

частиц измельченной руды в гидроциклоне и вычисления его сепарационной характеристики. Полученные модели гидродинамики и сепарационных характеристик дают достаточно точное представление о процессах происходящих в многофазных, сильнозакрученных, быстроизменяющихся потоках гидроциклона. Применение данных моделирования при расчете параметров гидроциклонов позволяет выполнить оптимизацию характеристик технологического оборудования и предоставляет возможность перехода на качественно более высокий уровень в разработке систем управления процессом классификации. Следует также отметить, что для такого моделирования вводится ряд допущений для упрощения расчетов в определенной мере идеализирующие процесс.

**Выводы.** Коррекция моделей гидродинамики многофазного турбулентного потока гидроциклона с учетом особенностей гранулометрического состава и других свойств железорудной пульпы способствует получению более точного решения задачи. Для синтеза математической модели гидроциклона, ее параметризации и эффективного использования в системе автоматического регулирования, существует необходимость быстрого и точного получения информации о динамике изменения гранулометрического состава твердой фазы пульпы с оценкой степени раскрытия полезного компонента.

Перспективы использования силы радиационного давления высокоэнергетического ультразвука для построения модели классификации измельченной руды в гидроциклоне, обусловлены требованием формирования адекватного по быстрдействию и точности управляющего воздействия с учетом времени пребывания частиц в гидроциклоне, а также определенной аналогией пространственного разделения частиц твердой фазы пульпы в поле центробежных сил гидроциклона с их поведением под действием сил радиационного давления мощного ультразвука.

#### *Список литературы*

1. Дик И.Г., Матвиенко О.В., Неессе Т. Моделирование гидродинамики и сепарации в гидроциклоне // Теоретические основы химической технологии, 2000. - Том 34. - № 5. - С. 478-488.
2. Матвиенко О.В. Анализ моделей турбулентности и исследование структуры течения в гидроциклоне // Инженерно-физический журнал, 2004. - Т. 77. - № 2. - С. 58-64.
3. Матвиенко О.В., Дик И.Г. Численное исследование сепарационных характеристик гидроциклона при различных режимах загрузки твердой фазы // Теоретические основы химической технологии, 2006. - Том 40. - № 2. - С. 219-224.
4. Моркун В.С. Ультразвуковой контроль характеристик измельченных материалов и адаптивное управление процессами измельчения-классификации руд на его базе: дисс. доктора техн. наук: 0.5.13.07 / Моркун Владимир Станиславович - Кривой Рог, 1999.
5. Матвиенко О.В., Евтюшкин Е.В. Движение частицы в сдвиговом потоке и ее взаимодействие со стенкой // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики. Доклады пятой всероссийской научной конференции. Томск 2-4 октября 2006, С. 30-31. 54.
6. Матвиенко О.В., Евтюшкин Е.В. Исследование осаждения частиц с учетом их ударного взаимодействия // XIII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», 26-30 марта 2007 г Труды в 3-х т. Томск: Изд-во ТПУ, 2007- Т.3. - С. 203-204.
7. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. - М.: Наука, 1974. - 712 с.
8. Матвиенко О.В., Ушаков В.М., Евтюшкин Е.В. Математическое моделирование турбулентного переноса дисперсной фазы в турбулентном потоке // Вестник Томского Государственного педагогического университета. Сер. Естественные и точные науки. - Выпуск 6(43), 2004. - С. 50-54.
9. Тихонов О.Н. Закономерности эффективного разделения минералов в процессах обогащения полезных ископаемых. - М.: Недра, 1984. - 208 с.

Рукопись поступила в редакцию 22.03.12

УДК 222:271

С.А. ФЕДОРЕНКО, ст. препод., С.В. ТКАЛИЧЕНКО, канд. эконом. наук, доц.,  
С.А. ЖУКОВ, д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

### **КОНЦЕПЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ОДНОКАНАЛЬНЫХ ДВУХПРОДУКТОВЫХ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ**

Предложен теоретический подход к частному решению транспортной задачи оптимизации карьерных грузопотоков при вовлечении попутно добываемого сырья в транспортный канал главных конвейерных трактов циклично-поточной технологии.

**Ключевые слова:** карьерный грузопоток, циклично-поточная технология, внутрикарьерное складирование, перегрузочные пункты.

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Известно, что основным фактором, определяющим развитие и эффективность карьерного транспорта, является постоянное ухудшение горно-технических условий разработки месторождений. Когда в конце 60-х годов прошлого века увеличение глубин карьеров на горно-добывающих предприятиях Министерства черной металлургии вызвало ухудшение экономических показателей, окончательно сформировалось направление геотехнологии с конвейеризацией транспортирования взорванных скальных горных пород - циклично-поточная технология (ЦПТ).

Применение ЦПТ рассматривалось как основное направление решения транспортной проблемы глубоких карьеров, способное помочь выйти из сложившейся кризисной ситуации. При этом ориентировались на мировой опыт использования ленточных конвейеров для подъема горной массы из карьеров.

По данным зарубежных источников и украинской производственной статистики, применение конвейерного транспорта обеспечивает значительное снижение расходов на энергоносители (на 65-70%), дизельное топливо (47-55% по удельным показателям) и еще более проявляется повышение производительности труда (затраты на рабочую силу уменьшаются на 80-93%).

**Анализ исследований и публикаций.** Учитывая вышеприведенные факторы, следует отметить, что одним из наиболее рациональных направлений в данной ситуации было бы изменение технологических схем разработки железорудных месторождений в направлении использования существующего в карьере комплекса горно-транспортного оборудования для параллельно осуществляемой добычи нескольких видов минерального сырья попутно с добычей основного - железной руды [1].

Идея использования комплексов ЦПТ для разработки нескольких видов сырья не нова. Еще Б.Н. Тартаковский и другие ученые [2-3] неоднократно выдвигали ее. Однако в 70-х и 80-х годах проблема не стояла так остро, а сейчас отсутствие научно обоснованных прогрессивных технических и технологических решений по комплексному использованию горнотранспортного оборудования является важнейшим фактором, сдерживающим развитие ЦПТ, и, самое главное, снижающим эффективность использования комплексов ЦПТ, действующих в настоящее время.

**Цель работы.** В настоящее время - по мере приближения рудных карьеров к граничным глубинам - существующие комплексы ЦПТ будут иметь все больший резерв производительности, который предлагается использовать для попутной добычи строительных и других товарных горных пород. При этом авторами предлагается на основании разработанной системы ранжирования по приоритетности нескольких видов сырья при переходе рудного карьера на несколько видов продукции (диверсификация продукции при конверсии рудника), использовать для формирования параллельных нерудных грузопотоков начинающие появляться и постепенно увеличивающиеся в перспективе пульсации в загрузке ЦПТ рудой. Главной особенностью при этом является то, что параллельные грузопотоки имеют общий канал - на участке конвейерных трактов ЦПТ, что и закладывается в оптимизационную модель как доминанта.

**Материалы и результаты исследований.** В настоящее время комплексы ЦПТ в железорудных карьерах остаются главными транспортными каналами в их рудных грузопотоках. При этом интенсивность и степень загрузки этих каналов остаются достаточно высокими, что видно из табл. 1.

Таблица 1

Фактические объемы перевозок с применением конвейерного транспорта на железорудных карьерах Украины (1990-2010 гг.)

	Годы						
	1990	1995	1997	1998	2000	2005	2010
<b>Украина</b>	138,6/177,2	66,3/207,5	78,2/	85,7/	91,1/	90,5/257,7	-/261
руда	113,9	63,3	68,1	69,7	78	72,2	-
вскрыша	24,7	3	10,1	16,1	13,1	18,3	-
<b>ИнГОК</b>	33,0/ 34,6	24,6/ 34,7	25,27	25,9	27,6/35,2	33,9/ 34,7	-/35,0
руда	33	24,6	16,1	10,6	27,6/35,2	-	-
вскрыша	-	-	15,12	16,44	-	-	-
<b>ЮГОК, всего,</b>	24,6/20,0	11,9/20,0	-	-	17,6/34,0	17,4/34,0	-/34,0

руда	24,6/20,0	11,9/20,0	–	–	17,6/34,0	17,4/34,0	–
вскрыша	–	–	–	–	–	–	–
<b>НКГОК</b>	28,1/31,1	10,4/46,5	12,6	10,3	15,0/56,5	/56,5	–/56,5
<b>СевГОК</b>	23,1/32,9	8,2/47,3	11,2	8,5	,05/72,5	9,6/72,5	–/76,0
руда	15,9	7,44	6,39	–	5,22	7	–
вскрыша	7,2	0,76	0,6	–	0,83	2,6	–
<b>ЦГОК</b>	17,05/28,0	5,3/28	7,4/28	8,8/28	10,8/28,0	10,4/28,0	–/28,0
руда	5	4,07	5,4	5,3	5,6	5,7	–
вскрыша	12,05	1,23	2	3,5	5,2	4,7	–

Анализ доступной информации о составе и состоянии технологических комплексов на горнорудных предприятиях позволяет сделать выводы о том, что, при соответствующей их модернизации, имеются реальные предпосылки использования существующих комплексов ЦПТ для последовательного циклического транспортирования разнотипного минерального сырья ими, при формировании параллельных грузопотоков на участках: добычные забои - внутрикарьерные накопительные склады. Что касается последнего, то, как видно из выполненного авторами статистического анализа, недостатка в мобильных, высокопроизводительных и высокоадаптивных технических средствах нет, главным препятствием для реализации имеющихся на большинстве ГОКов потенциальных возможностей до недавнего времени было отсутствие на них необходимых для этого средств. В последние же годы ситуация радикально изменилась в лучшую сторону, и рассматриваемые мероприятия становятся вполне реальными не только технически и организационно, но и в инвестиционном отношении.

«Комплексным проектом поэтапного развития горных работ и переработки минерального сырья до конца отработки Ингулецкого месторождения» (ГП «Кривбасспроект», 04237-1211/1110-1-ПЗ, 2006г.) производительность ИнГОКа по железорудному концентрату предусмотрена в 14 млн т/год, для обеспечения чего были выделены проектные периоды отработки карьера (2006-2011 гг., 2012-2016 гг., 2017-2021 гг., 2022-2026 гг., 2027-2031 гг., 2032-2036 гг., 2037-2041 гг., 2042-2046 гг., 2047-2054 гг.). При принятом режиме горных работ добыча руды в карьере может производиться до 2054 года. При этом указанная производительность сохранится до 2022-2027 года, после чего начнется ее планомерное снижение, связанное с постановкой верхних горизонтов карьера в конечное положение и соответственно сокращение активного и общего фронтов работ по руде и вскрыше. Скорость углубки карьера по периодам принята 5-7,5 м/год.

После построения ряда последовательных положений горных работ карьера, были подсчитаны запасы руды по разновидностям и объем вскрыши, в интервалах между этими положениями. Показатели карьера по периодам приведены в табл. 2.

Таблица 2

Показатели карьера ИнГОКа по периодам работы

Периоды, года	Извлекается всего за период		Среднегодовая производительность		Эксплуатационный коэффициент вскрыши
	руда, тыс.т	вскрыша, тыс. м <sup>3</sup>	руда, тыс.т	вскрыша, тыс. м <sup>3</sup>	
2006-2011	207 000	82 800	34 500	13800	0,4
2012-2016	170 000	68 100	34 000	13620	0,4
2017-2021	164 000	66 075	32 790	13215	0,4
2022-2026	115 000	36 000	23 000	7200	0,31
2027-2045	390 865	70 375	20 000	3910	0,18

Из таблицы видно, что годовая производительность карьера уменьшается в связи с тем, что с глубиной в отработку вовлекаются более богатые руды и для получения заданной производительности по концентрату, необходимо извлекать их меньше. Комбинат сможет стабильно производить 14 млн. т концентрата в год до 2022 г. После 2022 года происходит выбытие производственной мощности карьера, что связано с уменьшением активных фронтов по полезному ископаемому т.к. верхние горизонты северного борта и южный борт достигают предельного положения. На оставшихся в работе горизонтах не обеспечивается необходимая длина активного фронта добычных работ.

Для достижения высоких показателей работы ЦПТ резервируют транспортные и экскавационные средства циклического действия или организуют их работу по спецграфику, применяют

компенсационные и буферно-демпфирующие внутрикарьерные склады на внутрикарьерном перегрузочном пункте и др.

При этом задача оптимизации транспортной работы при изменяющихся мультипродуктовых грузопотоках разбивается на несколько подзадач:

минимизация времени простоев конвейеров;

минимизация транспортных расходов доставки сырья до перегрузочных устройств;

определение рационального количества складов и их расположение.

Для решения первой задачи используется следующий подход. Конвейерная транспортная система рассматривается как система массового обслуживания с приоритетами. Каждому виду сырья, находящемуся на складе, присваивается определенный приоритет. Самый высокий приоритет имеет основной вид продукции - железная руда. В качестве приоритетов могут использоваться экономические или статистические критерии. Возможность транспортирования определенного количества сырья будем называть заявкой. Объем заявки определяется технологическими особенностями производства (например, тыс. т.

Для повышения эффективности использования транспортной системы используется параллельная обработка и, в зависимости от свойств заявок, обслуживание по приоритету. Заявки образуют поток интенсивностью  $\lambda$ , поступают через случайные временные интервалы, длительность обслуживания также случайна.

На рис. 1 представлена возможная топология системы.

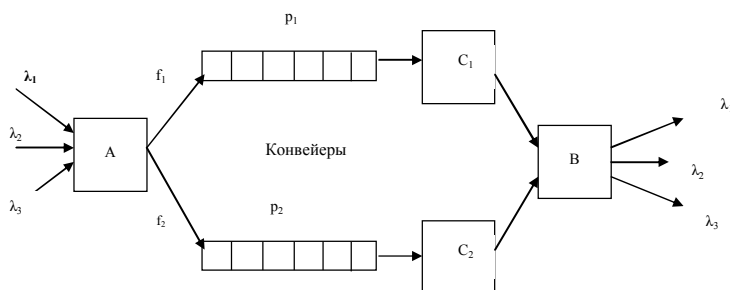


Рис. 1. Топология рассматриваемой системы

Если в системе имеются заявки двух приоритетов, то на распределение потока низкоприоритетных заявок будет влиять поведение приоритетных потоков.

В зависимости от топологии сети, пропускных способностей и ограничения конвейеров определяют, какие доли исходных

потоков по каким путям проходят, минимизируя общее среднее время задержки при прохождении через систему обслуживания, с учетом:  $N$  - количества обслуживающих приборов;  $\gamma$  - полного внешнего потока, поступающего в систему (заявка/с);  $C_{kl}$  - пропускной способности конвейера  $kl$  (заявка/с);  $f_{kl}$  - искомого потока, приходящего по линии  $kl$  (заявка/с)

$$T = \frac{1}{\gamma} \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N \frac{f_{kl}}{C_{kl} - f_{kl}} \rightarrow \min, \quad (1)$$

Номер транспортирующего устройства определяют нахождением оптимального значения  $f_{kl}$  при минимизации среднего времени пребывания заявки в подсистеме из соотношения

$$w_{kl} = \frac{\partial T}{\partial f_{kl}} = \frac{C_{kl}}{(C_{kl} - f_{kl})^2}.$$

Предлагается для каждого потока, в зависимости от приоритета, выбор транспортирующего устройства по минимальному значению соотношения

$$d_{kl} = \frac{\partial T}{\partial f_{kl}} = \frac{n_{kl} + 1}{1 - \rho_{kl}} \frac{1}{C_{kl}},$$

где  $n_{kl}$  - число заявок, находящихся в очереди в транспортирующем устройстве  $kl$ ;  $\rho_{kl} = f_{kl}/C_{kl}$  - коэффициент загрузки конвейера  $kl$ . Производная задержки по потоку может быть интерпретирована как период остаточной занятости конвейера, во время транспортирования остатков предыдущей заявки.

Для транспортной сети с приоритетами, топологию которой разработали авторы, интерпретация задачи для узлов A и B, когда имеются два параллельно работающих конвейера и транспортируются потоки интенсивностью  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  основного сырья, подается третий поток  $\lambda_3$ , заявки которого имеют меньший приоритет - сопутствующее сырье, заключается в распределении потока так, чтобы минимизировать время задержки и простоя конвейера.

Среднее время, проводимое заявкой определенного приоритета в очереди, учитывая предыдущие соотношения, определяется по формуле:

$$W_p = \frac{\sum_{i=1}^p \rho_i \frac{x_i^{(2)}}{x_i}}{\left(1 - \sum_{i=p}^p \rho_i\right) \left(1 - \sum_{i=p+1}^p \rho_i\right)}, p=1, 2, \dots, P,$$

где  $x_i$  - первый момент времени обслуживания требования из класса  $i$ ;  $x_i^2$  - второй момент времени обслуживания требования из класса  $i$ ;  $\rho_i = \lambda_i / \mu_i$  - коэффициент использования потока  $i$ -го приоритета (коэффициент загрузки);  $\lambda_i$  - интенсивность поступления заявок  $i$ -го приоритета;  $p$  - значение приоритета, чем больше значение, тем выше приоритет.

В случае с двумя приоритетами, для заявок с низким приоритетом, с учетом того, что время обслуживания для обоих приоритетов распределено одинаково и описывается экспоненциальным распределением, среднее время, проводимое заявкой в перегрузочном устройстве и на транспортном устройстве, находится по формуле

$$T_j = x + \frac{\lambda_j + f_{3j}}{(C_j - \lambda_j)(C_j - \lambda_j - f_{3j})}, j = 1, 2,$$

где  $j$  - номер конвейера.

По аналогии с выражением (1) для низкоприоритетного трафика  $\gamma_{np}$  функция, минимизирующая общее среднее время задержки для низкоприоритетных заявок

$$T_{np} = \frac{1}{\gamma_{np}} \cdot \sum_j \left( \frac{f_{3j}}{C_j} + \frac{f_{3j}(\lambda_j + f_{3j})}{(C_j - \lambda_j)(C_j - \lambda_j - f_{3j})} \right) \rightarrow \min.$$

Вторая часть задачи заключается в минимизации расходов на транспортировку склад-перегрузочное устройство.

Пусть  $i$  - количество складов (складом также необходимо считать местонахождение основного вида сырья);  $j$  - виды сырья, находящегося на складах; учитываются также - приоритет и расстояние от склада до перегрузочного устройства. Тогда задачу минимизации можно сформулировать как транспортную задачу линейного программирования

$$z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}$$

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i, i = 1, 2, \dots, m, \\ \sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j, j = 1, 2, \dots, n. \end{cases}$$

**Выводы.** Ингулецкое месторождение характеризуется высокой петрографической комплексностью, ИнГОК имеет широкий спектр технических средств для организации мультиструктурных грузопотоков даже в стесненных условиях. Но для оценки эффективности возможной конверсии ГОКа знания горно-технологических условий и потребительских характеристик потенциальной нерудной продукции недостаточно. Для этого необходим более глубокий системный анализ и разработка адекватных математических моделей, позволяющих оценивать целесообразность и эффективность перестройки структуры и пространственно-временной организации грузопотоков. Что же касается технологической составляющей в таком системном подходе относительно ИнГОКа, то здесь очевидно, что до 2022 г. реальные возможности осуществить данную идею в его карьере с вовлечением в транспортировку нерудной попутной продукции ЦПТ являются весьма ограниченными без серьезных изменений принятых проектов.

Однако, после 2027 г. это становится целесообразным и заключается в изменении структуры существующих грузопотоков с минимальными их модификациями.

#### Список литературы

1. Вайсберг Л.А., Баранов В.Ф. Состояние и перспективы развития циклично-поточных технологий / Л.А. Вайсберг, В.Ф. Баранов // Горный журнал, 2002. - № 4. - С. 66-72.
2. Mineral sizing at Mission // Mining magazine, 1998. - November. - 37-39 pp.
3. Циклично-поточная технология добычи руды на карьерах Кривбасса. (Под ред. Б.Н. Тартаковского). - К.: Техніка, 1978. - 175 с.

Рукопись поступила в редакцию 22.03.12