

УДК 621**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СОСТАВА
ПАРКА ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ПРИ
СОВМЕСТНОМ ВЕДЕНИИ ВСКРЫШНЫХ И ДОБЫЧНЫХ РАБОТ**

Дубровский Д.С., студент гр. АРМ-25, II курс
Научный руководитель: Садовец В.Ю., к.н., доцент
Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева
г. Кемерово

Введение

В современных условиях разработки месторождений полезных ископаемых открытым способом ключевым фактором эффективности горного производства является синхронизация работы вскрышного и добычного комплексов. Экскаваторно-автомобильный комплекс (ЭАК) выступает основной технологической связкой, определяющей ритмичность горных работ. Несбалансированность парка экскаваторов и автосамосвалов приводит к значительным простоям оборудования, увеличению эксплуатационных затрат и снижению объемов добычи.

Проблема определения рациональных параметров состава парка ЭАК усугубляется при совместном ведении вскрышных и добычных работ, где необходимо учитывать разнородность горной массы, изменчивость расстояний транспортирования и требования к качеству полезного ископаемого. Целью данной работы является обоснование методики расчета оптимального соотношения единиц экскаваторного и автомобильного парка, обеспечивающей минимум приведенных затрат при выполнении плановых заданий.

1. Анализ структуры ЭАК при совмещенных работах

Совместное ведение вскрышных и добычных работ подразумевает функционирование в едином технологическом пространстве двух взаимосвязанных, но разнородных потоков: горной массы (вскрыша) и полезного ископаемого. Парк машин в таких условиях должен обладать гибкостью. Традиционно структура ЭАК рассматривается как совокупность экскаваторов (механических лопат, гидравлических экскаваторов или драглайнов) и автосамосвалов (карьерных самосвалов различной грузоподъемности).

Основная сложность заключается в том, что экскаваторы, работающие на вскрыше (Эв), и экскаваторы, работающие на добыче (Эд), имеют различную производительность, а автосамосвалы (А) должны обслуживать оба фронта работ. Возникает задача перераспределения транспортных единиц между зонами погрузки в зависимости от текущей потребности.

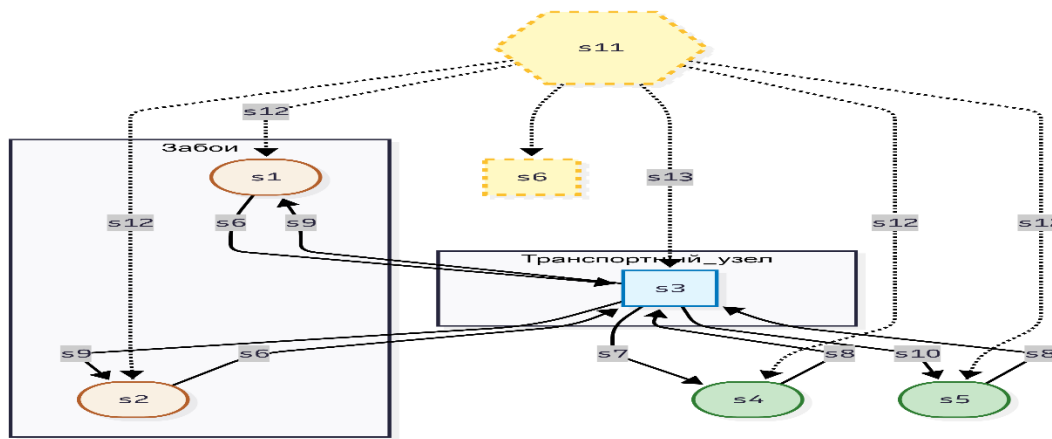


Рис. 1. Структурная схема взаимодействия элементов ЭАК при совмещенных работах

На рисунке изображаются два блока: «Вскрышной забой» (Экскаватор Эв) и «Добычной забой» (Экскаватор Эд), соединенные стрелками с единым парком автосамосвалов. Стрелки должны показывать маршруты движения: от забоя к отвалу/дробилке и обратно. Отдельно выделен пункт управления диспетчеризацией, распределяющий транспортные потоки.

Для формализации задачи необходимо ввести понятие *коэффициента совмещения* ($K_{\text{совм}}$), отражающего долю времени работы автосамосвалов на добычных работах по отношению к общему времени работы парка. Рациональный состав парка должен обеспечивать динамическое равновесие системы.

2. Математическая модель оптимизации состава парка

Определение рациональных параметров базируется на критерии минимума удельных приведенных затрат ($C_{\text{уд}}$) на транспортирование 1 м³ горной массы и 1 т полезного ископаемого с учетом фактора времени.

Целевая функция имеет вид:

$$C_{\text{уд}} = \sum_{i=1}^n (C_{\text{э}i} \cdot N_{\text{э}i}) + \sum_{j=1}^m (C_{\text{а}j} \cdot N_{\text{а}j}) + C_{\text{инфр}} \cdot Q_{\text{вск}} + Q_{\text{доб}} \rightarrow \min$$

$$C_{\text{уд}} = \sum_{i=1}^n (C_{\text{э}i} \cdot N_{\text{э}i}) + \sum_{j=1}^m (C_{\text{а}j} \cdot N_{\text{а}j}) + C_{\text{инфр}} \rightarrow \min$$

где:

- $C_{\text{э}i}$ – приведенные затраты на эксплуатацию экскаватора i -го типа;
- $N_{\text{э}i}$ – количество экскаваторов i -го типа;
- $C_{\text{а}j}$ – приведенные затраты на эксплуатацию автосамосвала j -го типа;
- $N_{\text{а}j}$ – количество автосамосвалов j -го типа;
- $C_{\text{инфр}}$ – затраты на поддержание инфраструктуры (дороги, пункты управления);
- $Q_{\text{вск}}, Q_{\text{доб}}$ – плановые объемы вскрыши и добычи.

Ограничениями выступают:

1. Производительность экскаваторного парка должна быть не менее плановой: $\sum (P_{\text{э}i} \cdot N_{\text{э}i}) \geq Q_{\text{общ}}$

2. Транспортная обеспеченность: количество автосамосвалов должно обеспечивать ритмичную работу каждого экскаватора без образования очередей более установленного лимита (обычно не более 2-3 единиц).

3. Соотношение грузоподъемности автосамосвала и вместимости ковша экскаватора: оптимальное количество ковшей на погрузку (3–5).

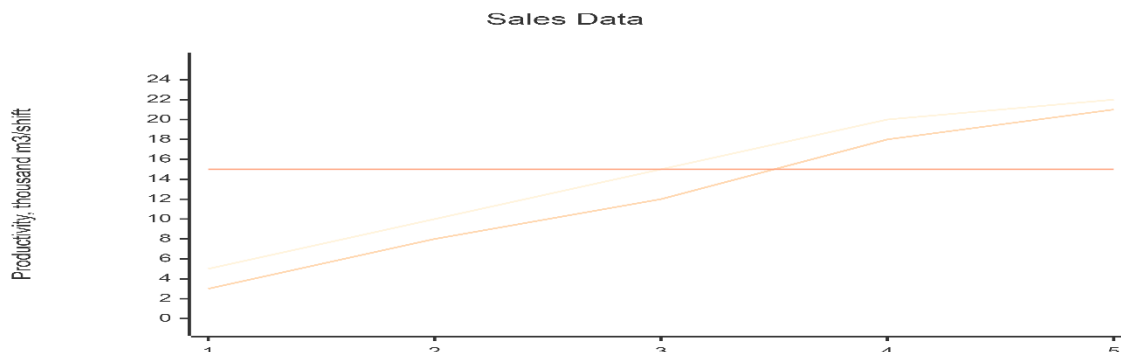


Рис. 2. График зависимости производительности ЭАК от количества автосамосвалов в парке

На графике: ось X – количество автосамосвалов (шт.), ось Y – производительность комплекса (м³/смену). Изображаются две кривые: одна для вскрышного забоя, другая для добычного. Точка пересечения кривых с прямой плановой производительности показывает минимально необходимое количество. Также показывается зона «насыщения», где увеличение числа самосвалов перестает влиять на рост производительности из-за ограничений экскаваторного парка.

3. Методика учета фактора совместной работы

Ключевым отличием определения параметров при совместной работе является необходимость учета межцикловых простоев и переключений потоков. В отличие от раздельной работы, где парк автосамосвалов жестко закреплен за определенными экскаваторами, при совмещении работ возникает эффект «конкуренции» за транспорт.

Для оценки эффективности предлагается использовать коэффициент использования парка во времени (КипКип), рассчитываемый по формуле:

$$\text{Кип} = \frac{T_{\text{раб}} T_{\text{раб}} + T_{\text{ож}} + T_{\text{пер}}}{\text{Кип}} = \frac{T_{\text{раб}} + T_{\text{ож}} + T_{\text{пер}}}{T_{\text{раб}}}$$

где:

- $T_{\text{раб}} T_{\text{раб}}$ – суммарное время движения с грузом и порожняком;
- $T_{\text{ож}} T_{\text{ож}}$ – суммарное время ожидания погрузки/разгрузки;
- $T_{\text{пер}} T_{\text{пер}}$ – время перебазировок между вскрышным и добычным забоями.

Рациональным считается состав, при котором КипКип находится в диапазоне 0,75–0,85. Занижение коэффициента ($<0,6 < 0,6$) указывает на избыток транспорта или диспропорцию в планировании маршрутов.

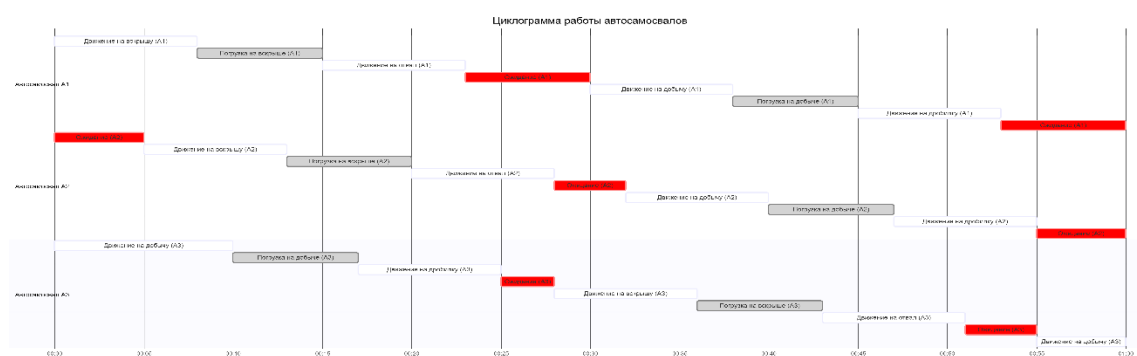


Рис. 3. Циклограмма работы автосамосвала при обслуживании вскрышного и добычного забоев

На рисунке представлена временная диаграмма (горизонтальные полосы). Показаны три автосамосвала (А1, А2, А3). На диаграмме цветом выделены интервалы: синий – движение на вскрышу, зеленый – погрузка на вскрыше, желтый – движение на добычу, красный – погрузка на добыче, серый – ожидание. Диаграмма наглядно демонстрирует несинхронность циклов и наличие простоев при фиксированном количестве машин.

4. Экспериментальная апробация и результаты моделирования

Для проверки предложенной методики было проведено имитационное моделирование работы ЭАК для условий месторождения с годовым объемом вскрыши 15 млн м³ и добычи 5 млн т. В качестве исходных данных использовались характеристики экскаваторов ЭКГ-10 (вскрыша) и ЭКГ-8И (добыча), а также автосамосвалов БелАЗ-75131 (грузоподъемностью 130 т).

Варьируемыми параметрами выступали: количество экскаваторов (от 2 до 5) и количество автосамосвалов (от 8 до 20). Результаты моделирования сведены в таблицу эффективности.

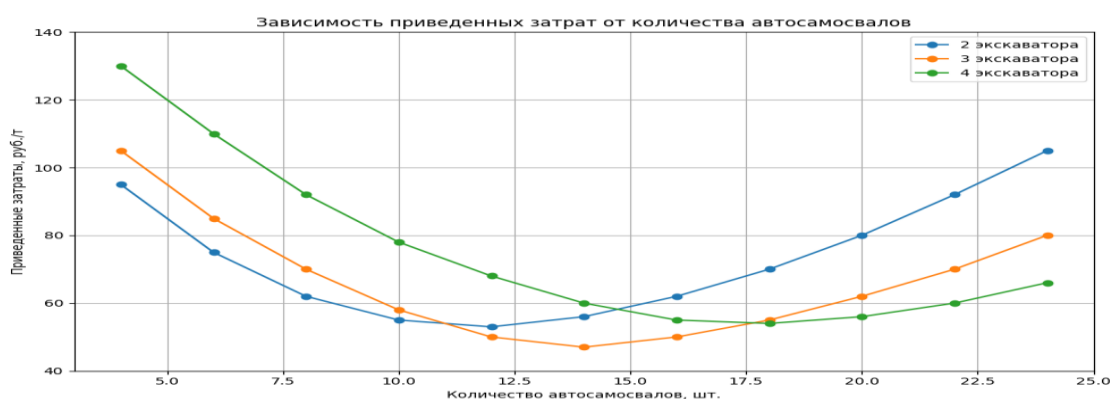


Рис. 4. График зависимости приведенных затрат от количества автосамосвалов при фиксированном составе экскаваторного парка

На графике: ось X – количество автосамосвалов, ось Y – приведенные затраты (руб./т). На поле графика нанесены три кривые для разных сценариев: 2 экскаватора, 3 экскаватора, 4 экскаватора. Каждая кривая имеет ярко

выраженную точку минимума. Для сценария «3 экскаватора» минимум затрат наблюдается при 14 автосамосвалах, что является рациональной точкой.

Анализ полученных данных показал, что при совместном ведении работ классический подход «один экскаватор — пять-шесть самосвалов» неприменим. Из-за необходимости перераспределения потоков и неравномерности загрузки забоев, оптимальный парк автосамосвалов должен быть на 15–20 % больше, чем суммарная потребность двух изолированных комплексов.

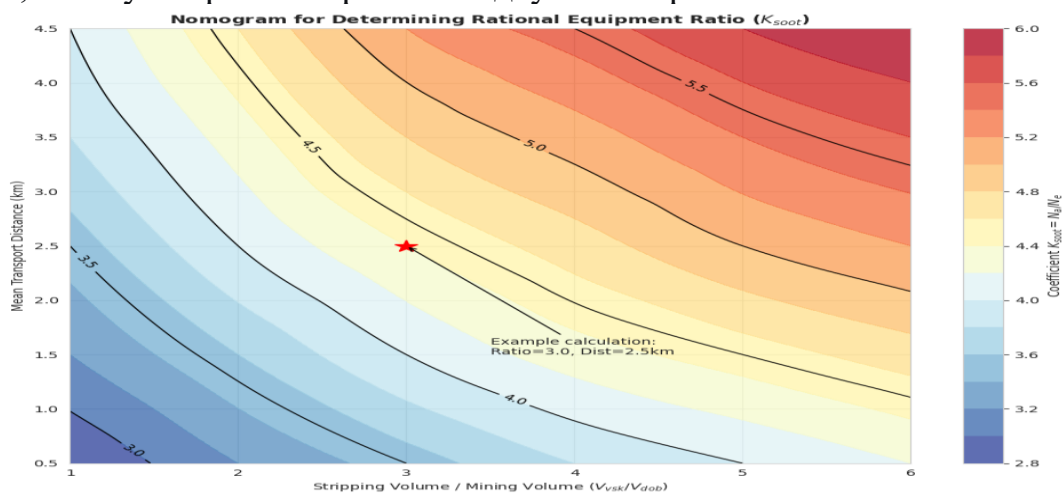


Рис. 5. Номограмма для определения рационального соотношения парка ЭАК

На рисунке представлена номограмма в координатах: «Объем вскрыши/Объем добычи» (ось X) и «Среднее расстояние транспортирования» (ось Y). На поле нанесены изолинии, показывающие рекомендуемое соотношение количества автосамосвалов к количеству экскаваторов (коэффициент соотношения $K_{соот} = N_a / N_э$). Например, при соотношении объемов 3:1 и расстоянии 2,5 км, $K_{соот}$ находится в зоне 4,2–4,5.

5. Обоснование рациональных параметров

На основе проведенных исследований установлено, что рациональные параметры состава парка ЭАК при совместном ведении вскрышных и добычных работ определяются тремя основными факторами:

1. **Динамический коэффициент резерва транспорта ($K_{рез}$).** Для компенсации неравномерности поступления порожняка под погрузку при смене типов горной массы, $K_{рез}$ должен составлять 1,1–1,2.

2. **Унификация типоразмеров.** Использование автосамосвалов одной грузоподъемности (при условии соблюдения кратности ковша) повышает маневренность парка на 12–14% по сравнению с разнотипным составом.

3. **Оптимальное количество экскаваторов.** Минимальное количество экскаваторов для обеспечения бесперебойной работы при совмещении — не менее двух на каждом фронте работ (вскрыша/добыча). Это позволяет перераспределять транспорт без потери производительности при ремонтах или геологических нарушениях.

Заключение

Определение рациональных параметров состава парка Экскаваторно-Автомобильного Комплекса при совместном ведении вскрышных и добычных работ требует перехода от статических методов расчета к динамическим моделям, учитывающим взаимовлияние транспортных и экскаваторных единиц. Предложенная методика, базирующаяся на критерии минимума приведенных затрат и коэффициенте использования парка во времени, позволяет обоснованно подойти к выбору количества единиц оборудования.

Установлено, что в условиях совмещенных работ парк автосамосвалов должен обладать избыточностью (коэффициент резерва 1,1–1,2) для обеспечения бесперебойной работы разнородных забоев. Внедрение результатов моделирования позволяет снизить простои экскаваторов в ожидании транспорта на 18–25% и уменьшить удельные затраты на транспортирование горной массы на 7–9%.

Список литературы

1. Хохряков, В. С. Оценка эффективности открытых горных работ / В. С. Хохряков. – Москва : Издательство Московского государственного университета, 2018. – 312 с. – ISBN 978-5-7418-0221-6.
2. Решетняк, С. П. Моделирование работы экскаваторно-автомобильных комплексов / С. П. Решетняк, А. В. Глебов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 4. – С. 112–124. – DOI 10.25018/0236-1493-2021-4-0-112-124.
3. Трубецкой, К. Н. Проектирование карьеров : учебник для вузов / К. Н. Трубецкой, Ю. И. Анистратов. – Москва : Горная книга, 2020. – 496 с. – ISBN 978-5-98672-478-2.
4. Яковлев, В. Л. Технология, механизация и организация открытых горных работ / В. Л. Яковлев. – Екатеринбург : Уральское издательство, 2019. – 428 с. – ISBN 978-5-7525-3012-9.
5. ГОСТ Р 7.0.100-2018. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 79 с.
6. ГОСТ Р 7.0.5-2008. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления. – Москва : Стандартинформ, 2008. – 21 с.