

УДК 622.271.3

СИМПЛИФИКАЦИЯ КАК МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ НА РАЗРЕЗАХ

Есин Д.Д., студент гр. ГОс-191, VI курс, КузГТУ
Яковлев А.С., студент гр. ГОс-201, V курс, КузГТУ
Морозов С.Ю., студент гр. ГОс-201, V курс, КузГТУ
Добров А.Н., директор по производственным операциям
ООО «СУЭК-Хакасия»

Тюленев М.А., к.т.н., доцент, зав. каф. ОГР
Марков С.О., к.т.н., доцент кафедры МДиГ
Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово

Одной из актуальных задач оптимизации работы выемочно-погрузочных комплексов на разрезах является взаимная адаптация параметров экскавационного и транспортного оборудования для повышения общей производительности комплекса [1-4]. С одной стороны, для обеспечения максимальной производительности экскаватора необходима постоянная погрузка с минимумом простоев (временем обмена автосамосвалов и т.д.) [5-7], с другой, для роста производительности автосамосвалов, необходима минимизация времени их рейса, что обуславливает более частый их обмен у экскаватора [8-9]. Поэтому в решении данного вопроса необходима экономическую составляющая, а также учет параметров и показателей буровзрывных работ [10-16].

Как известно, симплификацией называют метод стандартизации, направленный на устранение неоправданного дублирования многообразия одноименных объектов путем простого сокращения количества их разновидностей до технически и экономически необходимого. Другое ее определение гласит о том, что это «деятельность, заключающаяся в определении таких конкретных объектов, которые признаются нецелесообразными для дальнейшего производства и применения в общественном производстве». В данной работе обосновано применение метода симплификации как выбора неэффективных экскаваторно-автомобильных комплексов.

При разработке четвертичных рыхлых отложений на изучаемом разрезе предусмотрено применение следующих экскаваторно-автомобильных комплексов оборудования: Komatsu PC-400, Volvo EC-480, Komatsu PC-800, Volvo EC-750, Komatsu PC-1250, ЭКГ-10, Komatsu PC-2000, ЭКГ-18p, Komatsu PC-4000 с погрузкой в автосамосвалы БелАЗ-7555В, Komatsu HD-465-7, БелАЗ-75131, БелАЗ-75306, Komatsu HD-830. При разработке взорванных пород – Komatsu PC-400, Volvo EC-480, Komatsu PC-800, Volvo EC-750, Komatsu PC-1250, ЭКГ-10, Komatsu PC-2000, ЭКГ-18p, Komatsu PC-4000 с погрузкой в автосамосвалы БелАЗ-7555В, Komatsu HD-465-7, БелАЗ-75131, БелАЗ-75306,

Komatsu HD-830. При разработке полезного ископаемого – Volvo EC-300 с погрузкой в автосамосвал БелАЗ-7555D, Volvo EC-480 с погрузкой в автосамосвал БелАЗ-7555В, Komatsu PC-800 с погрузкой в автосамосвал Komatsu HD-465-7 и Volvo EC-750 с погрузкой в автосамосвал Komatsu HD-465-7.

Обоснование экономических затрат на производство горных работ при разработке вскрышных пород и полезного ископаемого

Обоснование выбора оборудования с точки зрения производительности, условий работы и экономических затрат применяемых экскаваторно-автомобильных комплексов (ЭАК), напрямую зависит от затрат на производство работ по выемке горной массы.

Затраты на экскавацию 1 м³ при разработке вскрышных пород с учетом амортизации на весь период работы предприятия составили:

– при разработке четвертичных отложений:

Komatsu PC-400 и автосамосвал БелАЗ-7555В - 21,3 руб/м³;

Volvo EC-480 и автосамосвал БелАЗ-7555В - 24,2 руб/м³;

Komatsu PC-800 и автосамосвал Komatsu HD-465-7 - 25 руб/м³;

Volvo EC-750 и автосамосвал Komatsu HD-465-7 - 28,6 руб/м³;

Komatsu PC-1250 и автосамосвал Komatsu HD-785-7 - 34,3 руб/м³;

ЭКГ-10 и автосамосвал БелАЗ-75131 – 33,2 руб/м³;

Komatsu PC-2000 и автосамосвал БелАЗ 75131 - 40,3 руб/м³;

ЭКГ-18р и автосамосвал БелАЗ-75306 – 51,6 руб/м³;

Komatsu PC-4000 и автосамосвал Komatsu HD-830 – 35,7 руб/м³;

ЭШ-11/70 = 2,21 руб/м³. (переэкскавация);

ЭШ-13/50 = 2,13 руб/м³. (переэкскавация);

– при разработке взорванных пород:

Komatsu PC-400 и автосамосвал БелАЗ-7555В – 22,4 руб/м³;

Volvo EC-480 и автосамосвал БелАЗ-7555В – 24,7 руб/м³;

Komatsu PC-800 и автосамосвал Komatsu HD-465-7 – 27,2 руб/м³;

Volvo EC-750 и автосамосвал Komatsu HD-465-7 – 26,3 руб/м³;

Komatsu PC-1250 и автосамосвал Komatsu HD-785-7 – 34,5 руб/м³;

ЭКГ-10 и автосамосвал БелАЗ-75131 – 28,1 руб/м³;

Komatsu PC-2000 и автосамосвал БелАЗ 75131 – 31,2 руб/м³;

ЭКГ-18р и автосамосвал БелАЗ-75306 – 36,8 руб/м³;

Komatsu PC-4000 и автосамосвал Komatsu HD-830 – 46,7 руб/м³.

При разработке четвертичных рыхлых отложений заданные экскаваторно-автомобильные комплексы оборудования полностью перекроют производственные объемы в 32300000 м³/год.

Тогда затраты на разработку годового объема четвертичных отложений составят:

$$Z_{\text{четв.отл}} = Q_{\text{четв.отл}} \cdot C_{\text{четв.отл}}, \text{ руб./год.}$$

где: $Q_{\text{четв.отл}}$ – производительность оборудования в год; $C_{\text{четв.отл}}$ – затраты на экскавацию 1 м³ по четвертичным отложениям.

БелАЗ-7555В и Komatsu PC-400 = 900 000·21,3 = 19 170 000руб./год;

БелАЗ-7555В и Volvo EC-480 = $300\,000 \cdot 24,2 = 7\,260\,000$ руб./год;

Komatsu HD-465-7 и Komatsu PC-800 = $1\,000\,000 \cdot 25 = 25\,000\,000$

руб./год;

Komatsu HD-465-7 и Volvo EC-750 = $1\,800\,000 \cdot 28,6 = 51\,480\,000$

руб./год;

Komatsu HD-785-7 и Komatsu PC-1250 = $3\,700\,000 \cdot 34,3 = 126\,910\,000$

руб./год;

БелАЗ-75131 и ЭКГ-10 = $3\,700\,000 \cdot 33,2 = 122\,840\,000$ руб./год;

БелАЗ 75131 и Komatsu PC-2000 = $5\,200\,000 \cdot 40,3 = 209\,560\,000$ руб./год;

БелАЗ-75306 и ЭКГ-18р = $11\,000\,000 \cdot 51,6 = 567\,600\,000$ руб./год;

Komatsu HD-830 и Komatsu PC-4000 = $4\,100\,000 \cdot 35,7 = 146\,370\,000$

руб./год;

ЭШ 11/70 = $600\,000 \cdot 2,21 = 1\,326\,000$ руб./год. (переэкскавация).

Проверка обеспечения производственной мощности участка по вскрышным работам (четвертичные отложения):

$$V_{\text{рых.отл.год}} = Q_{\text{экс.}}$$

$$V_{\text{рых.отл.год}} = 900\,000 + 300\,000 + 1\,000\,000 + 1\,800\,000 + 3\,700\,000 + 3\,700\,000 + 5\,200\,000 + 11\,000\,000 + 4\,100\,000 + 1\,326\,000 = 32\,300\,000 \text{ м}^3/\text{год}$$

$$32\,300\,000 \text{ м}^3/\text{год} = 32\,300\,000 \text{ м}^3/\text{год} \text{ (условие выполнено)}$$

Затраты экскаваторно-автомобильного комплекса на экскавацию 1 м^3 по наносам представлены на рис. 1.

руб./м³

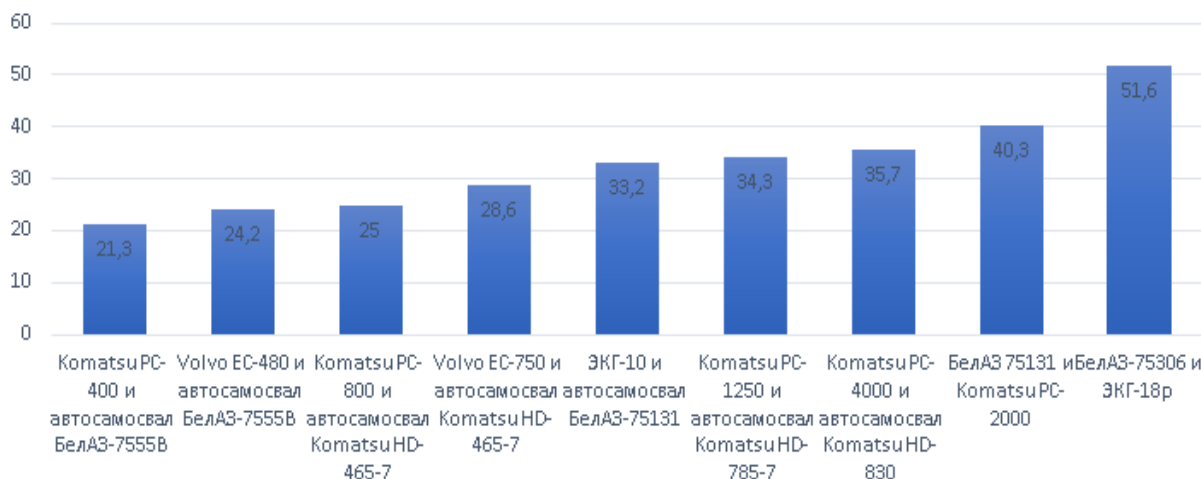


Рисунок 1 – Затраты ЭАК на экскавацию 1 м^3 по наносам.

Согласно производственным годовым показателям объемов горной массы рассматриваемого оборудования получают следующие затраты на экскавацию взорванных пород:

$$Z_{\text{взорв.породы}} = Q_{\text{взорв.породы}} \cdot C_{\text{взр.пород}}, \text{ руб./год.}$$

где: $Q_{\text{взорв.породы}}$ – производительность оборудования в год; $C_{\text{взр.пород}}$ – затраты на экскавацию 1 м^3 взорванных пород.

Автосамосвал БелАЗ-7555В и Komatsu PC-400 = $22,4 \cdot 1\,300\,000 = 29\,120\,000$ руб./год;

Автосамосвал БелАЗ-7555В и Volvo EC-480 = $24,7 \cdot 700\,000 = 17\,290\,000$ руб./год;

Автосамосвал Komatsu HD-465-7 и Komatsu PC-800 = $27,2 \cdot 1\,900\,000 = 51\,680\,000$ руб./год;

Автосамосвал Komatsu HD-465-7 и Volvo EC-750 = $26,3 \cdot 1\,400\,000 = 36\,820\,000$ руб./год;

Автосамосвал Komatsu HD-785-7 и Komatsu PC-1250 = $34,5 \cdot 4\,000\,000 = 138\,000\,000$ руб./год;

Автосамосвал БелАЗ-75131 и ЭКГ-10 = $28,1 \cdot 2\,400\,000 = 67\,440\,000$ руб./год;

Автосамосвал БелАЗ 75131 и Komatsu PC-2000 = $31,2 \cdot 3\,750\,000 = 117\,000\,000$ руб./год;

Автосамосвал БелАЗ-75306 и ЭКГ-18р = $36,8 \cdot 6\,285\,000 = 231\,288\,000$ руб./год;

Komatsu HD-830 и Komatsu PC-4000 = $46,7 \cdot 9\,500\,000 = 443\,650\,000$ руб./год.

При этом рассматриваемые комплексы полностью перекроют производственные объемы по взорванным породам в $31\,235\,000\text{ м}^3/\text{год}$, согласно проектной документации изучаемого горного предприятия.

Проверка обеспечения производственной мощности участка по вскрышным работам (коренные породы):

$V_{\text{взорв.породы}} = 1\,300\,000 + 700\,000 + 1\,900\,000 + 1\,400\,000 + 4\,000\,000 + 2\,400\,000 + 3\,750\,000 + 6\,285\,000 + 9\,500\,000 = 31\,250\,000\text{ м}^3$

$$V_{\text{взорв.пород.год}} = Q_{\text{экс.}}$$

$31\,250\,000\text{ м}^3/\text{год} = 31\,250\,000\text{ м}^3/\text{год}$ (условие выполнено)

Затраты экскаваторно-автомобильного комплекса на экскавацию 1 м^3 по коренным породам показаны на рис. 2.

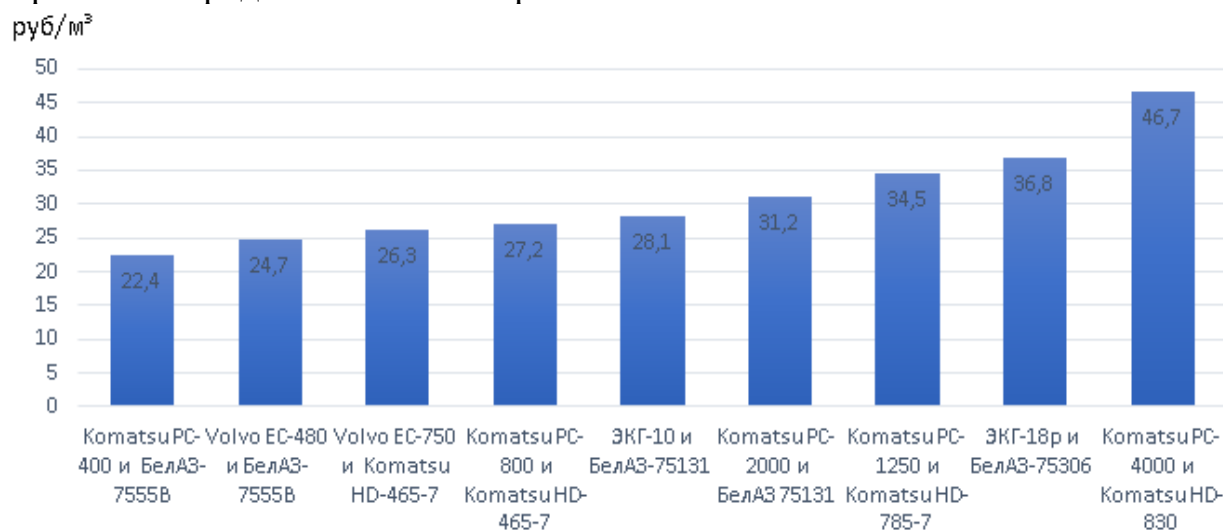


Рисунок 2 – Затраты ЭАК на экскавацию 1 м^3 по коренным породам.

Производительность ЭАК по вскрыше показана на рис. 3.

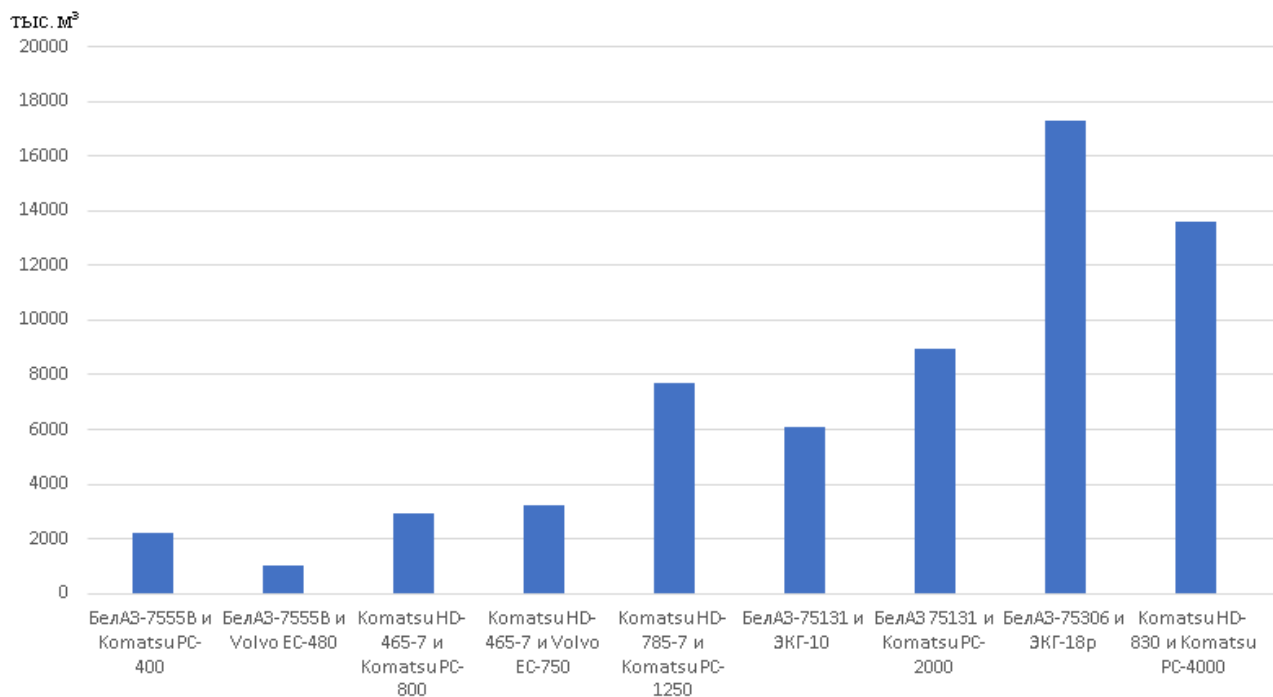


Рисунок 3 – Производительность ЭАК по вскрыше.

Удельные затраты на 1 м³ полезного ископаемого составляют (рис. 4):

БелАЗ-7555В и Volvo EC-300 = 31,1 руб/м³;

БелАЗ-7555В и Volvo EC-480 = 32,8 руб/м³;

Komatsu HD-465-7 и Komatsu PC-800 = 34,2 руб/м³;

Komatsu HD-465-7 и Volvo EC-750 = 35 руб/м³.

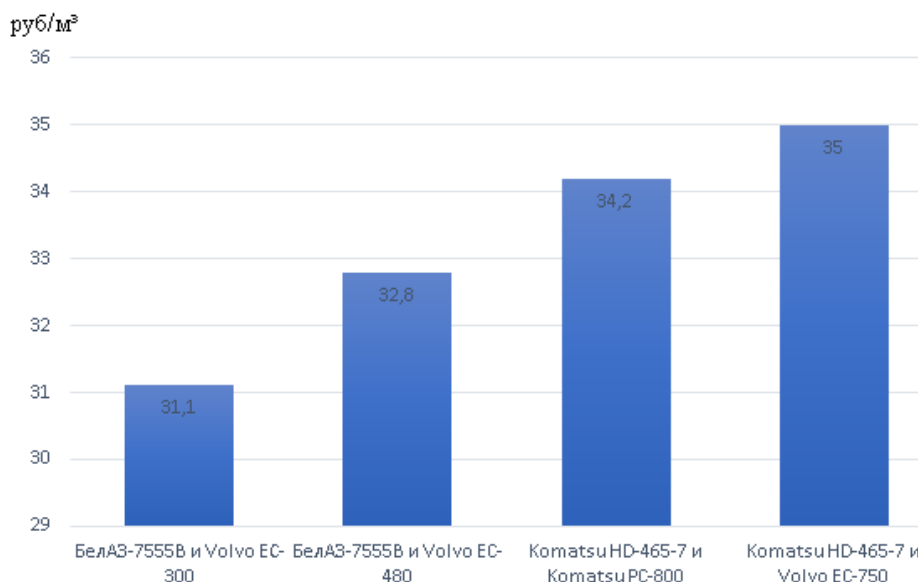


Рисунок 4 – Удельные затраты ЭАК на 1 м³ полезного ископаемого.

Себестоимость 1 тонны полезного ископаемого составляет:

БелАЗ-7555В и Volvo EC-300 = 6736 руб.;

БелАЗ-7555В и Volvo EC-480 = 6814 руб.;

Komatsu HD-465-7 и Komatsu PC-800 = 6921 руб.;

Komatsu HD-465-7 и Volvo EC-750 = 6987 руб.

Стоимость полезного ископаемого, в зависимости от годовой производительности комплекса:

БелАЗ-7555В и Volvo EC-300 = $360\,000 \cdot 1,35 \cdot 6736 = 3\,273\,696\,000$ руб.;

БелАЗ-7555В и Volvo EC-480 = $576\,000 \cdot 1,35 \cdot 6814 = 5\,298\,566\,400$ руб.;

Komatsu HD-465-7 и Komatsu PC-800 = $720\,000 \cdot 1,35 \cdot 6921 = 6\,727\,212\,000$ руб.;

Komatsu HD-465-7 и Volvo EC-750 = $744\,000 \cdot 1,35 \cdot 6987 = 7\,017\,742\,800$ руб.

Производительность ЭАК по добыче представлена на рис. 5.

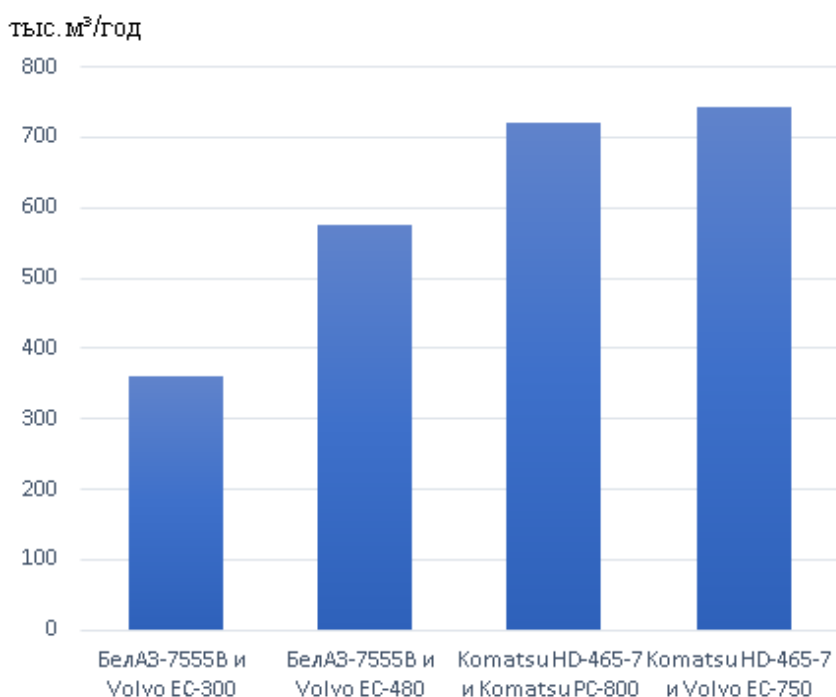


Рисунок 5 – Производительность ЭАК по полезному ископаемому.

Оптимизация процесса разработки вскрышных пород путем замены экскаваторно-автомобильных комплексов

В таблице 1 представлены значения затрат и значения производительности комплексов оборудования для четвертичных отложений.

В целях улучшения производственных показателей предприятия предлагается заменить существующие экскаваторно-автомобильные комплексы на более оптимальные. В результате замены ЭАК установлено, что общее число комплексов снизилось с 20 до 19, что позволяет получить определенную экономию затрат и, главное, уменьшилось и число видов комплексов с 9 до 6, что полностью оправдано с точки зрения унификации ремонтных работ и технического обслуживания ЭАК. Предлагаемый парк ЭАК представлен в таблице 2. В таблице 3 представлены значения затрат и производительности существующих комплексов оборудования по коренным породам, а в таблице 4 – то же для предлагаемого парка.

Таблица 1
 Техничко-экономические показатели работы существующих ЭАК по наносам

ЭАК	Кол-во комплексов	Затраты на 1 м ³ , руб/м ³	Затраты на 1 м ³ по всем комплексам, руб/м ³	Суммарная годовая производительность, тыс. м ³
БелАЗ-7555В и Komatsu PC-400	3	21,3	63,9	900
БелАЗ-7555В и Volvo EC-480	1	24,2	24,2	300
Komatsu HD-465-7 и Komatsu PC-800	2	25	50	1000
Komatsu HD-465-7 и Volvo EC-750	2	28,6	57,2	1800
Komatsu HD-785-7 и Komatsu PC-1250	3	34,3	102,9	3700
БелАЗ-75131 и ЭКГ-10	2	33,2	66,4	3700
БелАЗ 75131 и Komatsu PC-2000	2	40,3	80,6	5200
БелАЗ-75306 и ЭКГ-18	3	51,6	154,8	11000
Komatsu HD-830 и Komatsu PC-4000	2	35,7	71,4	4100
всего	20	-	671,4	32300

Таблица 2
 Техничко-экономические показатели предлагаемых ЭАК по наносам

ЭАК	Кол-во комплексов	Затраты на 1 м ³ , руб/м ³	Затраты на 1 м ³ по всем комплексам, руб/м ³	Годовая производительность, тыс. м ³
БелАЗ-7555В и Komatsu PC-400	4	21,3	85,2	1200
Komatsu HD-465-7 и Komatsu PC-800	2	25	50	1000
Komatsu HD-465-7 и Volvo EC-750	2	28,6	57,2	1800
БелАЗ-75131 и ЭКГ-10	3	33,2	99,6	5550
БелАЗ-75306 и ЭКГ-18	5	51,6	258	18333
Komatsu HD-830 и Komatsu PC-4000	3	35,7	107,1	6150
всего	19	-	657,1	34033

Таблица 3
 Техничко-экономические показатели существующих ЭАК по коренным породам

ЭАК	Кол-во комплексов	Затраты На 1 м ³ , руб/м ³	Затраты на 1 м ³ по всем комплексам, руб/м ³	Годовая производительность, тыс. м ³
БелАЗ-7555В и Komatsu PC-400	3	22,4	67,2	1300
БелАЗ-7555В и Volvo EC-480	1	24,7	24,7	700
Komatsu HD-465-7 и Komatsu PC-800	2	27,2	54,4	1900
Komatsu HD-465-7 и Volvo EC-750	2	26,3	52,6	1400
Komatsu HD-785-7 и Komatsu PC-1250	3	34,5	97,5	4000
БелАЗ-75131 и ЭКГ-10	2	28,1	56,2	2400
БелАЗ 75131 и Komatsu PC-2000	2	31,2	62,4	3750
БелАЗ-75306 и ЭКГ-18	3	36,8	110,4	6285
Komatsu HD-830 и Komatsu PC-4000	2	46,7	93,4	9500
всего	20	-	624,6	31235

Таблица 4

Технико-экономические показатели предлагаемых ЭАК по коренным породам

ЭАК	Кол-во комплексов	Затраты на 1 м ³ , руб/м ³	Затраты на 1 м ³ по всем комплексам, руб/м ³	Годовая производительность, тыс. м ³
БелАЗ-7555В и Komatsu PC-400	4	22,4	89,6	1733
Komatsu HD-465-7 и Komatsu PC-800	2	27,2	54,4	1900
Komatsu HD-465-7 и Volvo EC-750	2	26,3	52,6	1400
БелАЗ-75131 и ЭКГ-10	3	28,1	84,3	3600
БелАЗ-75306 и ЭКГ-18	5	36,8	184	10475
Komatsu HD-830 и Komatsu PC-4000	3	46,7	140,1	14250
всего	19	-	605	33358

В ходе проведенного анализа экономических показателей разработки вскрышных пород было выявлено, что затраты на экскавацию четвертичных отложений снизились на 14,3 руб/м³ (на 2,1%), по коренным породам на 19,6 руб/м³ (на 3,1%). Производительность по четвертичным отложениям увеличилась на 1733 тыс. м³ (5,4%), по взорванным породам – на 2123 тыс. м³ (7%).

Выводы

По результатам проведенного анализа экономических показателей разработки вскрышных пород методом симплификации можно сделать следующие выводы:

- Затраты по четвертичным отложениям снизились на 14,3 руб/м³, что соответствует уменьшению на 2,1%;

- Затраты по коренным породам снизились на 19,6 руб/м³ что соответствует уменьшению на 3,1%.

Снижение затрат указывает на успешную оптимизацию экскаваторно-автомобильного комплекса.

Кроме того, наблюдается положительная динамика в производительности: по четвертичным отложениям. Она увеличилась на 1733 тыс. м³, что составляет 5,4% роста, а по коренным породам – на 2123 тыс. м³, что равно 7% роста. Это указывает на успешное внедрение эффективных методов разработки и управления ресурсами, что, в свою очередь, может способствовать улучшению экономических показателей в целом.

Литература

1. Кацубин, А.В. Систематизация горно-геологических условий угленасыщенных и безугольных зон разрезов Кузбасса / А.В. Кацубин, А.А. Федотов // Техника и технология горного дела. – 2019. – № 3(6). – С. 60-75. – DOI 10.26730/2618-7434-2019-3-60-75. – EDN HJEPXD.

2. Мартьянов, В.Л. Оценка сложности отработки карьерных полей угольных месторождений Кузбасса / В.Л. Мартьянов // Техника и технология горного дела. – 2018. – № 1(1). – С. 35-42. – DOI 10.26730/2618-7434-2018-1-35-41. – EDN XUFBJJ.

3. Influence of geotechnical factors on the output of quarry haul trucks / D. M. Dubinkin, V. V. Aksenov, A. A. Khoreshok [et al.] // AIP Conference Proceedings : IV INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE ON INNOVATIONS IN ENGINEERING AND TECHNOLOGY (ISPCIET 2021), Veliky Novgorod, Russia, 28–29 июня 2021 года. Vol. 2486. – Veliky Novgorod, Russia: AIP PUBLISHING, 2022. – P. 040009. – DOI 10.1063/5.0106051. – EDN WUNTIO.

4. On the mutual influence of average speed, trip time and hauling distance of quarry haul trucks / D. M. Dubinkin, V. V. Aksenov, A. A. Khoreshok [et al.] // AIP Conference Proceedings : IV INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE ON INNOVATIONS IN ENGINEERING AND TECHNOLOGY (ISPCIET 2021), Veliky Novgorod, Russia, 28–29 июня 2021 года. Vol. 2486. – Veliky Novgorod, Russia: AIP PUBLISHING, 2022. – P. 040017. – DOI 10.1063/5.0106089. – EDN AHJYAG.

5. Evaluating the impact of excavator bucket capacity on the output of a haul truck in different variants of their positioning / V. V. Aksenov, D. M. Dubinkin, A. A. Khoreshok [et al.] // Journal of Physics: Conference Series : 3, Veliky Novgorod, 06–07 сентября 2021 года. Vol. 2052. – RUS: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 012001. – DOI 10.1088/1742-6596/2052/1/012001. – EDN YQHOME.

6. Selection of Excavating Equipment for the Outpacing Development of the Coal-bearing Zone / A. Katsubin, S. Markov, A. Khoreshok, M. Tyulenev // E3S Web of Conferences : 5, Kemerovo, 19–21 октября 2020 года. – Kemerovo, 2020. – P. 01027. – DOI 10.1051/e3sconf/202017401027. – EDN QSHLYV.

7. Анализ методик расчета производительности карьерных гидравлических экскаваторов / О.И. Литвин, А.А. Хорешок, Д.М. Дубинкин [и др.] // Горная промышленность. – 2022. – № 5. – С. 112-120. – DOI 10.30686/1609-9192-2022-5-112-120. – EDN UQIXQR.

8. Формирование выемочно-погрузочных комплексов и технологических схем ведения горных работ в угленасыщенных зонах разрезов / В.Ф. Колесников, А.И. Корякин, В.А. Ермолаев, В.Ф. Воронков // Техника и технология горного дела. – 2023. – № 2(21). – С. 26-58. – DOI 10.26730/2618-7434-2023-2-26-58. – EDN LCAFPL.

9. Анализ методик расчета производительности карьерных гидравлических экскаваторов / О.И. Литвин, А.А. Хорешок, Д.М. Дубинкин [и др.] // Горная промышленность. – 2022. – № 5. – С. 112-120. – DOI 10.30686/1609-9192-2022-5-112-120. – EDN UQIXQR.

10. Самусев, П. А. Исследование влияния технологических процессов добычи угля на его грансостав / П. А. Самусев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 1999. – № 2(9). – С. 50-51. – EDN WPUIDV.

11. Бирюков, А. В. Прогнозирование гранулометрического состава угля / А. В. Бирюков, С. И. Протасов, П. А. Самусев // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири, Кемерово, 11–14 ноября 1997 года. Том Часть 1. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 1997. – С. 165-166. – EDN WXYVTF.

12. Determination of Seismic Safe Distances During Mining Blasts with Consideration of a Dominant Vibration Frequency / A. G. Novinkov, A. S. Tashkinov, S. I. Protasov, P. A. Samusev // Coal in the 21st Century: Mining, Processing and Safety, Kemerovo, Russia, 10–12 октября 2016 года. – Kemerovo, Russia: ATLANTIS PRESS, 2016. – P. 202-205. – EDN WNWLVZ.

13. Новиньков, А. Г. Практический метод учета преобладающей частоты колебаний при определении сейсмо-безопасных расстояний при ведении взрывных работ на карьерах / А. Г. Новиньков, С. И. Протасов, П. А. Самусев // Взрывное дело. – 2016. – № 115-72. – С. 214-225. – EDN WCLGIZ.

14. Сейсмическая безопасность подземного газопровода при массовых промышленных взрывах на угольном карьере / А. Г. Новиньков, С. И. Протасов, П. А. Самусев, А. С. Гукин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2013. – № 6(100). – С. 51-55. – EDN RUDWTX.

15. Сравнительная оценка сейсмического действия массовых взрывов при применении различных систем инициирования / П. А. Самусев, А. Г. Новиньков, С. И. Протасов, А. Н. Завьялов // Взрывное дело. – 2023. – № 141-98. – С. 107-133. – EDN IHJKJF.

16. Самусев, П. А. Определение дальности разлета отдельных кусков породы при взрывании скважинных зарядов рыхления / П. А. Самусев, А. Г. Новиньков, С. И. Протасов // Техника и технология горного дела. – 2023. – № 4(23). – С. 4-25. – DOI 10.26730/2618-7434-2023-4-4-25. – EDN EMPGJG.