Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ
Направление – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте

https://doi.org/10.17816/transsyst635921

© И.И Вашлаев[1, 2], А.Г. Михайлов[1, 2], А.Е. Зуев[1]
[1] Институт химии и химической технологии – Обособленное подразделение ФГБУН Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр» СО РАН (Красноярск, Россия)
[2] Сибирский федеральный университет (Красноярск, Россия)

ОПТИМИЗАЦИЯ ГРУЗОПОТОКОВ ГОРНОЙ МАССЫ ПРИ ВЕЕРНОЙ ОТРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Обоснование. Приведена методика аналитического определения оптимального распределения грузопотоков при перевозке горной массы автомобильным транспортом с учетом приведенного расстояния транспортирования. В качестве параметра, по которому производится оптимизация, принята транспортная работа – произведение объема горной массы на расстояние транспортирования. Суть метода заключается в изучении различных вариантов грузопотоков при отработке клиновидных блоков, определения транспортной работы и оптимизации ее на основе известных математических методов. С этой целью используется метод определения экстремума функции. В качестве альтернативного (дополнительного) метода можно использовать графический метод.

Цель. Снижение транспортных расходов на вывозку горной массы путем оптимизации грузопотоков автомобильного транспорта.

Методы. Аналитические методы, математический метод нахождения экстремума, методы математической статистики.

Результаты. Разработана методика оптимизации грузопотоков горной массы при веерной разработке месторождения.

Заключение. Результаты исследования позволяют обосновать оптимальный вариант распределения грузопотоков горной массы при веерной разработке месторождения. Предложенная методика оптимизации может быть использована и для других систем разработки, когда имеется несколько трасс транспортирования с одного уступа.

Ключевые слова: Приведенное расстояние транспортирования; клиновидный блок; грузопоток; оптимизация; транспортная работа; веерное подвигание; фронт работ.

Как цитировать:
Вашлаев И.И. Михайлов А.Г., Зуев А.Е. Оптимизация грузопотоков горной массы при веерной отработке месторождения // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 4. С. 598–617. doi: 10.17816/transsyst635921

Исследование выполнено при поддержке проекта №. FWES-2021-0014 Фундаментальные исследования ИХХТ СО РАН

Received: 11.09.2024 **Revised: 11.10.2024** **Accepted: 25.12.2024**
Поступил: 11.09.2024 **Одобрена: 11.10.2024** **Принята: 25.12.2024**

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH
Subject – Transport and transport-technological systems of the country, its regions and cities, organization of production in transport

© I.I. Vashlaev[1, 2], A.G. Mikhailov[1, 2], A.E. Zuev[1]
[1] Institute of Chemistry and Chemical Technology – Separate Division of the Federal State Budgetary Institution of the Federal Research Center "Krasnoyarsk Scientific Center" SB RAS (Krasnoyarsk, Russia)
[2] Siberian Federal University
(Krasnoyarsk, Russia)

OPTIMIZATION OF MINE MASS CARGO FLOWS DURING FAN MINING OF THE FIELD

Background. A method is presented for analytically determining the optimal distribution of cargo flows during rock mass transportation by road, factoring in the given transportation distance. The key parameter for optimization is transport work, defined as the product of the volume of the rock mass and the transportation distance. This method involves exploring various cargo flow scenarios when developing wedge-shaped blocks, determining the transport work and optimizing it based on well-known mathematical methods. For this purpose, the extremum of the function is determined. As an alternative (additional), you can use the graphical method.

Aim. Reduce transportation costs for rock mass removal by optimizing road transport cargo flows.

Methods. Analytical methods, mathematical approaches to finding the extremum, methods of mathematical statistics.

Results. A methodology was developed to optimize rock mass cargo flows during the fan-shaped development of a field.

Conclusion. This study provides a foundation for determining the optimal distribution of rock cargo flows in fan-shaped field development. The proposed optimization technique can be used in other development systems with multiple transportation routes from one ledge.

Keywords: Reduced transportation distance; wedge-shaped block; cargo flow; optimization; transport work; fan propulsion; work front.

To cite this article:
Vashlaev II, Mikhailov AG, Zuev AT. Optimization of mine mass cargo flows during fan mining of the field. *Modern Transportation Systems and Technologies.* 2024;10(4):598–617. doi: 10.17816/transsyst635921

ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности добычи полезных ископаемых неразрывно связано со снижением расходов на транспортирование горных пород. Снижение затрат на транспортирование является одним из основных резервов повышения эффективности добычи полезных ископаемых. Требует своего изучения и оптимизация транспортных работ при веерной системе разработки месторождений. Так веерная центральная система разработки применяется при округлой и близкой к треугольной конфигурации карьерного поля, позволяющей удобно расположить постоянный поворотный пункт [1]. Изучению параметров веерного подвигания фронта горных работ посвящены работы [2–8].

В работах [2, 3] показана возможность весьма значительного снижения себестоимости транспортных работ в зависимости от порядка отработки клиновидных блоков и перемещения вскрышных пород в пределах фронта работ на уступе. Исследование проводилось для условий отработки с горизонтальным уклоном уступа. На практике пластовые месторождения в основном представлены слабонаклонными или наклонными. Поэтому необходимо обоснование порядка отработки клиновидных блоков и оптимизация грузопотоков пород вскрыши с учетом различного уклона фронта работ, полного расстояния транспортирования (от забоя до места разгрузки), качества дорожного полотна каждого участка трассы.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПТИМИЗАЦИИ ГРУЗОПОТОКОВ ВСКРЫШНЫХ ПОРОД ПРИ ВЕЕРНОЙ ОТРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Схема отработки вскрышных пород при веерной системе разработки месторождения представлена на Рис. 1. В технологической схеме в качестве выемочно-погрузочного оборудования приняты экскаваторы типа мехлопата, а транспортирование пород производится автосамосвалами БелАЗ–75145.

В качестве параметра, по которому производится оптимизация, принята транспортная работа – произведение объема горной массы на расстояние транспортирования, так как от нее напрямую зависят денежные затраты на транспортирование и в целом затраты на добычу полезного ископаемого.

Объектом исследования в данной работе является клиновидный блок, схема отработки которого приведена на Рис. 1. Клиновидный

Received: 11.09.2024 Revised: 11.10.2024 Accepted: 25.12.2024
Поступил: 11.09.2024 Одобрена: 11.10.2024 Принята: 25.12.2024

блок разбивается на условные участки, границы которых обозначены пикетами (Рис. 2). Расстояние между пикетами должно быть в пределах 50–100 м, что обеспечивает, по нашему мнению, достаточную точность расчетов. В данной работе количество участков принято равным 30 единицам, расстояние между пикетами равно 100 м. Высота уступа (h) составляет 10 м. Площадь каждого элементарного участка определяется по методике, приведенной в работе [2]. При изучении рассматривается порядок разработки клиновидных блоков экскаваторно-автомобильными комплексами двумя вариантами:

- Вариант 1 – отработка блоков ведется от широкой стороны в направлении узкой (от 30 пикета к 0) (Рис. 2), транспортирование пород производится через левый фланг фронта горных работ;
- Вариант 2 – отработка блоков ведется от узкой стороны в направлении широкой (от 0 пикета к 30) (Рис. 2), транспортирование пород производится через правый фланг фронта горных работ.

Длина транспортирования по варианту 1 составит

$$L_{л}=l_{бi} + 2l_{су} + l_1 + l_{ол} + l_{со} + l_{о}, \text{ м}$$

где $L_{л}$ – расстояние транспортирования через левый фланг фронта работ, м; $l_{су}$ – длина съезда на уступе, м; l_1 – расстояние между съездами, м; $l_{ол}$ – расстояние от съезда до отвала, м; $l_{о2}$ – длина съезда на отвале, м.

С целью надежной и объективной оценки работы автомобильного транспорта и управления процессом транспортирования множество основных горнотехнических параметров транспортирования следует выразить через интегральный показатель. Таким интегральным показателем является приведенное к горизонтальному эквиваленту расстояние транспортирования горной массы, которое определяется исходя из условия равенства энергий, необходимых для перемещения груза на наклонном и горизонтальном участках. Впервые это было предложено в работах Галкина В.А. и Яковлева В.Л. [9, 10]. Дальнейшее развитие эти идеи получили в работах [11–17].

Длину автомобильной трассы предлагается оценивать формулой [13, 14]:

$$L_{пр}^{Б} = L_{пр}\,\omega_{о\ ср} / \omega_{о\ Б}, \text{ м} \quad (1)$$

где $L_{пр}^{Б}$ – базовое приведенное расстояние транспортирования, м; $L_{пр}$ – приведенное расстояние, учитывающее такие параметры как удельное

Received: 11.09.2024 Revised: 11.10.2024 Accepted: 25.12.2024
Поступил: 11.09.2024 Одобрена: 11.10.2024 Принята: 25.12.2024

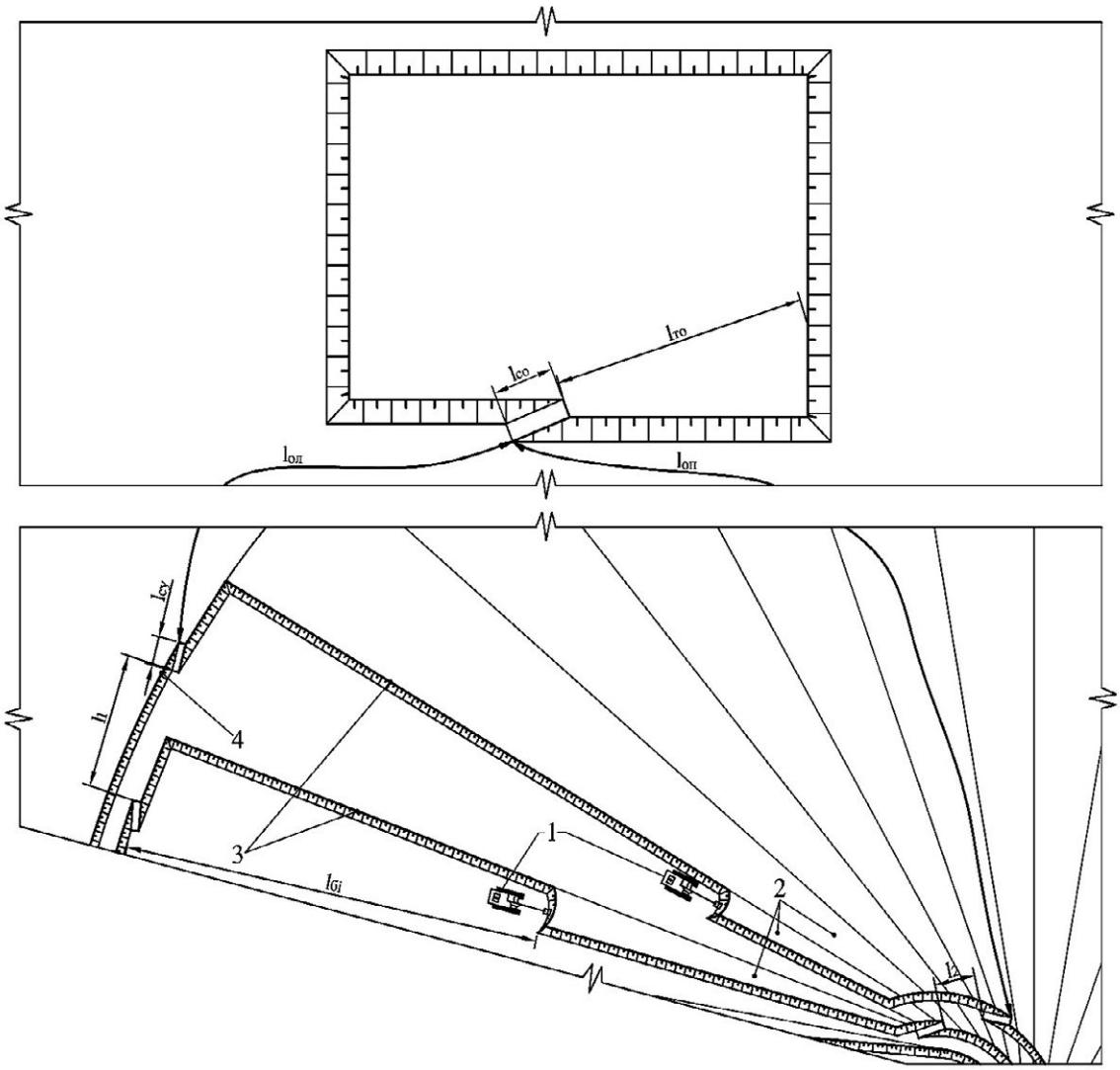

Рис. 1. Технологическая схема разработки вскрышных пород при веерной системе разработки несколькими уступами: *1* – выемочно- погрузочные комплексы цикличного действия; *2* – клиновидно-эксплуатационный блок (КЭБ); *3* – линии фронта горных работ на горизонте; $l_{ол}$ – расстояние транспортирования на уступе со стороны левого фланга до съезда отвала; $l_{оп}$ – расстояние транспортирования на уступе со стороны правого фланга до съезда отвала; $l_{су}$ – длина съезда уступа; $l_{со}$ – длина съезда отвала; l_1 – расстояние между съездами на левом фланге горных работ; l_2 – расстояние между съездами на правом фланге горных работ; $l_{то}$ – расстояние транспортирования от съезда отвала до фронта разгрузки

Fig. 1. Development plan for overburden rocks with a fan system of several ledges: *1* – extraction and loading complexes of cyclic action; *2* – wedge-shaped operational unit (KEB); *3* – the mining front line on the horizon; $l_{ол}$ – the distance of transportation on the ledge from the left flank to the dump exit; $l_{оп}$ – the distance of transportation on the ledge from the right flank to the dump exit; $l_{су}$ – the length of the ledge exit; $l_{со}$ – the length of the dump exit; l_1 – the distance between the exits on the left flank of mining operations; l_2 – the distance between the exits on the right flank of mining operations; $l_{то}$ – the distance of transportation of the dump exit to the unloading front

Received: 11.09.2024 Revised: 11.10.2024 Accepted: 25.12.2024
Поступил: 11.09.2024 Одобрена: 11.10.2024 Принята: 25.12.2024

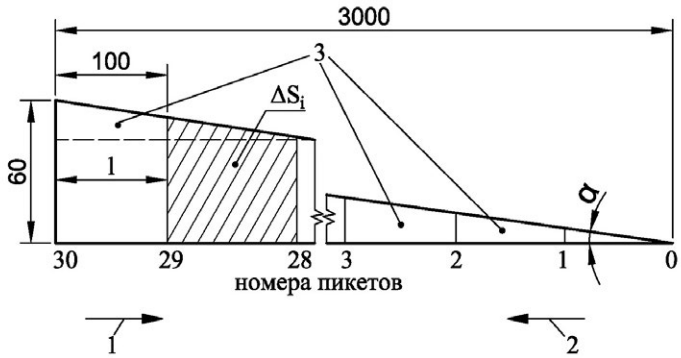

Рис. 2. Схема клиновидного блока в плане: *1* – направление подвигания забоя по варианту 1; *2* – направление подвигания забоя по варианту 2; *3* – элементарные блоки

Fig. 2. Diagram of wedge-shaped block in plan: *1* – direction of face movement according to option 1; *2* – direction of the face movement according to option 2; *3* – elementary blocks

сопротивление движению автосамосвала на элементарных участках трассы, уклон отдельных участков, коэффициент тары автосамосвала и коэффициент использования грузоподъемности, м; $\omega_{о\ ср}$ – средневзвешенное удельное основное сопротивление движению трассы, Н/кН; $\omega_{об}$ – базовое удельное основное сопротивление движению, Н/кН. Базовое (эталонное) удельное основное сопротивление движению необходимо для сопоставимости транспортной работы при различных средних удельных сопротивлениях отдельных трасс (маршрутов), величина, которой принимается по усмотрению эксперта.

Коэффициенты приведения на подъем груза $Э_п$ и спуск $Э_с$ участка трассы с уклоном i (‰) и удельным основным сопротивлением движению ω_0, (Н/кН):

- при $i \leq \omega_0$

$$Э_п = \frac{1000K_Г}{\omega_0(K_Г + 2K_Т)}, \text{ м/м} \quad (2)$$

$$Э_с = -\frac{1000K_Г}{\omega_0(K_Г + 2K_Т)}, \text{ м/м} \quad (3)$$

- при $i > \omega_0$

$$Э_п = \frac{1000\left(K_Г + K_Т\left(1 - \frac{\omega_0}{i}\right)\right)}{\omega_0(K_Г + 2K_Т)}, \text{ м/м} \quad (4)$$

Received: 11.09.2024 Revised: 11.10.2024 Accepted: 25.12.2024
Поступил: 11.09.2024 Одобрена: 11.10.2024 Принята: 25.12.2024

$$Э_с = \frac{1000(K_Т - (K_Г + K_Т)\frac{\omega_0}{i})}{\omega_0(K_Г + 2K_Т)}, \text{ м/м} \quad (5)$$

где $K_Т$ – коэффициент тары автосамосвала; $K_Г$ – коэффициент использования грузоподъемности.

Приведенное расстояние трассы ($L_{пр}$) следует определять на основании формулы (6), исходя из известных параметров

$$L_{пр} = \sum_{j=1}^{n} L_j + 0.001\sum_{j=1}^{n} i_j L_j Э_j, \text{ м} \quad (6)$$

где L_j, i_j, $Э_j$ – соответственно фактическая длина, уклон и коэффициент приведения j-го участка трассы ($j=1...n$).

Для сопоставимости трассы с различным дорожным покрытием приводятся к средневзвешенной величине основного удельного сопротивления движению ($\omega_{о\ ср}$)

$$\omega_{о\ ср} = (\sum_{j=1}^{n} \omega_{oj} L_j + 0.001\sum_{j=1}^{n} \omega_{oj} i_j L_j Э_j) / L_{пр}, \text{ Н/кН}, \quad (7)$$

где ω_{oj} – удельное основное сопротивление движению j-го участка трассы, $j = \overline{1,n}$, Н/кН, а затем приведением к базовому основному удельному сопротивлению движению ($\omega_{oб}$)

В данном примере при изучении грузопотоков нами приняты различные горнотехнических условия разработки месторождения:

- горизонтальный уклон уступа;
- уклон в сторону левого фланга 10 ‰;
- уклон в сторону правого фланга 10 ‰.

Исходные данные для дорог при отработке горизонтального клиновидного блока по первому и второму вариантам (Рис. 1, 2) приведены в Табл. 1. Фактическое расстояние транспортирования породы по маршруту № 1 от границы начала съезда нижнего уступа на левом фланге до места разгрузки на отвале составляет 4285 м. При транспортировании породы через правый фланг (маршрут № 2) от границы начала съезда нижнего уступа на правом фланге до места разгрузки на отвале фактическое расстояние равно 4362 м.

Необходимо рассчитать следующие параметры транспортных работ: приведенное базовое расстояние транспортирования $L^{Б}_{пр i}$, м; объем каждого элементарного блока $V_i = \Delta S h$, тыс.м^3; транспортная работа по элементарному блоку $V_i L^{Б}_{пр i}$ тыс.м^3·км; кумулятивная транспортная

Received: 11.09.2024 Revised: 11.10.2024 Accepted: 25.12.2024
Поступил: 11.09.2024 Одобрена: 11.10.2024 Принята: 25.12.2024

работа $\sum V_i L^{Б}_{пр\,i}$, тыс.м^3·км; кумулятивные объёмы $\sum V_i$, тыс.м^3 и базовое средневзвешенное расстояние транспортирования $L^{Б}_{пр\,ср}$, км. Все расчетные параметры приведены в Табл. 2 и 3.

Таблица 1. *Удельные сопротивления качению на элементарных участках дороги по вариантам отработки с горизонтальным клиновидным блоком*

Table 1. Rolling resistance at elementary road sections by mining options with horizontal wedge block

Условные обозначения участков дорог	$l_{бi}$	$l_{су}$	l_1	$l_{ол}$	l_2	$l_{оп}$	$l_{со}$	$l_о$
Вариант 1								
Длина участка, м	0–3000	143	70	2600	–	–	429	900
i, ‰	0	70	0	0	–	–	70	0
ω, Н/кН	60	40	40	35	–	–	35	70
Вариант 2								
Длина участка, м	0–3000	143	–	–	47	2700	429	900
i, ‰	0	70	–	–	0	0	70	0
ω, Н/кН	60	40	–	–	40	35	35	70

По транспортной работе строятся графики нарастающих объемов в зависимости от порядка отработки блоков (направления грузопотока) (Рис. 3) и по стандартным программам математической статистики вычисляются уравнения регрессии зависимости кумулятивной транспортной работы от порядка отработки блоков. Из графика (Рис. 3) и Табл. 1 и 2, видно, что при отработке клиновидного блока со стороны левого фланга в сторону правого и направлении грузопотока через левый фланг вариант 1 экономичнее варианта 2 на 1407 тыс.м^3·км (23,2%). Если принять ориентировочно себестоимость транспортирования 1 т/км равным 4 руб., то при плотности пород 1,6 т/м^3 это составит 9005 тыс. руб.

Теперь рассмотрим отработку блоков, при которой грузопотоки направляются через левый и правый фланги (комбинация грузопотоков): горная масса левее *i*-го пикета вывозится по трассе через левый фланг, а правее его – через правый фланг. Оптимальный вариант грузоперевозок будет при минимальном объеме транспортных работ. В работе [2] было предложено определять оптимальный вариант грузоперевозок при равенстве транспортных работ для различных вариантов. При данном подходе находится значение близкое к оптимальному, но с точки зрения физики процесса и математики не является однозначно оптимальным. Наиболее

Received: 11.09.2024 Revised: 11.10.2024 Accepted: 25.12.2024
Поступил: 11.09.2024 Одобрена: 11.10.2024 Принята: 25.12.2024

простым методом определения оптимальных грузопотоков является графический: строится график зависимости объема транспортных работ от порядка отработки клиновидных блоков (Рис. 4). Из графика видно, что оптимальным является комбинация грузопотоков по 15 пикету. Из Табл.2 видно, что наименьший объем транспортных работ равен 5748,5 тыс.м^3·км.

Существует математический метод определения минимума (экстремума) функции кубического уравнения.

1. Найти производную $f'(x)$.
2. Найти критические точки $f'(x)=0$.
3. Найти вторую производную $f''(x)$.
4. Исследовать знак второй производной в каждой из критических точек. Если при этом вторая производная окажется отрицательной, то функция в такой точке имеет максимум, а если положительной, то – минимум. Если же вторая производная равна нулю, то экстремум надо искать с помощью первой производной.
5. Вычислить значения в точках экстремума.

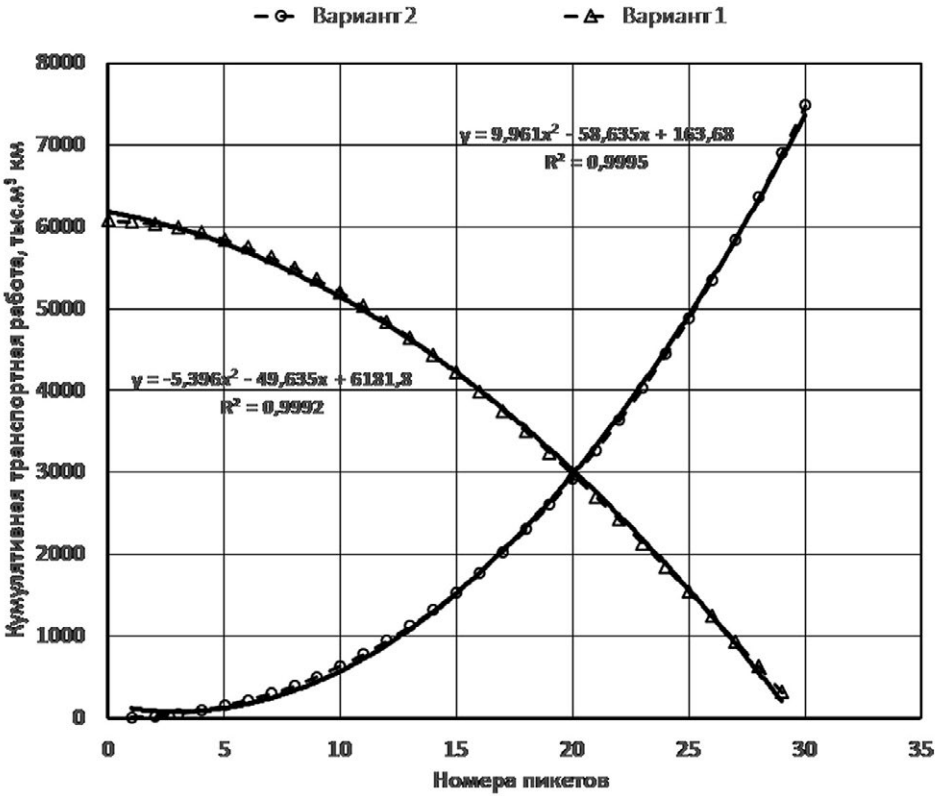

Рис. 3. Изменение нарастающих объемов транспортной работы от порядка отработки элементарных участков и направления грузопотоков

Fig. 3. Change in increasing volumes of transport work from the procedure for working out elementary sections and the direction of cargo flows

Received: 11.09.2024 Revised: 11.10.2024 Accepted: 25.12.2024
Поступил: 11.09.2024 Одобрена: 11.10.2024 Принята: 25.12.2024

Таблица 2. *Транспортирование через левый фланг фронта работ (вариант 1)*

Table 2. *Transportation through the left flank of the work front (option 1)*

№ пикета	Расстояние транспортирования ($L^{Б}_{пр\ i}$), м	ΔS_i, тыс. м^2	V_i, тыс. м^3	$V_i L^{Б}_{пр\ i}$, тыс. м^3·км	$\sum V_i L^{Б}_{пр\ i}$, тыс. м^3·км	$\sum V_i$, тыс. м^3	Кумулятивная транспортная работа при комбинации грузопотоков, тыс. м^3·км
29	5321,0	5,90	59,0	313,94	313,94	59,00	7218,67
28	5471,0	5,70	57,0	311,85	625,79	116,00	6984,11
27	5621,0	5,50	55,0	309,16	934,94	171,00	6774,29
26	5771,0	5,30	53,0	305,86	1240,80	224,00	6587,99
25	5921,0	5,10	51,0	301,97	1542,78	275,00	6424,03
24	6071,0	4,90	49,0	297,48	1840,25	324,00	6281,19
23	6221,0	4,70	47,0	292,39	2132,64	371,00	6158,29
22	6371,0	4,50	45,0	286,70	2419,34	416,00	6054,11
21	6521,0	4,30	43,0	280,40	2699,74	459,00	5967,47
20	6671,0	4,10	41,0	273,51	2973,25	500,00	5897,15
19	6821,0	3,90	39,0	266,02	3239,27	539,00	5841,97
18	6971,0	3,70	37,0	257,93	3497,20	576,00	5800,71
17	7121,0	3,50	35,0	249,24	3746,43	611,00	5772,19
16	7271,0	3,30	33,0	239,94	3986,37	644,00	5755,19
15	7421,0	3,10	31,0	230,05	4216,43	675,00	5748,53
14	7571,0	2,90	29,0	219,56	4435,98	704,00	5750,99
13	7721,0	2,70	27,0	208,47	4644,45	731,00	5761,39
12	7871,0	2,50	25,0	196,78	4841,23	756,00	5778,51
11	8021,0	2,30	23,0	184,48	5025,71	779,00	5801,17
10	8171,0	2,10	21,0	171,59	5197,30	800,00	5828,15
9	8321,0	1,90	19,0	158,10	5355,40	819,00	5858,27
8	8471,0	1,70	17,0	144,01	5499,41	836,00	5890,31
7	8621,0	1,50	15,0	129,32	5628,72	851,00	5923,09
6	8771,0	1,30	13,0	114,02	5742,74	864,00	5955,39
5	8921,0	1,10	11,0	98,13	5840,88	875,00	5986,03
4	9071,0	0,90	9,0	81,64	5922,51	884,00	6013,79
3	9221,0	0,70	7,0	64,55	5987,06	891,00	6037,49
2	9371,0	0,50	5,0	46,85	6033,92	896,00	6055,91
1	9521,0	0,30	3,0	28,56	6062,48	899,00	6067,87
0	9671,0	0,10	1,0	9,67	6072,15	900,00	6072,15

Received: 11.09.2024 Revised: 11.10.2024 Accepted: 25.12.2024
Поступил: 11.09.2024 Одобрена: 11.10.2024 Принята: 25.12.2024

Таблица 3. *Транспортирование через правый фланг фронта работ (вариант 2)*
Table 3. *Transportation through the right flank of the work front (option 2)*

№ пикета	Расстояние транспортирования ($L^{Б}_{пр\ i}$), м	ΔS_i, тыс. м^2	V_i, тыс. м^3	$V_i L^{Б}_{пр\ i}$, тыс. м^3·км	$\sum V_i L^{Б}_{пр\ i}$, тыс. м^3·км	$\sum V_i$, тыс. м^3	Кумулятивная транспортная работа при комбинации грузопотоков, тыс. м^3·км
1	5386,0	0,10	1,0	5,39	5,39	1,00	6067,87
2	5536,0	0,30	3,0	16,61	21,99	4,00	6055,91
3	5686,0	0,50	5,0	28,43	50,42	9,00	6037,49
4	5836,0	0,70	7,0	40,85	91,28	16,00	6013,79
5	5986,0	0,90	9,0	53,87	145,15	25,00	5986,03
6	6136,0	1,10	11,0	67,50	212,65	36,00	5955,39
7	6286,0	1,30	13,0	81,72	294,36	49,00	5923,09
8	6436,0	1,50	15,0	96,54	390,90	64,00	5890,31
9	6586,0	1,70	17,0	111,96	502,87	81,00	5858,27
10	6736,0	1,90	19,0	127,98	630,85	100,00	5828,15
11	6886,0	2,10	21,0	144,61	775,46	121,00	5801,17
12	7036,0	2,30	23,0	161,83	937,28	144,00	5778,51
13	7186,0	2,50	25,0	179,65	1116,93	169,00	5761,39
14	7336,0	2,70	27,0	198,07	1315,01	196,00	5750,99
15	7486,0	2,90	29,0	217,09	1532,10	225,00	5748,53
16	7636,0	3,10	31,0	236,72	1768,82	256,00	5755,19
17	7786,0	3,30	33,0	256,94	2025,75	289,00	5772,19
18	7936,0	3,50	35,0	277,76	2303,51	324,00	5800,71
19	8086,0	3,70	37,0	299,18	2602,70	361,00	5841,97
20	8236,0	3,90	39,0	321,20	2923,90	400,00	5897,15
21	8386,0	4,10	41,0	343,83	3267,73	441,00	5967,47
22	8536,0	4,30	43,0	367,05	3634,77	484,00	6054,11
23	8686,0	4,50	45,0	390,87	4025,64	529,00	6158,29
24	8836,0	4,70	47,0	415,29	4440,94	576,00	6281,19
25	8986,0	4,90	49,0	440,31	4881,25	625,00	6424,03
26	9136,0	5,10	51,0	465,94	5347,19	676,00	6587,99
27	9286,0	5,30	53,0	492,16	5839,34	729,00	6774,29
28	9436,0	5,50	55,0	518,98	6358,32	784,00	6984,11
29	9586,0	5,70	57,0	546,40	6904,73	841,00	7218,67
30	9736,0	5,90	59,0	574,42	7479,15	900,00	7479,15

Received: 11.09.2024
Поступил: 11.09.2024
Revised: 11.10.2024
Одобрена: 11.10.2024
Accepted: 25.12.2024
Принята: 25.12.2024

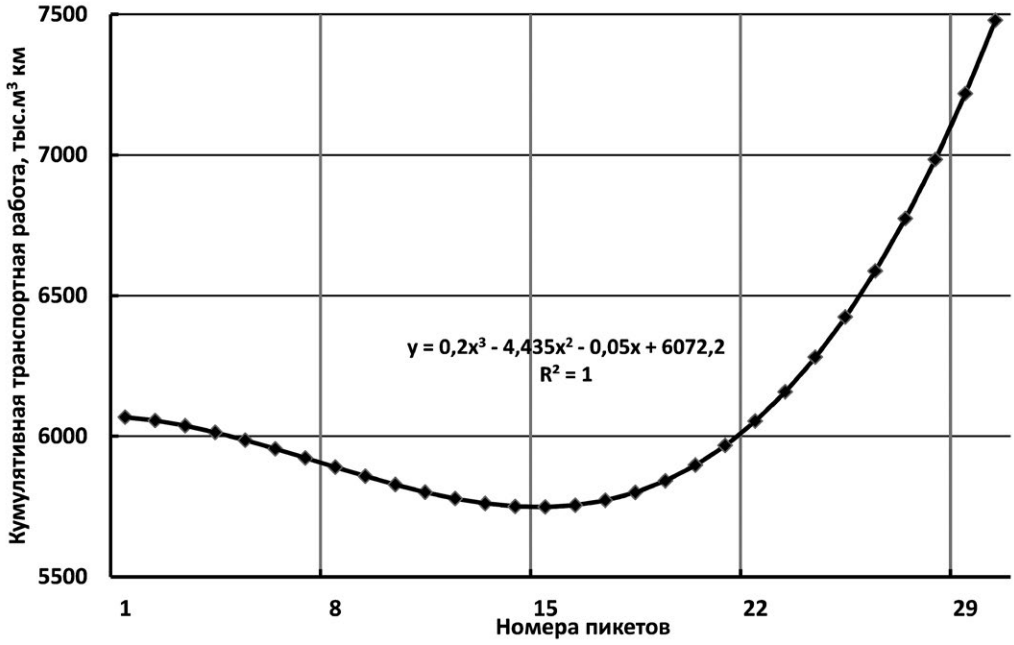

Рис. 4. Зависимость кумулятивной транспортной работы при комбинированном распределении грузопотоков с горизонтальной рабочей площадкой

Fig. 4. Dependence of cumulative transport work in case of combined distribution of cargo flows with a horizontal work site

По вышеизложенной методике для рассматриваемого случая

$$y = 0{,}2x^3 - 4{,}435x^2 - 0{,}05x + 6072{,}2$$

найдены критические точки x_1=15.21 и x_2=30. Минимум объёма транспортной работы соответствует точке 15,21 и равен 5749 тыс. м^3·км, что соответствует и данным Табл. 2 (выделено цветом). Реализация оптимального решения будет выглядеть следующим образом: граница разделения грузопотоков 1521 м (15,21·100 м) длины блока, левая часть клиновидного блока должна быть вывезена через левый фланг, а правая – через правый.

Представляет интерес для изучения влияние уклона клиновидного блока на объемы транспортных работ. По аналогии с вышеизложенной методикой рассмотрим параметры транспортных работ с уклоном клиновидного блока 10‰ к левому флангу, а затем к правому.

Расчетные данные при уклоне рабочей площадки в сторону левого фланга фронта работ приведены в Табл. 4 и на их основе построен график кумулятивной транспортной работы при комбинации грузопотоков (Рис. 5). Минимальное значение транспортной работы соответствует точке фронта работ 1382 м, т.е. произошло смещение оптимума в сторону правого фланга

Received: 11.09.2024 Revised: 11.10.2024 Accepted: 25.12.2024
Поступил: 11.09.2024 Одобрена: 11.10.2024 Принята: 25.12.2024

(при горизонтальной рабочей площадке оптимальная точка равна 1521 м от нулевого пикета). Также для варианта 1 произошло незначительное снижение транспортной работы с 6072 тыс. м^3·км до 5984 тыс. м^3·км (на 88 тыс. м^3·км, что соответствует в денежном выражении примерно 560 тыс. руб.) Для варианта 2 происходит увеличение транспортной работы на 1581 тыс. м^3·км, что вполне согласуется с физикой процесса транспортирования (транспортирование происходит на подъем). Также произошло небольшое снижение оптимальной транспортной работы на 29 тыс. м^3·км.

Расчетные данные при уклоне рабочей площадки в сторону правого фланга приведены в Табл. 5, а их график кумулятивной транспортной работы при комбинации грузопотоков показан на Рис. 6. Минимальное значение транспортной работы соответствует точке 1576 м, смещение оптимума произошло в сторону левого фланга. Также произошло небольшое повышение оптимальной транспортной работы на 22 тыс. м^3·км относительно отработки клиновидного блока без уклона. На основании вышеизложенного можно сделать следующий вывод:

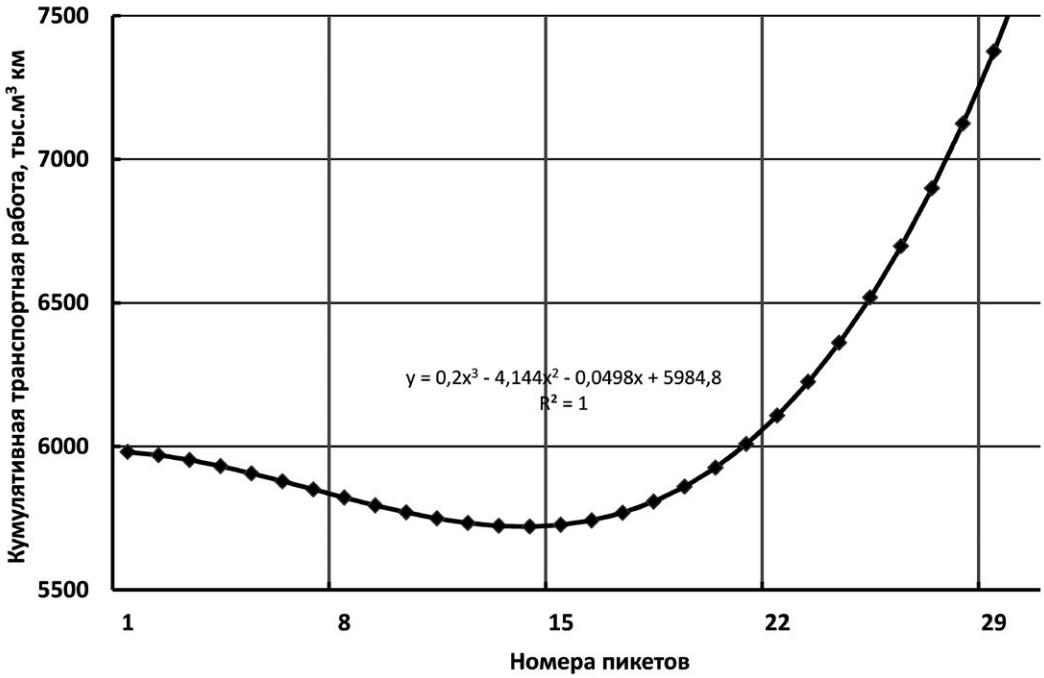

Рис. 5. Зависимость кумулятивной транспортной работы при комбинированном распределении грузопотоков с уклоном рабочей площадки в сторону левого фланга

Fig. 5. Dependence of cumulative transport work with combined distribution of cargo flows with a slope of the working platform towards the left flank

Received: 11.09.2024 Revised: 11.10.2024 Accepted: 25.12.2024
Поступил: 11.09.2024 Одобрена: 11.10.2024 Принята: 25.12.2024

Таблица 4. *Транспортная работа при уклоне рабочей площадки в сторону левого фланга фронта работ*

Table 4. *Transport work when the work site slopes towards the left flank of the work front*

Транспортирование через левый фланг фронта работ (*i*=-10 ‰)			Транспортирование через правый фланг фронта работ (*i*=+10 ‰)		
№ пикета	$\sum V_i L^{Б}_{пр\ i}$, тыс. м³·км	Кумулятивная транспортная работа при комбинации грузопотоков, тыс. м³·км	№ пикета	$\sum V_i L^{Б}_{пр\ i}$, тыс.м³·км	Кумулятивная транспортная работа при комбинации грузопотоков, тыс. м³·км
29	313,65	7375,71	0		
28	624,67	7124,61	1	5,39	5980,80
27	932,49	6898,81	2	22,04	5969,72
26	1236,55	6697,12	3	50,59	5952,75
25	1536,30	6518,34	4	91,68	5931,09
24	1831,16	6361,27	5	145,94	5905,94
23	2120,59	6224,71	6	214,03	5878,51
22	2404,01	6107,46	7	296,56	5849,98
21	2680,86	6008,32	8	394,19	5821,57
20	2950,60	5926,09	9	507,55	5794,47
19	3212,64	5859,57	10	637,28	5769,88
18	3466,44	5807,56	11	784,02	5749,00
17	3711,44	5768,86	12	948,41	5733,03
16	3947,06	5742,28	13	1131,09	5723,18
15	4172,75	5726,60	14	1332,69	5720,63
14	4387,95	5720,63	15	1553,85	5726,60
13	4592,09	5723,18	16	1795,22	5742,28
12	4784,62	5733,03	17	2057,43	5768,86
11	4964,98	5749,00	18	2341,12	5807,56
10	5132,60	5769,88	19	2646,92	5859,57
9	5286,92	5794,47	20	2975,49	5926,09
8	5427,38	5821,57	21	3327,45	6008,32
7	5553,42	5849,98	22	3703,45	6107,46
6	5664,48	5878,51	23	4104,12	6224,71
5	5760,00	5905,94	24	4530,10	6361,27
4	5839,41	5931,09	25	4982,04	6518,34
3	5902,16	5952,75	26	5460,56	6697,12
2	5947,68	5969,72	27	5966,32	6898,81
1	5975,41	5980,80	28	6499,94	7124,61
0	5984,80	5984,80	29	7062,06	7375,71
			30	7653,34	7653,34

Received: 11.09.2024 Revised: 11.10.2024 Accepted: 25.12.2024
Поступил: 11.09.2024 Одобрена: 11.10.2024 Принята: 25.12.2024

Таблица 5. *Транспортная работа при уклоне рабочей площадки в сторону правого фланга фронта работ*

Table 5. *Transport work when the work site slopes towards the right flank of the work front*

Транспортирование через левый фланг фронта работ (*i*=+10 ‰)			Транспортирование через правый фланг фронта работ (*i*=-10 ‰)		
№ пикета	$\sum V_i L_{Бпр\ i}$, тыс. м^3·км	Кумулятивная транспортная работа при комбинации грузопотоков, тыс. м^3·км	№ пикета	$\sum Vi L_{Бпр\ i}$, тыс.м^3·км	Кумулятивная транспортная работа при комбинации грузопотоков, тыс. м^3·км
29	313,94	7061,00	0		
28	626,61	6843,03	1	5,38	6154,46
27	937,10	6649,20	2	21,94	6141,63
26	1244,76	6478,33	3	50,25	6121,75
25	1548,95	6329,20	4	90,87	6096,02
24	1849,04	6200,62	5	144,35	6065,65
23	2144,38	6091,38	6	211,26	6031,81
22	2434,34	6000,30	7	292,16	5995,73
21	2718,29	5926,16	8	387,60	5958,60
20	2995,57	5867,77	9	498,17	5921,61
19	3265,55	5823,92	10	624,40	5885,98
18	3527,60	5793,42	11	766,87	5852,89
17	3781,07	5775,08	12	926,13	5823,55
16	4025,32	5767,67	13	1102,75	5799,16
15	4259,72	5770,02	14	1297,28	5780,92
14	4483,63	5780,92	15	1510,30	5770,02
13	4696,41	5799,16	16	1742,35	5767,67
12	4897,42	5823,55	17	1994,01	5775,08
11	5086,03	5852,89	18	2265,83	5793,42
10	5261,58	5885,98	19	2558,37	5823,92
9	5423,45	5921,61	20	2872,20	5867,77
8	5570,99	5958,60	21	3207,87	5926,16
7	5703,58	5995,73	22	3565,95	6000,30
6	5820,56	6031,81	23	3947,00	6091,38
5	5921,30	6065,65	24	4351,58	6200,62
4	6005,16	6096,02	25	4780,25	6329,20
3	6071,50	6121,75	26	5233,57	6478,33
2	6119,69	6141,63	27	5712,10	6649,20
1	6149,08	6154,46	28	6216,41	6843,03
0	6159,03	6159,03	29	6747,06	7061,00
			30	7304,60	7304,60

Received: 11.09.2024
Поступил: 11.09.2024
Revised: 11.10.2024
Одобрена: 11.10.2024
Accepted: 25.12.2024
Принята: 25.12.2024

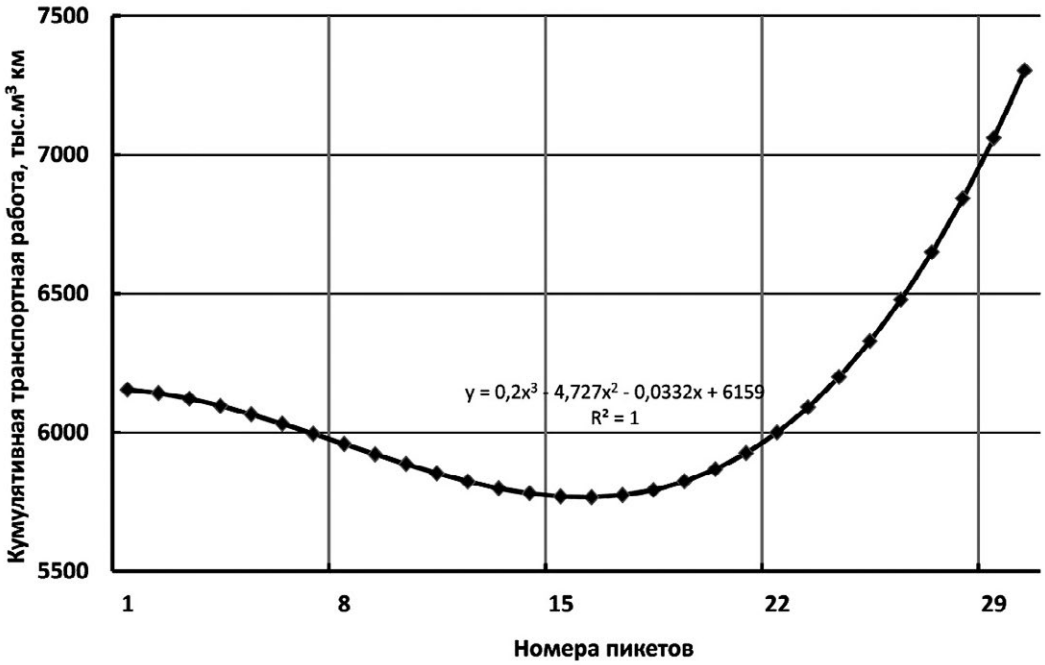

Рис. 6. Зависимость кумулятивной транспортной работы при комбинированном распределении грузопотоков с уклоном клиновидного блока в сторону правого фланга

Fig. 6. Dependence of cumulative transport work with combined distribution of cargo flows with the slope of the wedge-shaped block towards the right flank

при уклоне блока в сторону его широкой части объем транспортных работ уменьшается.

В данном исследовании рассмотрена оптимизация транспортной работы при веерной разработке месторождения с учетом приведенного расстояния транспортирования автомобильной трассы, направления грузопотока и уклона клиновидно-эксплуатационного блока.

ВЫВОДЫ

- При веерной системе разработки и направлении грузопотока в сторону широкой части клиновидного блока (вариант 1) суммарная транспортная работа всегда меньше, чем по варианту 2 (для условий, когда приведенные базовые расстояния транспортирования по маршрутам различаются в пределах 15–30%). Вариант 1 для вышеприведенных условий экономичнее варианта 2 (направление грузопотока в сторону узкой части блока) на 23,2%.
- Оптимизацию рекомендуется выполнять любым методом, изложенным в настоящей работе, по критерию минимальной

Received: 11.09.2024 Revised: 11.10.2024 Accepted: 25.12.2024
Поступил: 11.09.2024 Одобрена: 11.10.2024 Принята: 25.12.2024

транспортной работы: графическим, аналитическим и анализе параметров кумулятивной транспортной работы для комбинации грузопотоков.

- Самым оптимальным вариантом является комбинация грузопотоков, при которой часть клиновидного блока направляется через левый фланг, а другая часть – через правый, что дает дополнительное снижение объёма транспортных работ на 5–6% относительно лучшего варианта 1 при одностороннем направлении грузопотока.
- При проектировании веерной системы разработки следует отдавать предпочтение уклону клиновидно-эксплуатационного блока в сторону от узкой части к широкой, что обеспечивает дополнительное снижение транспортных работ.
- Данная работа вносит вклад в развитие технологии горных работ при веерной разработке месторождений.
- Предлагаемый подход оптимизации грузопотоков возможно применить и при других системах разработки, когда имеется несколько маршрутов транспортирования с одного уступа.

Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

The authors state that:

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ржевский В.В. Технология и комплексная механизация открытых горных работ. М.: Недра, 1980.
2. Вашлаев И.И., Михайлов А.Г., Селиванов А.В. Обоснование порядка отработки клиновидных блоков с учетом оптимизации грузопотоков горной массы // Проблемы недропользования. 2023. № 3. С. 109–117. doi: 10.25635/2313-1586.2023.03.109
3. Катышев П.В., Кисляков В.Е., Вокин В.Н. Обоснование направления транспортирования вскрышных пород при веерной системе разработки // Успехи современного естествознания. 2016. № 12. Ч. 1. С. 162–166. Дата обращения: 11.09.2024. Режим доступа: https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36280
4. Катышев П.В., Кисляков В.Е. Обоснование параметров фронта горных работ при отработке пологопадающих угольных месторождений веерной системой // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: техника и технологии.

Received: 11.09.2024 **Revised: 11.10.2024** **Accepted: 25.12.2024**
Поступил: 11.09.2024 **Одобрена: 11.10.2024** **Принята: 25.12.2024**

2016. Т. 9, № 2. С. 166–173. Дата обращения: 11.09.2024. Режим доступа: http://journal.sfu-kras.ru/article/20221

5. Катышев П.В. Обоснование технологии выемки пологопадающих угольных месторождений при веерной системе разработки. дис. … канд. техн. наук. Красноярск, 2018.
6. Кисляков В.Е., Катышев П.В. Исследование развития фронта горных работ на пологопадающих месторождениях при веерной системе разработки // Маркшейдерия и недропользование. 2014. №. 2. С. 42–44. Дата обращения: 11.09.2024. Режим доступа: http://n-gn.ru/issues-journal/journal-2014/91-contens-journal-2014-2.html
7. Кисляков В.Е., Никитин А.В., Катышев П.В. и др. Работа экскаваторов типа ЭКГ в клиновидной заходке // Маркшейдерия и недропользование. 2013. № 5. С. 44–50. Дата обращения: 11.09.2024. Режим доступа: http://n-gn.ru/issues-journal/journal-2013/94-contens-journal-2013-5.html
8. Шорохов В.П., Кисляков В.Е. Веерное подвигание фронта работ при разработке мощных угольных пластов. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012.
9. Галкин В.А., Караулов Г.А., Сидоренко В.Н. Горизонтальный эквивалент вертикального перемещения пород карьерными автосамосвалами // Известия вузов. Горный журнал. 1983. № 7. С. 14–18.
10. Яковлев ВЛ. Теория и практика выбора транспорта глубоких карьеров. Новосибирск: Наука, 1989.
11. Лель Ю.И., Арефьев А.С., Дунаев С.А. и др. Развитие идей член-корр. ран В.Л. Яковлева по учету влияния горнотехнических условий эксплуатации на показатели карьерного автотранспорта // Проблемы недропользования. 2014. № 3. С. 136–144. Дата обращения: 11.09.2024. Режим доступа: https://trud.igduran.ru/index.php/psu/article/view/68
12. Вашлаев И.И., Селиванов А.В. Определение горизонтального эквивалента перемещения горной массы автомобильным транспортом по энергетическому критерию при движении на уклонах // Известия вузов. Горный журнал. 1997. № 9–10. С. 87–90.
13. Вашлаев И.И., Селиванов А.В. Определение горизонтального эквивалента автомобильной трассы в карьере по энергетическому критерию. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2003. № 8. С. 175–177.
14. Вашлаев И.И., Селиванов А.В. Управление погрузочно-транспортными процессами на открытых горных работах на основе интегрального показателя горнотехнических условий транспортирования. В кн.: Открытые горные работы в XXI веке: Сб. материалов Международной научно-практ. конф. (4–7 октября 2011). Красноярск, 2011. С. 250–256.
15. Лель Ю.И., Арефьев А.С., Глебов А.В. и др. К вопросу оценки качества карьерных автодорог // Известия уральского государственного горного университета. 2016. № 3. С. 70–73.
16. Арефьев А.С. Оценка и обоснование рациональных дорожных условий эксплуатации карьерных самосвалов большой грузоподъемности: автореф. дис. … канд. техн. наук. Екатеринбург, 2015.

Received: 11.09.2024 **Revised: 11.10.2024** **Accepted: 25.12.2024**
Поступил: 11.09.2024 **Одобрена: 11.10.2024** **Принята: 25.12.2024**

17. Лель Ю.И., Салахиев Р.Г., Арефьев С.А. и др. Совершенствование нормирования расхода топлива карьерными автосамосвалами на основе горизонтальных эквивалентов вертикального перемещения горной массы // Известия вузов. Горный журнал. 2014. № 2. С. 107–115.

REFERENCES

1. Rzhevsky VV. *Technology and complex mechanization of open-pit mining.* Moscow: Nedra; 1980. (In Russ.)
2. Vashlaev II, Mikhailov AG, Selivanov AV. Justification of the procedure for developing wedge-shaped blocks taking into account the optimization of rock mass cargo flows. *Problems of Subsoil Use.* 2023;3:109–117. (In Russ.) doi: 10.25635/2313-1586.2023.03.109
3. Katyshev PV, Kislyakov VE, Vokin VN. Justification of the direction of transportation of overburden rocks in the fan mining system. *Advances in modern natural science.* 2016;12(1):162–166. (In Russ.) Accessed: 11.09.2024. Available from: https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36280
4. Katyshev PV, Kislyakov VE. Justification of the parameters of the mining front when developing gently dipping coal deposits with a fan system. *Journal of the Siberian Federal University. Series: equipment and technology.* 2016;9(2):166–173. (In Russ.) Accessed: 11.09.2024. Available from: http://journal.sfu-kras.ru/article/20221
5. Katyshev PV. *Justification of the technology of extraction of gently dipping coal deposits with a fan mining system* [dissertation]. Krasnoyarsk; 2018.
6. Kislyakov VE, Katyshev PV. Study of the development of the mining front at gently dipping deposits with a fan mining system. *Mine surveying and subsoil use.* 2014;2:42–44. (In Russ.) Accessed: 11.09.2024. Available from: http://n-gn.ru/issues-journal/journal-2014/91-contens-journal-2014-2.html
7. Kislyakov VE, Nikitin AV, Katyshev PV, et al. Operation of EKG type excavators in a wedge-shaped entry. *Mine surveying and subsoil use.* 2013;5:44–50. (In Russ.) Accessed: 11.09.2024. Available from: http://n-gn.ru/issues-journal/journal-2013/94-contens-journal-2013-5.html
8. Shorokhov VP, Kislyakov VE. *Fan-shaped advancement of the work front during the development of thick coal seams.* LAP LAMBERT Academic Publishing; 2012. (In Russ.)
9. Galkin VA, Karaulov GA, Sidorenko VN. Horizontal equivalent of vertical movement of rocks by quarry dump trucks. *News of universities. Mining journal.* 1983;7:14–18. (In Russ.)
10. Yakovlev VL. *Theory and practice of choosing transport for deep quarries.* Novosibirsk: Nauka; 1989. (In Russ.)
11. Lel YuI, Arefyev AS, Dunaev SA, et al. Development of ideas of Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences V.L. Yakovlev on taking into account the influence of mining and technical operating conditions on the performance of quarry vehicles. *Problems of Subsoil Use.* 2014;3:136–144. Accessed: 11.09.2024. Available from: https://trud.igduran.ru/index.php/psu/article/view/68

Received: 11.09.2024 **Revised: 11.10.2024** **Accepted: 25.12.2024**
Поступил: 11.09.2024 **Одобрена: 11.10.2024** **Принята: 25.12.2024**

12. Vashlaev II, Selivanov AV. Determination of the horizontal equivalent of the movement of rock mass by motor transport according to the energy criterion when moving on slopes. *News of universities. Mining journal.* 1997;9–10:87–90. (In Russ.)
13. Vashlaev II, Selivanov AV. Determination of the horizontal equivalent of a motorway in a quarry based on the energy criterion. *Mining information and analytical bulletin.* 2003;8:175–177. (In Russ.)
14. Vashlaev II, Selivanov AV. Management of loading and transport processes in open-pit mining operations based on the integral indicator of mining and technical conditions of transportation. In: *Open-pit mining operations in the 21st century: Collection of materials from the International scientific and practical conference (October 4–7, 2011).* Krasnoyarsk; 2011:250–256. (In Russ.)
15. Lel YuI, Arefyev AS, Glebov AV, et al. On the issue of assessing the quality of quarry roads. *Bulletin of the Ural State Mining University.* 2016;3:70–73. (In Russ.)
16. Arefyev AS. Assessment and justification of rational road conditions for the operation of heavy-duty quarry dump trucks: author's abstract [dissertation]. Ekaterinburg; 2015. (In Russ.)
17. Lel YuI, Salakhiev RG, Arefiev SA, et al. Improving the standardization of fuel consumption by quarry dump trucks based on horizontal equivalents of vertical movement of rock mass. *News of universities. Mining journal.* 2014;2:107–115. (In Russ.)

Сведения об авторах:
Вашлаев Иван Иванович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник;
eLibrary SPIN: 5046-3886; ORCID: 0000-0001-7174-040X;
Scopus Author ID: 6508270604;
E-mail: vash49@gmail.com
Михайлов Александр Геннадьевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник;
AuthorID: 66903; ORCID: 0000-0001-5537-7479; Scopus Author ID: 8838711200;
E-mail: alemikhal@gmail.com
Зуев Алексей Евгеньевич, ведущий инженер;
ORCID: 0000-0003-0912-4395;
E-mail: alex_corp85@mail.ru

Information about the authors:
Ivan I. Vashlaev, Candidate of Technical Sciences;
eLibrary SPIN: 5046-3886; ORCID: 0000-0001-7174-040X;
Scopus Author ID: 6508270604;
E-mail: vash49@gmail.com
Aleksandr G. Mikhaylov, Doctor of Technical Sciences;
AuthorID: 66903; ORCID: 0000-0001-5537-7479; Scopus Author ID: 8838711200;
E-mail: alemikhal@gmail.com
Alexey E. Zuev, MSc, lead engineer;
ORCID: 0000-0003-0912-4395;
E-mail: alex_corp85@mail.ru

Received: 11.09.2024 **Revised: 11.10.2024** **Accepted: 25.12.2024**
Поступил: 11.09.2024 **Одобрена: 11.10.2024** **Принята: 25.12.2024**