

Ю.Г. ВИЛКУЛ, д-р техн.наук, проф.,
В.К. СЛОБОДЯНЮК, И.И. МАКСИМОВ, кандидаты техн. наук, доц.
Криворожский национальный университет

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЦИКЛИЧНО-ПОТОЧНОЙ ТЕХНОЛОГИИ В ГЛУБОКИХ КАРЬЕРАХ

Исследована зависимость технико-экономических показателей карьерного автотранспорта от количества и размещения перегрузочных пунктов в рабочей зоне карьера. Установлена аналитическая зависимость для определения оптимального количества перегрузочных пунктов при их равномерном расположении по длине и по высоте рабочей зоны. Исследованы особенности изменения основных технологических показателей работы карьерного автотранспорта в зависимости от количества дробильно-перегрузочных пунктов ЦПТ, производительности карьера и размеров рабочей зоны. Определены условия одновременного использования нескольких дробильно-перегрузочных пунктов, их основные технологические параметры, оптимальное количество пунктов по горизонтали и вертикали, оценена экономическая эффективность использования технологических схем с несколькими перегрузочными пунктами. Проведенными исследованиями установлено, что во всех случаях оптимизация количества перегрузочных пунктов и их увеличение приводит к уменьшению количества автосамосвалов на 50-60% по сравнению с вариантом использования одного перегрузочного пункта. Увеличение количества перегрузочных пунктов с одновременным снижением количества автосамосвалов повышает надежность работы карьерного транспорта. Оптимизация количества перегрузочных пунктов снижает требуемую производительность каждой дробильно-перегрузочной установки до 10-20 млн т/год. Использование мобильных дробильно-перегрузочных пунктов не замораживает запасы руды и не препятствует развитию рабочей зоны.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Эффективным способом стабилизации и снижения эксплуатационных затрат на открытую разработку железорудных месторождений является реконструкция транспортной схемы карьера. Реализация такого решения требует значительных капитальных затрат. В мировой практике открытой разработки сформировались требования, которым должна удовлетворять транспортная система глубокого карьера [1]. Наряду с надежностью оборудования, это способность транспортной схемы наилучшим образом адаптироваться под изменения горнотехнических условий разработки. Это достигается использованием в рабочей зоне карьера мобильных конвейерных систем и стационарных дробильно-перегрузочных пунктов. В то же время, при проектировании отечественных железорудных карьеров еще продолжают доминировать решения, реализованные в комплексах циклично-поточной технологии в 70-80-х годах прошлого столетия.

Основой этих решений является использование в карьере стационарных дробильно-перегрузочных пунктов. Продолжающееся увеличение глубины железорудных карьеров Кривбасса и соответствующее увеличение расстояния транспортирования автотранспортом горной массы из забоев на перегрузочные пункты ЦПТ снижают экономическую эффективность открытого способа разработки. Оценка целесообразности и условий одновременного использования нескольких дробильно-перегрузочных пунктов ЦПТ не получила должного отражения в теории горного дела.

Анализ последних исследований и публикаций. На большинстве железорудных карьеров Украины транспортирование горной массы осуществляется с применением циклично-поточной технологии [2-8]. Как правило, используются достаточно простые по топологии технологические схемы с одним стационарным дробильно-перегрузочным пунктом. При этом уменьшаются затраты на подъем горной массы на поверхность, но остаются значительными затраты на доставку горной массы автотранспортом до перегрузочного пункта. С увеличением глубины карьера и размеров рабочей зоны эти затраты возрастают.

В теории открытой разработки исследованы вопросы обоснования шага переноса перегрузочного пункта по глубине по мере понижения горных работ, но вопросы одновременного использования нескольких дробильно-перегрузочных пунктов исследованы в недостаточной степени.

Ранее авторами исследовался вопрос одновременного использования нескольких перегрузочных пунктов [9], располагаемых в пределах одного концентрационного горизонта. Была решена задача определения оптимального количества перегрузочных пунктов и основные технологические параметры.

Показано, что для широкого диапазона производительности карьера (10-40 млн т/год) ра-

ационально использовать три перегрузочных пункта. Дальнейшее увеличение количества дробильно-перегрузочных пунктов не приводит к существенному улучшению технико-экономических показателей. В работе [10] авторами разработана методика определения оптимального количества перегрузочных пунктов в глубоком карьере, как по вертикали, так и по горизонтали.

Постановка задач исследования. Целью работы является исследование зависимости технико-экономических показателей карьерного автотранспорта от количества и размещения перегрузочных пунктов в рабочей зоне карьера.

При выполнении работы решали следующие задачи:

установление аналитической зависимости для определения оптимального количества перегрузочных пунктов при их равномерном расположении по длине и по высоте рабочей зоны;

исследование особенностей изменения основных технологических показателей работы карьерного автотранспорта в зависимости от количества дробильно-перегрузочных пунктов ЦПТ, производительности карьера и размеров рабочей зоны.

Изложение материала и результаты. Основные положения методики определения оптимального количества перегрузочных пунктов рассмотрены в работе [10]. При этом основной целью являлось уменьшение общего количества затрат на доставку горной массы до основного конвейера.

$$Z = 0,001Q \left(C_A + \frac{A}{q \cdot T_A} \right) \left(\frac{l}{4n} + \frac{H}{4mi} \right) + 0,001C_k Qkd + \frac{C_o}{T_K} mnkd + \frac{C_D}{T_D} mn, \quad (1)$$

где C_A - себестоимость транспортирования горной массы автотранспортом, грн/ткм; A - стоимость одного автосамосвала, грн; q - годовая производительность автосамосвала, ткм/год; T_A - нормативный срок эксплуатации автосамосвала, лет; C_o - капитальные затраты на один погонный метр дополнительных конвейерных выработок (учитывает затраты на проходку, а также сооружение конвейера), грн/м; T_K - период эксплуатации вспомогательных конвейерных выработок, лет; C_k - себестоимость транспортирования горной массы конвейером, грн/ткм; T_D - период эксплуатации дробильно-перегрузочного пункта, лет; C_D - капитальные затраты на один дробильно-перегрузочный пункт, грн.

Определялось оптимальное количество перегрузочных пунктов по вертикали и горизонтали, при которых эти затраты минимизировались

$$n_o = l \times \sqrt[3]{0,001 \left(C_A + \frac{A}{q \cdot T_A} \right) \times i / 4 \left(\frac{C_o}{T_K} kd + \frac{C_D}{T_D} \right) \times \frac{Q}{Hl}}; \quad (2)$$

$$m_o = \frac{H}{i} \times \sqrt[3]{0,001 \left(C_A + \frac{A}{q \cdot T_A} \right) \times i / \left(\frac{C_o}{T_K} kd + \frac{C_D}{T_D} \right) \times \frac{Q}{Hl}}. \quad (3)$$

Общее количество перегрузочных пунктов равно

$$m_o n_o = \sqrt[3]{\left(0,001Q \left(C_A + \frac{A}{q \cdot T_A} \right) / \frac{C_o}{T_K} + \frac{C_D}{T_D} \right)^2 \cdot \frac{Hl}{16(kd)^2 i}}. \quad (4)$$

Сомножители под кубическими корнями в формулах (2), (3) одинаковые и определяют некоторый коэффициент пропорциональности для значений m_o и n_o . Оптимальное количество перегрузочных пунктов по горизонтали пропорционально длине области горных работ, а по вертикали - пропорционально высоте области и обратно пропорционально уклону автомобильных трасс.

Поскольку ценовые и горно-геометрические параметры в формулах (2) и (3) входят под корнем кубическим, то даже значительные изменения одного из них приводят к незначительному изменению оптимального количества перегрузочных пунктов. Если любой из параметров или указанных выше дробей изменится на 30 %, то n_o и m_o изменятся только на 9 %. Даже при изменении одного из исходных параметров, например, производительности, в два раза, оптимальные значения n_o и m_o изменятся на 26 %.

На основе приведенных выше формул и полученных зависимостей построена экономико-

математическая модель. С ее помощью определялись оптимальное количество перегрузочных пунктов по горизонтали и вертикали, их общее количество, размеры и площадь отдельных зон, производительность одной дробильной установки, количество необходимых автосамосвалов, общий экономический эффект от оптимизации автомобильно-конвейерного транспорта. Моделировалось развитие горных работ в карьерах с глубиной рабочей зоны от 100 до 600 м и длиной от 1000 до 6000 м.

При небольших размерах рабочей зоны и производительности карьера оптимальным является использование одного перегрузочного пункта (например, при $H=100$ м, $L=1000$ м и производительности карьера менее 25 млн т/год). Во всех остальных случаях оптимальное количество дробильных установок увеличивается от 2 до 8 шт. При этом на увеличение количества перегрузочных пунктов одинаково влияет как рост глубины, так и длины рабочей зоны, что также следует из формулы (4), где L и H влияют в одинаковой степени.

Установлено, что при глубине карьера, превышающей 200 м, или протяженности рабочей зоны более 2000 м рационально использовать не менее двух перегрузочных пунктов.

Определяемое оптимальное количество перегрузочных пунктов целочисленное (округленное) при целом количестве концентрационных горизонтов и перегрузочных пунктов на каждом горизонте. Поэтому при $H=200$ м и $L=4000$ м определялось два концентрационных горизонта по два перегрузочных пункта (всего 4), а при увеличении длины рабочей зоны до 5000-6000 м как оптимальный определялся один горизонт с тремя перегрузочными пунктами (аналогичным образом объясняется непропорциональное увеличение количества перегрузочных пунктов с увеличением глубины и длины рабочей зоны).

Как видно из табл. 1, при производительности карьера 25 млн т/год всегда рационально использовать от 2 до 6 перегрузочных пунктов, что обеспечивает существенное снижение затрат на автотранспортные перевозки.

Таблица 1

Оптимальное количество перегрузочных пунктов для разной глубины и ширины рабочей зоны при годовой производительности карьера 25 млн т

Высота рабочей зоны, м	Длина рабочей зоны, м					
	1000	2000	3000	4000	5000	6000
100	2	2	3	3	4	4
200	2	4	4	4	3	3
300	3	2	4	4	4	6
400	4	3	6	4	4	6
500	4	3	3	6	6	4
600	5	4	3	6	6	6

Анализ табл. 2 показывает, что даже при производительности карьера 10 млн т/год в большинстве случаев является рациональным использование нескольких перегрузочных пунктов. Использование одного перегрузочного пункта рационально при небольшой глубине и длине рабочей зоны.

Таблица 2

Оптимальное количество перегрузочных пунктов для разной глубины и ширины рабочей зоны при годовой производительности карьера 10 млн т

Высота рабочей зоны, м	Длина рабочей зоны, м					
	1000	2000	3000	4000	5000	6000
100	1	1	2	2	3	3
200	2	1	1	2	2	2
300	2	2	2	2	2	2
400	3	2	2	2	4	4
500	3	3	2	2	4	4
600	3	3	3	2	2	4

Основной целью комбинированного карьерного транспорта является минимизация затрат на работу сборочного транспорта, обслуживающего экскаваторные забои в карьере. Проведенными исследованиями установлено, что во всех случаях оптимизация количества перегрузочных пунктов и их увеличение приводит к уменьшению количества автосамосвалов на 50-60 %

(в 2-2,5 раза) по сравнению с вариантом использования одного перегрузочного пункта, причем данное снижение наблюдается во всех рассмотренных вариантах примерно на одном уровне.

Увеличение количества перегрузочных пунктов с одновременным снижением количества автосамосвалов повышает надежность работы карьерного транспорта, снижает грузонапряженность карьерных дорог и непроизводительные потери времени при ожидании на перегрузочных пунктах.

Оптимизация количества перегрузочных пунктов позволяет значительно снизить производительность каждой дробильно-перегрузочной установки. При небольших размерах рабочей зоны и одном-двух перегрузочных пунктах их производительность составляет 25-30 млн т/год. При увеличении глубины рабочей зоны до 300 м и длины до 3000 м оптимальное количество пунктов увеличивается, а их производительность снижается до 15-20 млн т/год.

При дальнейшем увеличении размеров рабочей зоны производительность дробильно-перегрузочных пунктов снижается до 7-10 млн т/год.

Снижение требуемой производительности перегрузочного пункта позволяет их оборудовать щековыми дробилками крупного дробления, которые характеризуются небольшим весом и небольшими затратами на перемещение и обслуживание.

Использование при циклично-поточной технологии мобильных дробильно-перегрузочных пунктов не требует замораживания на десятилетия значительных запасов руды и не создает препятствий для развития рабочей зоны.

В качестве критерия оптимизации технологических схем использовался экономический эффект ($\Delta Z = Z_1 - Z_{m_0 n_0}$), равный разности суммарных затрат на доставку горной массы до магистрального конвейера при одной дробильной установке Z_1 и при оптимальном их количестве ($Z_{m_0 n_0}$).

При производительности карьера 25 млн т/год использование оптимального количества дробильно-перегрузочных пунктов снижает затраты на карьерный транспорт на 15-25 % при глубине рабочей зоны 200-300 м и длине 2000-3000 м и на 25-40 % при больших размерах рабочей зоны.

При производительности карьера 10 млн т/год снижение затрат на 10-17 % наблюдается при глубинах 300-400 м и длине рабочей зоны 3000-4000 м.

При увеличении производительности карьера до 40 млн т/год снижение затрат на карьерный транспорт составляет 25-30 % при глубине рабочей зоны 200-300 м и ее длине 2000-3000 м, и достигает 40-50 % при больших размерах рабочей зоны.

Рассмотрим характер изменения количества автосамосвала при оптимизации параметров ЦПТ в карьере производительностью 25 млн т/год, с глубиной рабочей зоны 400 м при изменении ее длины от 1500 до 4500 м (рис. 1).

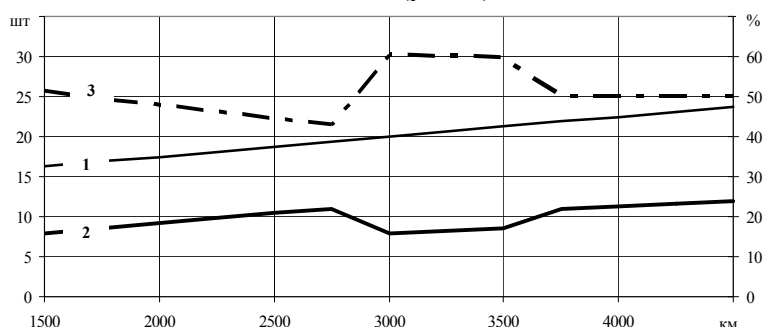


Рис. 1 Изменение количества автосамосвалов при разной длине рабочей зоны: 1 - при одном дробильно-перегрузочном пункте; 2 - при оптимальном их количестве; 3 - относительное уменьшение количества автосамосвалов при оптимизации количества перегрузочных пунктов, %

Анализ рис. 1 показывает, что при одном перегрузочном

пункте по мере увеличения длины рабочей зоны количество автосамосвалов пропорционально возрастает с 16 до 24 шт. При оптимизации количества дробильно-перегрузочных пунктов (их количество изменяется от 3 до 6) количество автосамосвалов изменяется в пределах от 8 до 12 шт.

При этом их относительное количество уменьшается на 50-60 %. В связи с тем, что оптимальное количество дробильно-перегрузочных пунктов округляется до целочисленного значе-

ния изменение их количества по вертикали и горизонтали неравномерное, что объясняет непропорциональное изменение графиков на рис. 1.

В рассмотренном случае необходимая производительность одной дробильно-перегрузочной установки изменяется от 4,2 до 8,2 млн т/год.

При проектировании схем вскрытия карьеров с большой производительностью на этапе предварительных исследований необходимо определять оптимальное количество перегрузочных пунктов и схему их перемещения по мере развития открытых горных работ.

Это позволит значительно снизить общие затраты на карьерный транспорт, уменьшить необходимое количество карьерных автосамосвалов и улучшить условия их работы.

Использование перемещаемых дробильно-перегрузочных пунктов позволяет улучшить режим горных работ и не требует зацеличивания вскрытых запасов руды под объектами транспортных коммуникаций.

Выводы и направления дальнейших исследований. Выполненные исследования показали возможность значительного снижения затрат на автомобильно-конвейерный транспорт при оптимальном количестве нескольких нестационарных дробильно-перегрузочных пунктов. Результаты исследований могут быть использованы при реконструкции циклично-поточной технологии глубоких карьеров.

В дальнейших исследованиях необходимо обосновать конструкцию нестационарного дробильно-перегрузочного пункта и технологию горных работ с их одновременной эксплуатацией в рабочей зоне.

Список литературы

1. Surface Mining (2nd edition), Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., Littleton, Colorado, 1990.
2. Перегрузочные пункты при автомобильно-конвейерном транспорте на рудных карьерах / **А.Г. Шапарь, В.Т. Лашко, С.М. Новожилов** и др. - Днепропетровск: Полиграфист, 2001. – 138с.
3. **Дриженко А.Ю., Козенко Г.В., Рыкус А.А.** Открытая разработка железных руд Украины: состояние и пути совершенствования / **А.Ю. Дриженко, Г.В. Козенко, А.А. Рыкус** // Днепропетровск: НГУ. Полтавский литератор. – 2009. – 452с.
4. **Яковлев В.Л.** Теория и практика выбора транспорта глубоких карьеров / **В.Л. Яковлев**. // Новосибирск: Наука, 1989. - 238 с.
5. Высокопроизводительные глубокие карьеры / **М.Г. Новожилов, А.Ю. Дриженко, А.М. Маевский и др.**; Под ред. **М.Г.Новожилова**. - М: Недра, 1984. -188 с.
6. **Четверик М.С.** Вскрытие глубоких горизонтов карьеров при комбинированном транспорте / **М.С. Четверик** // К.: Наукова думка, 1986. - 186 с.
7. Вскрытие глубоких горизонтов карьеров / **А.Ю. Дриженко, В.П. Мартыненко, В.И. Симоненко** и др. - М.: Недра., 1994 -289 с.
8. **Мартыненко В.П.** Научное обоснование и разработка экологически ориентированных технологий горных работ на железорудных горно-обогатительных комбинатах: Дисс. д-ра техн. наук: 05.15.03 – Днепропетровск, 1999. – 344 с.
9. **Вилкул Ю.Г., Слободянюк В.К., Максимов И.И.** Исследование технологических схем циклично-поточной технологии с несколькими перегрузочными пунктами / **Ю.Г.Вилкул, В.К. Слободянюк, И.И. Максимов** // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг: КТУ, 2009.– Вип. 23. - С. 3-6.
10. **Вилкул Ю.Г., Слободянюк В.К., Максимов И.И.** Оптимизация количества перегрузочных пунктов циклично-поточной технологии при открытой разработке / **Ю.Г.Вилкул, В.К. Слободянюк, И.И. Максимов** // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг: КТУ, 2011. - Вип. 27. - С. 3-6.

Рукопис поступила в редакцию 15.03.15