Doctor of Philosophy. – Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2022. – 61 p.
9. Fei Zeng, Cheng Yan, Qing Wu. Dynamic behavior of a conveyor belt considering non-uniform bulk material distribution for speed control // Applied Sciences. 2020, vol. 10(13), p. 4436. DOI: 10.3390/app10134436.

10. Gruzdev A.V., Osadchy A.M., Furin V.O. Stationary and semi-stationary crushing and reloading plants of Uralmashzavod // Mining Journal – 2012. – No.11. – pp.70-72.
11. Chendyrev M.A., Zhuravlev A.G. Rationalization of geometric parameters of receiving bunkers of KCD crushers in automobile transport // Mining information and analytical bulletin. 2022, no. 5-1, pp. 158-170. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_158.
12. Zhuravlev A.G., Cherepanov V.A. Reserves for increasing the productivity of the subsystem "quarry transport – crushing conversion", taking into account the coefficients of use of crushing equipment // Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering. 2020, vol. 331, no. 11, pp. 195-207. DOI: 10.18799/24131830/2020/11/2902.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Журавлев Артем Геннадиевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией транспортных систем карьеров и геотехники	Zhuravlev Artem Gennadievich – candidate of technical sciences, assistant professor, chief of laboratory of quarry transport systems and geotechnics
Кардашин Егор Дмитриевич – младший научный сотрудник лаборатории транспортных систем карьеров и геотехники kardashin@igduran.ru	Kardashin Egor Dmitrievich – junior research fellow of laboratory of quarry transport systems and geotechnics

Получена 21.12.2023