

В.К. СЛОБОДЯНЮК, канд. техн. наук,

О.Н ГУРЕНКО, А.Л. РОМАШКОВ,

Р.В. СЛОБОДЯНЮК

(Украина, Кривой Рог, Криворожский технический университет)

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДРОБИЛЬНО-ПЕРЕГРУЗОЧНОГО ПУНКТА

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Рост затрат на карьерный транспорт и увеличение себестоимости руды по мере понижения горных работ на фоне постоянно существующих рисков снижения объемов производства из-за кризисных явлений в мировой экономике и конкуренции горнодобывающих компаний обостряют и усиливают необходимость решения всегда существующей дилеммы: снизить себестоимость за счет эксплуатационного коэффициента вскрыши путем оптимизации конечного контура карьера, режима горных работ и уменьшения срока существования предприятия или начать реконструкцию горно-транспортной системы карьера. Реконструкция горно-транспортной системы глубокого железорудного карьера – это почти всегда перенос концентрационного горизонта циклично-поточной технологии с целью максимального уменьшения транспортной работы карьерных автосамосвалов. Эффективность новой транспортной системы во многом будет зависеть от технологических и конструктивных параметров дробильно-перегрузочных пунктов (объема бункера, производительности дробилки, геометрических параметров комплекса, количества мест разгрузки технологического автотранспорта, срока существования дробильно-перегрузочного пункта, способности комплекса ЦПТ к дальнейшей адаптации к изменяющимся горно-геологическим условиям). Анализ последних проектов строительства и реконструкции комплексов ЦПТ показывает наличие определенного разрыва в подходах теоретиков и практиков к проблеме рационального развития комплексов ЦПТ. Практика остановилась на решениях, обоснованных и апробированных в 70-80 годы [1, 2], отличительным элементом которых является строительство в рабочей зоне карьера капитального корпуса крупного дробления, оборудованного дробилкой ККД-1500. В то же время, теория всегда доказывала, что важнейшим свойством транспортной системы глубокого карьера должна быть высокая адаптируемость [3-5], то есть способность системы снижать и стабилизировать затраты на карьерный транспорт за счет возобновления условий для снижения дальности откатки сборочным транспортом. Степень адаптируемости комплекса циклично-поточной технологии к постоянно изменяющимся горно-геологическим условиям в основном зависит от конструктивных особенностей дробильно-перегрузочного пункта, его пригодности к переносу на новое место с минимальными затратами. При этом в теории в недостаточной степени обоснована методология выбора рациональной емкости приемного бункера дробильно-перегрузочного пункта.

Анализ исследований и публикаций. В работах многих исследователей [6-9] решаются вопросы совершенствования циклично-поточной технологии, отмечается влияние на технико-экономические показатели карьерного транспорта конструктивных особенностей дробильно-перегрузочных пунктов (ДПП). Нормы технологического проектирования предприятий с открытым способом разработки [10] не содержат обобщения накопленного опыта и рекомендаций по выбору и обоснованию параметров ДПП. В работе [6] отмечается, что аналитический расчет рациональных параметров ДПП затруднен, обоснование параметров комплекса ЦПТ необходимо выполнять с использованием теории массового обслуживания, формулируются основные принципы взаимодействия циклического и поточного звеньев комбинированного транспорта, но результаты исследования по установлению рациональных параметров приемного бункера ДПП с использованием теории массового обслуживания не приведены. В работе [7] с применением методов имитационного моделирования оптимизируется эксплуатационная производительность существующего комплекса ЦПТ в угольном карьере "Pljevlja" (Югославия). Одним из предположений исследователей было существование зависимости производительности комплекса ЦПТ от объема приемного бункера. Однако в ходе исследования это предположение не было подтверждено. Исследования проводились для бункеров емкостью 150 м³ (существующий бункер), 200 и 250 м³. Только при увеличении объема бункера до 250 м³ наблюдался незначительный рост суточной производительности системы (с 33,387 до 34,362 тыс.м³). То есть увеличение объема бункера на 100 м³ (67%) привело к росту производительности на 3%. Другие аспекты системы "бункер-дробилка" не исследовались. Таким образом, задача обоснования рациональных параметров ДПП комплексов ЦПТ железорудных карьеров является своевременной и актуальной.

Постановка задачи. Целью работы является разработка методики имитационного моделирования экскаваторно-автомобильного комплекса и дробильно-перегрузочного пункта циклично-поточной технологии для решения задач обоснования рациональных параметров ДПП в конкретных горно-технических условиях.

При выполнении работы решали следующие задачи:

- разработка методики моделирования работы дробильно-перегрузочного пункта и экскаваторно-автомобильного комплекса;
- разработка и программная реализация компьютерной имитационной модели работы дробильно-перегрузочного пункта и карьерных автосамосвалов;
- выполнение исследований с использованием разработанной имитационной модели;
- анализ результатов моделирования и определение рациональных параметров дробильно-перегрузочного пункта.

Изложение материала и результаты. Ключевым элементом, обеспечивающим передачу потока горной массы от циклического звена (автотранспорт) на

Усреднения та транспортування

поточное звено (подъемный конвейер), является дробильно-перегрузочный пункт. Снижение жесткой взаимосвязи двух смежных звеньев циклично-поточной технологии обеспечивается системой емкостей, аккумулирующих как недробленую горную массу перед механическим дроблением, так и горную массу, прошедшую механическое дробление. Конструктивные параметры дробильно-перегрузочного пункта во многом определяют технико-экономические показатели комбинированного карьерного транспорта. С одной стороны, выбор перегрузочного пункта с недостаточным объемом бункера и малым количеством мест разгрузки автосамосвалов приводит к росту затрат на автомобильный транспорт. С другой стороны, увеличение количества мест разгрузки автосамосвалов и объема бункера приводит к увеличению затрат на дробильно-перегрузочный комплекс, но в то же время создает благоприятные условия для эксплуатации автосамосвалов. Задачу оптимизации параметров дробильно-перегрузочного пункта невозможно решить, опираясь только на инженерный расчет технологического транспорта. Исследование совместной работы карьерного автотранспорта и дробильно-перегрузочного пункта методами имитационного моделирования для различных горно-технических условий, возможных в период эксплуатации рассматриваемого перегрузочного пункта, позволяет повысить обоснованность и достоверность проектных решений по развитию горно-транспортной системы глубоких карьеров.

С целью исследования влияния объема бункера перед дробилкой крупного дробления на работу сборочного автотранспорта была построена следующая имитационная модель (рис. 1). Имеется бункер емкостью V_B (т) и дробилка крупного дробления с максимальной производительностью Q (т/час). Директивно задана требуемая сменная производительность комплекса ЦПТ – $Q_{ЦПТ}$ (т/смена). Одновременно в бункер дробилки может разгружаться k автосамосвалов с фактическим весом горной массы в кузове V_A (т). Для заданного расположения экскаваторов ($i=1\dots n_{Э}$) в рабочей зоне известны расстояния r_i (м) транспортирования горной массы от каждого из них до дробильно-перегрузочного пункта. Теоретически определены время рейса t_i и количество автосамосвалов n_{Ai} , необходимых для обслуживания каждого из $n_{Э}$ экскаваторов, участвующих в формировании элементарных грузопотоков от экскаваторов к дробильно-перегрузочному пункту. На основе обработки статистических данных карьера-аналога установлена функция распределения времени рейса автосамосвалов. С интервалом времени t_{ij} , прошедшим с момента последней разгрузки, j -й автосамосвал вновь прибывает от i -го экскаватора на дробильно-перегрузочный пункт и становится в очередь на разгрузку. При подходе его очереди на разгрузку и в случае наличия свободного места в бункере автосамосвал разгружается. В противном случае он ожидает, пока дробилка не переработает из бункера необходимый объем горной массы, и свободная емкость бункера не станет достаточной для его разгрузки. После этого j -й автосамосвал вновь направляется в забой i -го экскаватора. В процессе моделирования рассматривалась совместная работа $\sum_{i=1}^{n_{Э}} n_{Ai}$ самосвалов по обслуживанию дробильно-перегрузочного пункта.

Усреднения та транспортування

В общем случае, дробильно-перегрузочный пункт можно характеризовать двумя параметрами: емкостью приемного бункера и производительностью дробилки. Практический интерес представляет установление долевого влияния на производительность дробильно-перегрузочного пункта емкости бункера и производительности дробилки. При моделировании объем бункера изменялся от V_A до $10 V_A$.

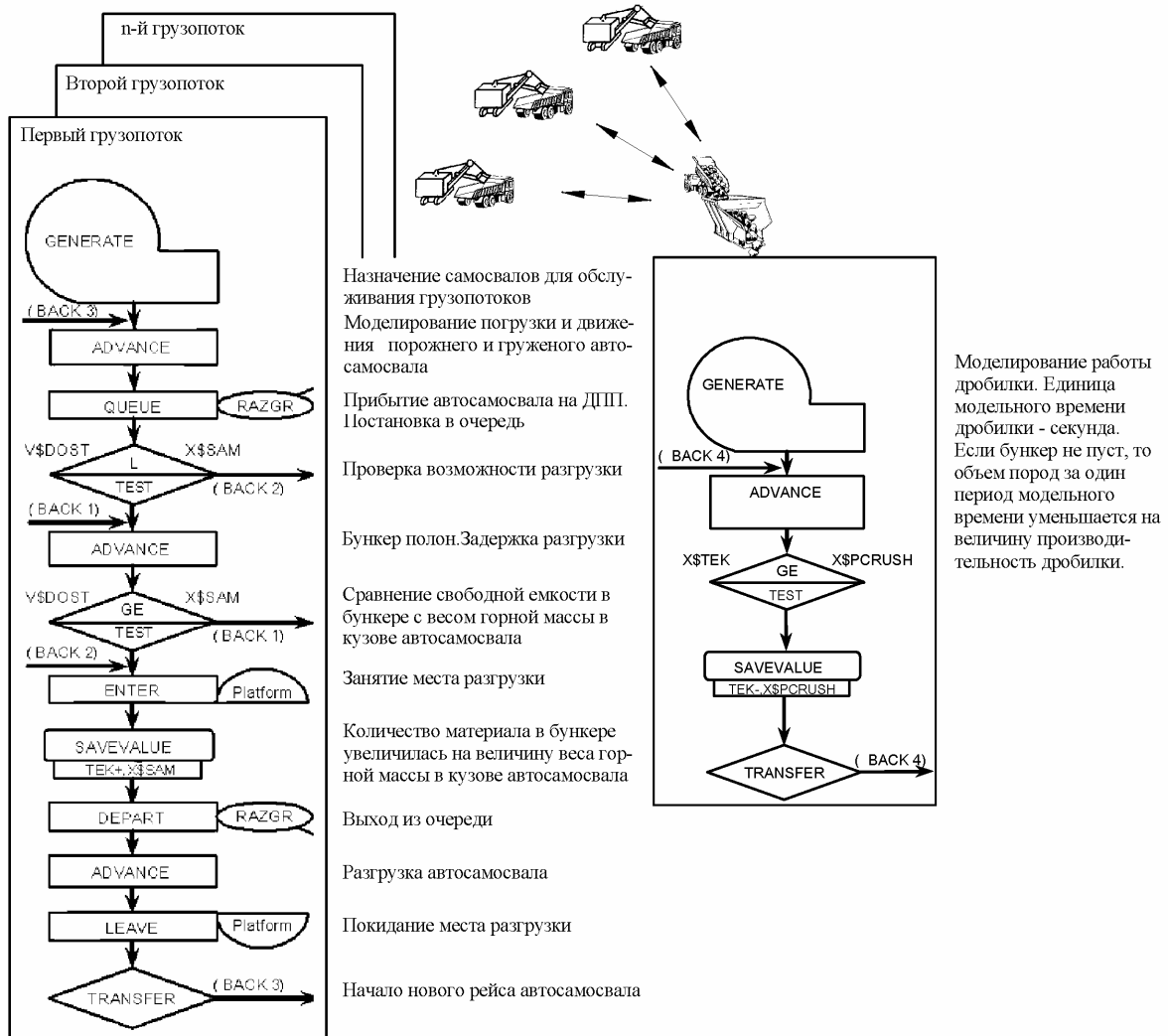


Рис. 1. Принципиальная схема имитационной модели работы ДПП

С использованием разработанной в системе GPSS имитационной модели (рис. 1) работы карьерного автотранспорта и дробильно-перегрузочного пункта ЦПТ выполнены исследования по определению рациональных параметров дробильно-перегрузочного пункта на основе следующей технологической ситуации: два экскаваторных забоя расположены от ДПП на расстоянии 2,3 км и 3,8 км, соответственно. Было рассмотрено два варианта с различной директивно заданной, теоретической производительностью автотранспортного комплекса циклично-поточной технологии: 19,4 тыс.т/смену (случай 1) и 40,1 тыс.т/смену

Усреднения та транспортування

(случай 2). Для каждого из вариантов был выполнен в соответствии с общепринятыми в горной промышленности методиками [10] расчет потребного количества автосамосвалов, обеспечивающих выполнение заданной производительности. В то же время, в каждом из вариантов рассматривались подварианты оснащения дробильно-перегрузочного пункта дробилками различной производительности. Диапазон изменения производительностей дробилок в подвариантах варьировал от 500 до 5000 т/ч. Нижний предел производительности дробильной установки не может обеспечить целевую производительность комплекса ЦПТ (несмотря на наличие потребного количества автосамосвалов), в то же время верхний предел диапазона рассмотренных производительностей дробилок превышает минимально-необходимое значение, обеспечивающее в целом плановую работу автомобильно-конвейерного транспорта. Кроме этого, в рассмотренных вариантах комплектации дробильно-перегрузочного пункта дробилками различной производительности выполнялась оценка влияния на работу сборочного автотранспорта и дробильно-перегрузочного пункта объема приемного бункера дробилки (полезный объем бункера изменялся в диапазоне от 130 до 1200 т). Результаты имитационного моделирования приведены в таблице 1 (случай 1 – теоретическая производительность комплекса ЦПТ 19,4 тыс.т/смену (1,6 тыс.т/час) , случай 2 – 40,1 тыс.т/смену (3,3 тыс.т/час)). В выполненном исследовании распределение времени движения и погрузки автосамосвалов изменялось по равномерному закону.

Рассмотрим работу дробильно-перегрузочного пункта со сменной теоретической производительностью автотранспортного комплекса 19,4 тыс.т/смену (случай 1). Горная масса доставляется автосамосвалами грузоподъемностью 120 т из двух забоев, расположенных на расстоянии 2,3 км и 3,8 км. Средняя скорость движения автосамосвала 18 км/час. Погрузка автосамосвалов в забоях осуществляется экскаваторами ЭКГ-8И. Сменное задание на первый забой составляет – 8,2 тыс. т/смену; на второй забой – 11,2 тыс. т/смену. Для обеспечения заданной производительности дробильно-перегрузочного пункта первый забой необходимо обеспечить двумя автосамосвалами, а второй – четырьмя автосамосвалами. При этом техническая производительность одного автосамосвала в первом забое составит – 4,1 тыс. т/смену, а во втором – 2,8 тыс. т/смену.

Анализ результатов имитационного моделирования (табл. 1, рис. 1, 2) показывает, что определяющее влияние на эксплуатационную производительность ДПП оказывает производительность дробилки. При производительности дробилки, меньшей, чем 62% от целевой производительности комплекса ЦПТ, величина полезного объема бункера не оказывает влияния на эксплуатационную производительность комплекса ЦПТ. В то же время, при производительности дробилки 1500 т/ч (92% от теоретической производительности комплекса ЦПТ) полезный объем бункера имеет значительное влияние. Так, при полезном объеме бункера 130т эксплуатационная производительность комплекса составляет 82,3% от теоретической, при 240т – 86,9%, а при 360 т – 87,6%. Дальнейшее увеличение полезной емкости бункера не сопровождается существенным увеличением эксплуатационной производительности комплекса ЦПТ. Макси-

Усреднення та транспортування

мальний ефект от емкости бункера наблюдался при производительности дробилки 2000 т/час (124% от теоретической производительности комплекса ЦПТ). В этом случае бункер 130 т обеспечивает производительность на уровне 89,3% от теоретической производительности, бункеры 240-360 т – 93%, 480-1200 т – 95%). По мере дальнейшего увеличения производительности дробилки от 2500 т/час до 5000 т/час (от 155 до 309% от теоретической производительности комплекса) влияние полезного объема бункера на эксплуатационную производительность комплекса снижается от 4% (2500 т/час) до 1% (4500-5000 т/час).

Таблица 1

Результаты имитационного моделирования ДПП

Полезный объем бункера, т	Производительность дробилки, т/ч	Производительность ДПП, тыс.т/смена		Средняя длина очереди, шт		Среднее время нахождения в очереди, мин	
		Случай 1	Случай 2	Случай 1	Случай 2	Случай 1	Случай 2
1	2	3	4	5	6	7	8
130	500	5,734	5,734	3,945	9,310	54,617	115,578
	1000	11,417	11,468	2,078	7,690	15,270	52,732
	1500	15,971	17,125	0,664	6,014	3,568	28,678
	2000	17,331	22,713	0,284	4,397	1,412	16,237
	2500	17,660	28,261	0,190	2,77	0,919	8,310
	3000	17,984	33,281	0,153	1,362	0,737	3,528
	3500	18,220	35,651	0,104	0,677	0,492	1,635
	4000	18,050	35,909	0,094	0,558	0,446	1,340
	4500	18,360	36,925	0,054	0,356	0,254	0,829
	5000	18,251	36,756	0,053	0,274	0,247	0,639
240	500	5,734	5,734	3,893	9,317	52,880	111,801
	1000	11,417	11,468	2,035	7,732	14,801	53,016
	1500	16,856	17,125	0,452	5,868	2,293	28,169
	2000	18,079	22,713	0,127	4,415	0,599	16,302
	2500	18,120	28,261	0,034	2,754	0,162	8,261
	3000	18,239	33,811	0,012	1,144	0,055	2,899
	3500	18,240	36,285	0,015	0,380	0,070	0,900
	4000	18,479	37,051	0,006	0,181	0,027	0,420
	4500	18,513	37,351	0,008	0,122	0,036	0,280
	5000	18,360	37,596	0,005	0,071	0,023	0,162
360	500	5,734	5,734	3,818	9,280	50,903	111,361
	1000	11,417	11,468	2,063	7,513	14,704	51,034
	1500	16,988	17,125	0,336	5,899	1,680	28,127
	2000	18,031	22,713	0,013	4,259	0,064	15,566
	2500	18,348	28,261	0,004	2,697	0,018	8,057
	3000	18,331	33,850	0,000	1,066	0,001	2,692
	3500	18,323	37,391	0,004	0,102	0,020	0,235
	4000	18,487	37,661	0,001	0,100	0,007	0,229
	4500	18,600	37,960	0,002	0,026	0,007	0,058
	5000	18,442	37,560	0,000	0,012	0,0003	0,028

Усереднення та транспортування

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8
480	500	5,734	5,734	3,802	9,182	49,772	108,374
	1000	11,417	11,468	1,947	7,581	13,883	50,542
	1500	17,005	17,125	0,289	5,957	1,426	28,033
	2000	18,562	22,713	0,001	4,280	0,003	15,564
	2500	18,360	28,261	0,001	2,643	0,003	7,863
	3000	18,331	33,850	0,000	1,036	0,0003	2,607
	3500	18,720	37,803	0,001	0,040	0,004	0,092
	4000	18,487	37,905	0,001	0,016	0,007	0,037
	4500	18,600	37,903	0,002	0,021	0,007	0,047
	5000	18,442	37,560	0,000	0,011	0,0003	0,025
600	500	5,734	5,734	3,652	9,243	46,949	105,629
	1000	11,417	11,468	1,971	7,544	13,912	50,290
	1500	17,005	17,125	0,248	5,768	1,213	27,143
	2000	18,562	22,713	0,001	4,181	0,003	15,279
	2500	18,360	28,261	0,001	2,624	0,003	7,775
	3000	18,331	33,850	0,000	1,007	0,0003	2,508
	3500	18,720	37,597	0,001	0,034	0,004	0,077
	4000	18,487	38,075	0,001	0,011	0,007	0,025
	4500	18,600	37,920	0,002	0,015	0,007	0,035
	5000	18,442	37,560	0,000	0,011	0,0003	0,025
1200	500	5,734	5,734	3,524	9,132	41,598	96,695
	1000	11,417	11,468	1,753	7,356	11,793	46,873
	1500	17,005	17,125	0,078	5,587	0,373	25,299
	2000	18,562	22,713	0,001	4,039	0,003	14,326
	2500	18,360	28,261	0,001	2,433	0,003	7,092
	3000	18,331	33,850	0,000	0,847	0,0003	2,089
	3500	18,720	37,606	0,001	0,015	0,004	0,034
	4000	18,487	38,075	0,001	0,011	0,007	0,024
	4500	18,600	37,920	0,002	0,015	0,007	0,035
	5000	18,442	37,560	0,000	0,011	0,0003	0,025

Таким образом, результаты имитационного моделирования работы комплекса ЦПТ с теоретической производительностью 19,4 тыс.т/смену позволяют констатировать, что критическим (полезным) объемом бункера является 240...360 т (грузоподъемность не менее двух автосамосвалов). При насыпной плотности горной массы 2,0 т/м³ это соответствует объему 120...180 м³. В случае существования ограничения по возможной производительности дробилки, увеличение объема бункера не приведет к существенному росту производительности комплекса ЦПТ, но существенно усложнит и удорожит бункер и питатель дробилки.

Рассмотрим второй случай (директивная производительность циклического звена ЦПТ 40,1 тыс.т/смену). Горная масса доставляется автосамосвалами грузоподъемностью 120 т из двух забоев, расположенных на расстоянии 2,3 км и 3,8 км. Сменное задание на первый забой составляет – 20,6 тыс. т/смену; на второй забой – 19,5 тыс.т/смену. Для обеспечения заданной производительности первый забой необходимо обеспечить пятью автосамосвалами, а второй – семью автосамосвалами.

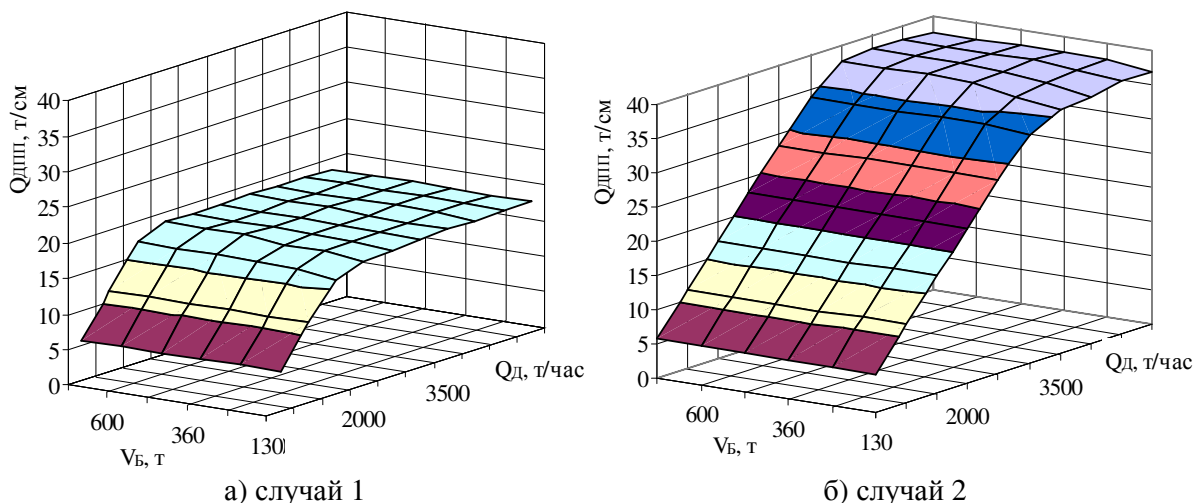
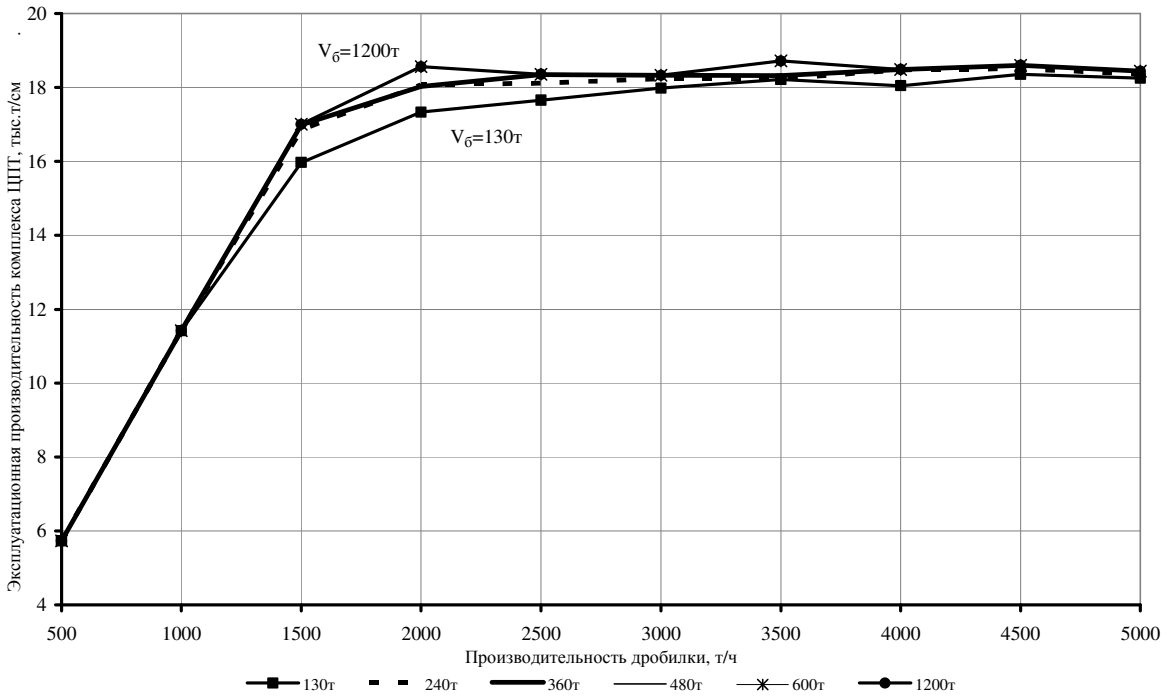


Рис. 2. Эксплуатационная производительность дробильно-перегрузочного комплекса $Q_{ДПП}$ (тыс.т/смена) как функция двух переменных: производительности дробилки $Q_{Д}$ (тыс.т/час) и полезной емкости бункера $V_{Б}$ (т)

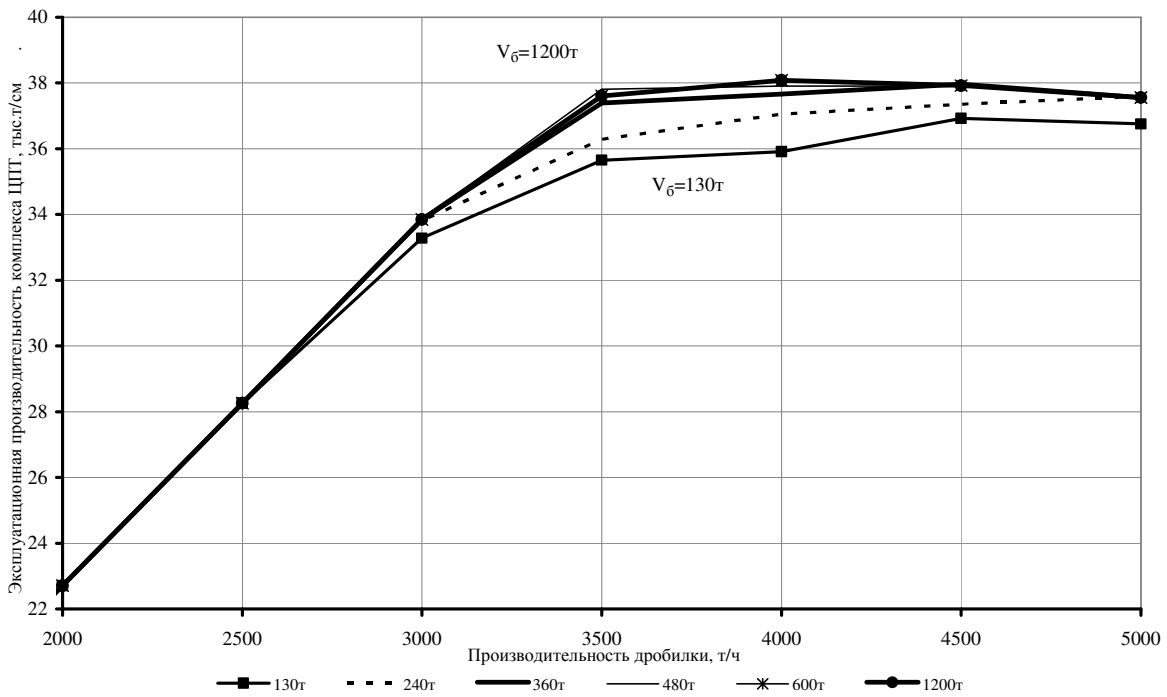
При способности автомобильного транспорта обеспечить более высокую производительность, чем дробильная установка, объем бункера не оказывает никакого влияния на производительность дробильно-перегрузочного пункта. Она лимитирована максимальной производительностью установленной дробилки (рис. 1, 2). Так, при способности автомобильного транспорта вывезти до 40 тыс.т/смену и производительности дробилки до 2500 т/час (75% от теоретической производительности автотранспортного комплекса) объем бункера не оказывает влияния на производительность. При производительности дробилки 3000 т/час наблюдается незначительное различие в производительностях дробильно-перегрузочных пунктов, оснащенных бункерами 130 и 1200 т. Максимальное влияние объема бункера на производительность дробильно-перегрузочного пункта наблюдается в диапазоне производительностей дробилок 3500...4000 т/час. При дальнейшем увеличении производительности дробилки влияние объема бункера на производительность ДПП снижается и можно предположить, что при производительности 6000 т/час и более будет наблюдаться эффект, аналогичный диапазону производительностей до 2500 т/ч – объем бункера не влияет на производительность дробильно-перегрузочного пункта. Дальнейшее увеличение производительности будет лимитировано производительностью автотранспортного комплекса. Анализируя участок максимального влияния объема бункера (3500-4000 т/ч), следует отметить, что на производительность дробильно-перегрузочного пункта дальнейшее увеличение объема бункера имеет незначительное влияние. Разница во влиянии на производительность ДПП бункеров объемом от 360 до 1200 т не превышает 1%. По мере роста производительностей дробилок линии, представляющие на графиках (рис. 3, б) варианты с бункерами, превышающими 360 т, сближаются. И при производительности 5000 т/ч существует два крайних варианта – линия, харак-

Усреднения та транспортування

теризуюча бункер 130 т, и совокупность линий, представляющих бункера от 240 до 1200 т.



а) випадок 1



б) випадок 2

Рис. 3. Залежність експлуатаційної продуктивності комплексу ЦПТ від продуктивності дробилки для ДПП з різним об'ємом бункера

Усреднення та транспортування

Таким образом, установлено, что увеличение полезного объема бункера свыше 360 т не приводит к существенному росту производительности ДПП, но будет сопровождаться ростом капитальных затрат на ДПП. В то же время, использование бункера менее 240 т при производительности дробилки 3000...4500 т/час уменьшает эксплуатационную производительность ДПП.

Выводы и направления дальнейших исследований. В ходе имитационного моделирования определены условия, при которых объем бункера оказывает максимальное влияние на производительность комплекса циклично-поточной технологии. Наибольший эффект наблюдается при полном использовании конструктивных параметров дробилки. В этом случае рациональная полезная емкость приемного бункера равна фактической грузоподъемности трех автосамосвалов. Дальнейшее увеличение вместимости бункера не сопровождается ростом производительности ДПП. В случае, если фактическая производительность дробилки существенно превышает производительность ДПП, объем бункера может быть ограничен двумя самосвалами. Использование имитационного моделирования для оценки устойчивости и надежности работы горно-транспортных систем позволяет повысить обоснованность управленческих и проектных решений. В дальнейших исследованиях будет рассмотрен случай с объединением элементарных грузопотоков в один или несколько сходящихся грузопотоков с учетом совместного влияния автосамосвалов на производительность друг друга и производительность дробильно-перегрузочного пункта.

Список литературы

1. Опыт разработки наиболее экономических транспортных схем при проектировании карьеров / **А.В. Андрищенко, В.С. Сербин, П.С. Трушин и др.** // Горный журнал. – 1983. – №10. – С. 14-16.
2. **Дриженко А.Ю., Козенко Г.В., Рыкус А.А.** Открытая разработка железных руд Украины: состояние и пути совершенствования. – Полтава: Полтавський літератор, 2009. – 452 с.
3. **Юматов В.П., Шубодеров В.И.** Определение оптимального числа переносов дробильно-перегрузочных пунктов при комбинированном транспорте // Горный журнал. – 1965. – №12. – С. 25-27.
4. **Четверик М.С.** Вскрытие горизонтов глубоких карьеров при комбинированном транспорте. – К.: Наук. думка, 1986. – 188 с.
5. Surface Mining (2nd edition), Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., Littleton, Colorado, 1990.
6. **Чиркин А.А., Кантемиров В.Д.** Оптимизация параметров площадок для размещения передвижных дробильно-перегрузочных установок // Горно-информационный аналитический бюллетень. – 2003. – №12. – С. 117-120
7. **Kolonja B., Stanic R., Hamovic J.** Simulation of in-pit crushing system using AutoMod // 19th World Mining Congress, – New Delhi (India), 2003. – P. 517-531
8. **Вилкул А.Ю., Слободянюк В.К.** Новые схемы вскрытия глубоких горизонтов железорудных карьеров со сложными горно-геологическими условиями разработки // Проблемы карьерного транспорта. Материалы международной научно-практической конференции. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2005. – С. 74-79
9. **Слободянюк В.К., Максимов И.И.** Особенности оптимизации технологических схем циклично-поточной технологии // Збірник наукових праць НГУ – 2010.– № 34, Т. 2. – С. 42-53.

Усереднення та транспортування

10. Норми технологічного проектування гірничодобувних підприємств із відкритим способом розробки родовищ корисних копалин / В двох томах: Відкриті гірничі роботи. СОУ-Н МПП 73.020-078-2:2008. / **М.Г. Голярчук, В.І. Квітка, А.І. Воробйов, и др.** – Кривий Ріг: Мінерал, 2008. – Ч. 2. – 714 с.

© Слободянюк В.К., Гуренко О.Н., Ромашков А.Л., Слободянюк Р.В., 2010

*Надійшла до редколегії 15.09.2010 р.
Рекомендовано до публікації к.т.н. В.В. Гаєвим*