

Г. К. ГЕТЬМАН, (ДНУЖТ), В. Е. ВАСИЛЬЕВ (ДНУЖТ)

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна 2, г. Днепро, Украина, 49010, тел. (056)373-15-31, эл. почта: [getman-gk@i.ua](mailto:getman-gk@i.ua), [wasiljew@ukr.net](mailto:wasiljew@ukr.net), ORCID: [orcid.org/0000-0002-3471-6096](http://orcid.org/0000-0002-3471-6096), [orcid.org/0000-0001-7551-2332](http://orcid.org/0000-0001-7551-2332)

## К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЭКВИВАЛЕНТНОГО УКЛОНА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПУТЕЙ КАРЬЕРОВ

### Введение

Энергоемкость открытого способа добычи полезных ископаемых в значительной степени (50-90%) определяется энергозатратами на транспортирование горной массы, имеющими тенденцию к увеличению с ростом глубины разработки. Анализ структуры энергопотребления на карьерах показывает, что наиболее энергоемким является процесс транспортирования горной массы. Увеличение энергоемкости при одновременном интенсивном росте цен на энергоресурсы становится одним из основных факторов, лимитирующих развитие горного производства, и требует снижения расхода электроэнергии карьерным транспортом, минимизации удельных энергозатрат на подъем горной массы при формировании энергетически эффективных транспортных систем карьеров.

### Обзор литературы

Для решения вопросов, связанных с определением тягового обеспечения при перевозке горной массы в карьерах, в тяговых расчетах регулярно пользуются понятием эквивалентного уклона. Теоретически наиболее полно вопросы расчета расхода электроэнергии и нормирования на предприятиях по открытой добыче полезных ископаемых были рассмотрены в 50-60-х годах XX в. К тому же времени относятся первые классификации карьеров по глубине, в основу которых была положена разница отметок дна карьера и поверхности, которая строго связанная с понятием уклона. Изменение величины эквивалентного уклона и анализ факторов, влияющих на его величину, рассмотрены на примере глубоких карьеров в [1]. К глубоким были отнесены карьеры, рабочие горизонты которых расположены на глубине 100-150 м. С постоянным ростом добычи полезных ископаемых открытым способом, увеличивалась глубина карьеров. В 80-х годах академик В.В. Ржевский к глубоким относит карьеры, имеющие глубину более 200 м [2]. Во многих других работах большое внимание уделяется

понятию и определению эквивалентного уклона. Понятие эквивалентного уклона широко применяется не только на магистральном [3, 4], но и на городском электрическом транспорте [5, 6].

### Постановка задачи

Для карьерного транспорта определение эквивалентного уклона сопряжено, как правило, со значительным объемом вычислений, что объясняется как существованием нескольких (часто более десяти) маршрутов движения поездов и относительно большим числом кривых участков пути, так и обусловленным спецификой производства горных работ частым изменением плана и профиля трасс маршрутов.

Важным вопросом является разработка метода энергетической оценки и практических рекомендаций по снижению энергоемкости транспортных систем карьеров.

При выполнении тягового расчёта приходится оперировать усреднёнными данными, что приводит к возникновению некоторых погрешностей.

Для оперативного планирования необходим такой метод тягового расчёта, который, являясь простым, позволит выполнять расчёт энергопотребления с необходимой в практике инженерной точностью

В связи с изложенным, ниже рассматривается возможность упрощения процедуры определения эквивалентных уклонов железнодорожных путей карьеров.

### Основной материал

При решении ряда практических задач в теории локомотивной тяги часто используют понятие эквивалентного по механической работе уклона [7, 8], т.е. воображаемого однообразного уклона на прямой, равновеликого по длине и механической работе локомотива действительному уклону.

Обычно эквивалентный уклон рассчитывается по формуле

$$i_{\text{э}} = \frac{1}{L} \cdot \left[ \sum_{i=1}^n i_{ni} l_{ni} - \sum_{j=1}^m i_{cj} l_{cj} + \sum_{r=1}^k w_{Rr} l_{Rr} + \sum_{s=1}^p b_{ks} l_{\text{эс}} \right]; \quad (1)$$

$$i = \overline{1, n}; \quad j = \overline{1, m};$$

$$r = \overline{1, k}; \quad s = \overline{1, p},$$

где  $L$  – длина участка;

$n$  – число подъемов на участке;

$i_{ni}, l_{ni}$  – уклон и протяженность  $i$  – го подъема;

$m$  – число спусков на участке (за исключением вредных);

$i_{cj}, l_{cj}$  – уклоны и протяженность  $j$  – го спуска;

$k$  – количество кривых на участке;

$w_{Rr}, l_{Rr}$  – сопротивление движению и длина  $r$  – й кривой;

$l_R, k$  – длина кривой, количество кривых на участке;

$p$  – количество вредных спусков на участке;

$b_{ks}$  – удельная тормозная сила на  $s$  – ом вредном спуске;

$l_{\text{эс}}$  – протяженность  $s$  – го вредного спуска.

Приведенную формулу можно преобразовать к виду

$$i_{\text{э}} = i'_c + i''_c + L^{-1} \sum_{s=1}^p (i_{\text{эс}} - w_{\text{ос}}) l_{\text{эс}}, \quad (2)$$

где  $w_{\text{ос}}$  – основное сопротивление движению на  $s$  – ом вредном спуске;

$l_{\text{эс}}$  – уклон (абсолютное значение)  $s$  – го вредного спуска;

$i'_c$  – уклон спрямленного профиля маршрута;

$i''_c$  – фиктивный уклон от кривых пути на маршруте.

При определении эквивалентного уклона нужно предварительно выделить вредные спуски, т.е. спуски, на которых в целях ограничения скорости применяется подтормаживание поезда. Применительно к магистральным железным дорогам вредными считаются спуски, крутизна

которых по абсолютной величине превышает основное сопротивление движению [1].

При таком подходе расчетная протяженность вредных спусков получается завышенной, поскольку, во-первых, протяженность вредного спуска равна длине только той части элемента с уклоном  $|i| > w_o$ , на которой действительно применяется подтормаживание поезда, а во-вторых, в этом случае не учитывается действие сопротивления движению от кривых пути, расположенных на вредных спусках.

Для железных дорог карьеров, характеризующихся относительно низкими скоростями движения, погрешность определения эквивалентного уклона из-за неточного учета реальной протяженности вредных спусков будет меньшей, чем для магистральных железных дорог. Напротив, погрешность от пренебрежения влиянием кривых, расположенных на участках с отрицательным уклоном, может оказаться существенной, поскольку план железнодорожных путей карьеров имеет значительное количество кривых.

По указанной выше причине для железнодорожных путей карьеров следует к вредным относить те спуски, для которых

$$|i| > (w_o + w_R),$$

т.е. для которых крутизна спусков (по абсолютной величине) превышает сумму сопротивлений движению от кривых пути и основного.

В этом случае выражение (2) преобразуется к виду

$$i_{\text{э}} = i'_c + i''_c + \frac{1}{L} \sum_{s=1}^p (i_{\text{эс}} - w_{\text{ос}}) l_{\text{эс}} - i''_{\text{св}} \quad (3)$$

или

$$i_{\text{э}} = i'_c + i''_{\text{сн}} + \frac{1}{L} \sum_{s=1}^p (i_{\text{эс}} - w_{\text{ос}}) l_{\text{эс}}, \quad (4)$$

где  $i''_{\text{св}}$  – фиктивный уклон от кривых, расположенных на вредных спусках;

$i''_{\text{сн}}$  – фиктивный уклон, определяемый без учета кривых, расположенных на вредных спусках.

Последняя величина определяется как

$$i''_{\text{сн}} = \frac{1}{L} \sum_{r=1}^{k-p} w_{Rr} l_{Rr} = \frac{700}{L} \sum_{r=1}^p \frac{l_{Rr}}{R_{kr}}, \quad (5)$$

где суммирование не распространяется на расположенные на вредных спусках кривые.

Для карьерного транспорта определение эквивалентного уклона сопряжено со значительным объемом вычислений, что объясняется как относительно большим количеством маршрутов движения поездов и кривых в плане пути, так и частым изменением плана и профиля трасс маршрутов, обусловленным спецификой производства горных работ.

Кроме того, трудоемкость определения эквивалентного уклона для конкретного маршрута обусловлена, как показывают приведенные выше выражения, необходимостью вычисления суммы (5), требующей предварительного анализа продольного профиля с целью выделения вредных спусков.

Чтобы выявить возможность упрощения процедуры определения эквивалентного уклона

для ряда предприятий по открытой добыче полезных ископаемых проанализирована зависимость этой величины от перепада высот начального и конечного пункта маршрутов, а также протяженности последнего.

В результате установлено, что для реальных маршрутов, где средний уклон  $i'_c \geq 8\%$ , основным фактор-аргументом для случайной величины  $i_3$  является уклон  $i'_c$ , причем отношение  $i^* = i_3 / i'_c$  в области изменения величины уклонов реальных маршрутов является относительно стабильным.

Сказанное подтверждается данными расчетов, результаты которых показаны на рис. 1 и рис. 2. Для предварительных расчетов можно рекомендовать пользоваться аппроксимирующими зависимостями, приведенными на рис. 3.

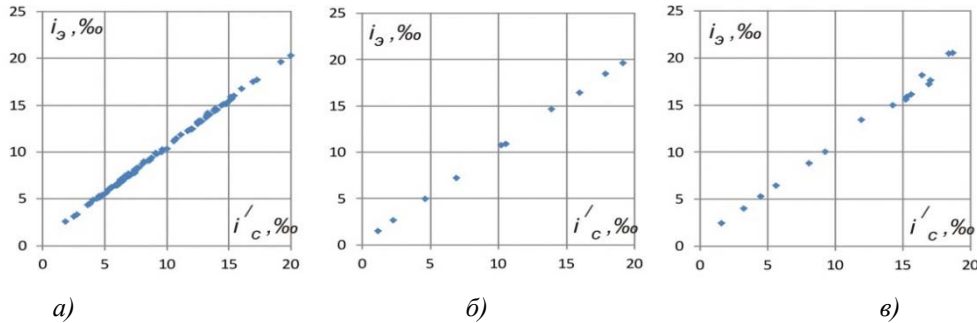


Рис. 1. Зависимость  $i_3 (i'_c)$  для карьеров ЮГОКа (а), Сарбайского (б) и Соколовского (в) участка ССГОКа

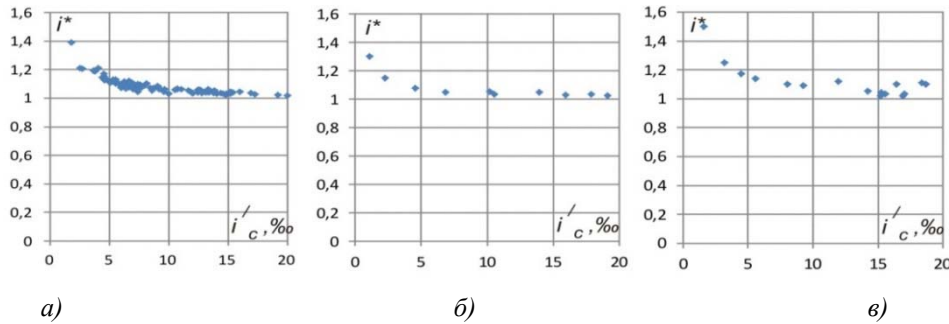


Рис. 2. Зависимость  $i^* (i'_c)$  а) ЮГОК; б) Сарбайский участок ССГОКа; в) Соколовский участок ССГОКа

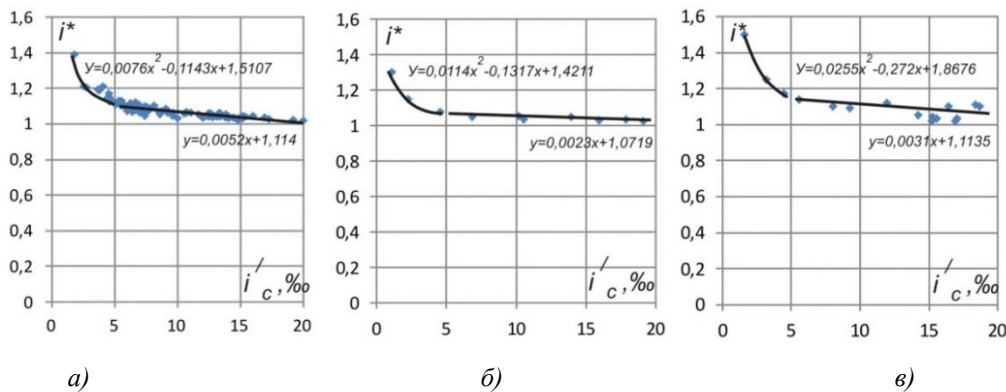


Рис. 3. Аппроксимирующие зависимости  $i^* (i'_c)$  для: а) ЮГОКа; б) Сарбайского участка ССГОКа; в) Соколовского участка ССГОКа

Отмеченное обстоятельство позволяет рекомендовать для маршрутов с однообразными уклонами при  $i'_c > 8 \text{ ‰}$  определение величины эквивалентного уклона как

$$i_3 = m \left[ i^* \right] i'_c, \quad (6)$$

где  $m \left[ i^* \right]$  – полученная на основании анализа реальных данных оценка математического ожидания отношения  $i^*$ .

Для реальных маршрутов со средним значением уклона  $i'_c \geq 8 \text{ ‰}$ , оценим ошибку величины эквивалентного уклона от его расчетного значения, полученного по (6) как  $\Delta i^* = i^* - m \left[ i^* \right]$ . На рис. 4 приведем гистограммы распределения  $\Delta i^* = i^* - m \left[ i^* \right]$  как случайной величины. Из приведенного рисунка видно, что для маршрутов с уклонами  $i'_c \geq 8 \text{ ‰}$  оценка математического ожидания ошибки  $\Delta i^*$  составляет  $0,038 \div 0,068$

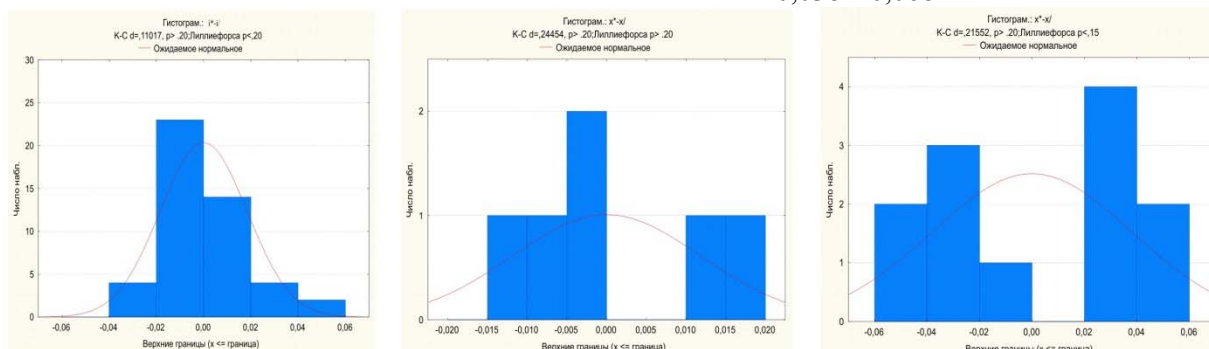


Рис. 4. Гистограммы распределения значений как случайной величины: а) ЮГОК; б) Сарбайский участок ССГОКа; в) Соколовский участок ССГОКа

Описательные статистики для различных участков с однообразными уклонами при  $i'_c > 8 \text{ ‰}$  сведены в таблицу 1.

Таблица 1

**Расчет статистических данных по различным карьерам**

Карьер	ЮГОК	Сарбайский участок ССГОКа	Соколовский участок ССГОКа
Оценка математического ожидания $i^*$	1,0527	1,0383	1,0683
Средний квадрат ошибки $\sigma \left[ i^* \right]$	0,0215	0,0119	0,038

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Васильев М.В. Транспорт глубоких карьеров. - М.: Недра, 1983. - 295 с.
2. Открытая разработка месторождений на больших глубинах /Ржевский В.В., Истомин В.В., Трубецкой К.Н., Пешков А.А.; // Горный журнал - 1988. – Вып. 5. - С. 14-23.
3. Розенфельд В.Е., Исаев И.П., Сидоров Н.Н. Теория электрической тяги. Учебник для вузов ж.-д. трансп. - М; Транспорт, 1983 – 328 с.
4. Осипов С.И., Миронов К.А., Ревич В.И. Основы локомотивной тяги. Учебник для техникумов

**Выводы**

1. Для железнодорожных путей карьеров с уклонами  $i'_c > 8 \text{ ‰}$  величину эквивалентного уклона предлагается определять по выражению (6), принимая  $i_3 = (1,04...1,06) i'_c$ , что вполне приемлемо для большинства практических задач
2. Для уклонов меньшей величины ( $i'_c \leq 8 \text{ ‰}$ ), определение эквивалентного уклона предлагается выполнять с учетом аппроксимирующих зависимостей, приведенных на рис. 3.

**REFERENCES**

1. Vasilev M.V. *Transport glubokih karerov*. [Transport of deep quarries]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 295 p.
2. Rzhveskiy V.V., Istomin V.V., Trubetskoy K.N., Peshkov A.A. *Otkryitaya razrabotka mestorozhdeniy na bolshih glubinah* [Openwork of deposits on no-bottoms] *Gornyy zhurnal* - Mountain magazine, 1988, issue 5, pp. 14-23.
3. Rozenfeld V.E., Isaev I.P., Sidorov N.N. *Teoriya elektricheskoy tyagi* [Theory of electric traction]: *Uchebnik dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta* - Textbook for institutions of higher learning of railway

ж.-д. трансп.-М.: Транспорт, 1979. – 440 с.

5. Байрыева Л.С., Шевченко В.В. Электрическая тяга: Городской наземный транспорт: Учебник для техникумов. – М.: Транспорт, 1986 - 206 с.

6. Кутыловский М.П. Электрическая тяга / Городской электрический транспорт/. – М.: Издательство литературы по строительству, 1970 – 263 с.

7. Бабичков А.М., Гурский П.А, Новиков А.П. Тяга поездов и тяговые расчеты. – М.: Транспорт, 1971. – 280 с.

8. Ржевский В.В. и др. Научные основы проектирования карьеров. М.: «Недра», 1971. -285 с.

transport. Moscow, Transport Publ, 1983, 328 p.

4. Osipov S.I., Mironov K.A., Revich V.I. *Osnovy lokomotivnoy tyagi* [Bases of locomotive traction]. *Uchebnik dlya tehnikumov zheleznodorozhnogo transporta*. - Textbook for college of railway transport. Moscow, Transport Publ, 1979, 440 p.

5. Bayryieva L.S., Shevchenko V.V. *Elektricheskaya tyaga: Gorodskoy nazemnyiy transport* [Electric traction: the Public surface transport]: *Uchebnik dlya tehnikumov*.- Textbook for college, Moscow, Transport Publ, 1986, 206 p.

6. Kutyilovskiy M.P. *Elektricheskaya tyaga. Gorodskoy elektricheskoy transport* [Electric traction. Public electric transport]. Moscow, *Izdatelstvo literaturyi po stroitelstvu* - Publishing house of literature on building, 1970, 263 p.

7. Babichkov A.M., Gurskiy P.A, Novikov A.P. *Tyaga poezdov i tyagovyye raschety*. [Traction of trains and hauling calculations], Moscow, Transport Publ, 1971, 280 p.

8. Rzhavskiy V.V. i dr. *Nauchnyye osnovy proektirovaniya karerov* [Scientific bases of planning of quarries], . Moscow, Nedra Publ., 1971, 285 p

Поступила в печать 24.04.2017.

Внутренний рецензент *Сыченко В.Г.*

Внешний рецензент *Бейгул О.А.*

При решении ряда задач, связанных с транспортированием горной массы на предприятиях по открытой добыче полезных ископаемых, применяют тяговые расчеты. Выполнение тяговых расчетов требует затрат времени и выполнения значительного объема вычислений. Прежде всего это связано с большим количеством маршрутов, количество которых в развитии карьере может достигать нескольких десятков и значительным количеством кривых, в том числе малого радиуса. Кроме того, специфика работы железорудного карьера предполагает достаточно частые изменения плана и профиля трасс маршрутов, в связи с чем возникает необходимость регулярной корректировки тяговых расчетов для конкретных маршрутов. Для ускорения выполнения тяговых расчетов часто используют понятие эквивалентного по механической работе уклона. Трудоемкость определения эквивалентного уклона для конкретного маршрута обусловлена необходимостью выполнения вычислений, требующих предварительного анализа продольного профиля пути.

В статье предложена упрощенная процедура определения эквивалентного уклона, для чего проанализирована зависимость этой величины от перепада высот начального и конечного пункта маршрутов, протяженности последнего и влияния сопротивления движению от кривых.

**Ключевые слова:** эквивалентный уклон; тяговый расчет; сопротивление движению; спуск; кривая; профиль; маршрут.

УДК [629.423+620.92].004.18

Г. К. ГЕТЬМАН (ДНУЖТ), В. Е. ВАСИЛЬЄВ (ДНУЗТ)

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна 2, м. Дніпро, Україна, 49010, тел. (056)373-15-31, ел. пошта: [getman-gk@i.ua](mailto:getman-gk@i.ua), [wasiljew@ukr.net](mailto:wasiljew@ukr.net), ORCID: [orcid.org/0000-0002-3471-6096](http://orcid.org/0000-0002-3471-6096), [orcid.org/0000-0001-7551-2332](http://orcid.org/0000-0001-7551-2332)

## ДО ВИЗНАЧЕННЯ ЕКВІВАЛЕНТНОГО УХИЛУ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІЙ КАР'ЄРІВ

При рішенні ряду завдань, пов'язаних з транспортуванням гірської маси на підприємствах по відкритому видобутку корисних копалини, застосовують тягові розрахунки. Виконання тягових розрахунків вимагає витрат часу і виконання значного об'єму обчислень. Передусім це пов'язано з великою кількістю маршрутів, кількість яких в розвиненому кар'єрі може досягати декількох десятків і значною кількістю кривих, у тому числі малого радіуса. Крім того, специфіка роботи залізничного кар'єру припускає досить часті зміни плану і профілю трас маршрутів, у зв'язку з чим виникає необхідність регулярного коригування тягових розрахунків для конкретних маршрутів. Для прискорення виконання тягових розрахунків часто використовують поняття еквівалентного по механічній роботі ухилу. Трудомісткість визначення еквівалентного ухилу для конкретного маршруту обумовлена необхідністю виконання обчислень, що вимагають попереднього аналізу подовжнього профілю шляху.

© Гетьман Г. К., Васильєв В. Е., 2017

У статті запропонована спрощена процедура визначення еквівалентного ухилу, для чого проаналізована залежність цієї величини від перепаду висот початкового і кінцевого пункту маршрутів, протяжності останнього і впливу опору руху від кривих.

**Ключові слова:** еквівалентний ухил; тяговий розрахунок; опір руху; спуск; крива; профіль; маршрут.

Внутрішній рецензент *Сиченко В.Г.*

Зовнішній рецензент *Бейгул О.О.*

**UDC [629.423+620.92].004.18**

**G. K. GETMAN (DNURT), V. E. VASILEV (DNURT)**

Dnepropetrovsk national university of railway transport of the name of academician V. Lazaryana, street of Lazaryana 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. (056) 373-15-31, e-mail: [getman-gk@i.ua](mailto:getman-gk@i.ua), [wasiljew@ukr.net](mailto:wasiljew@ukr.net), ORCID: [orcid.org/0000-0002-3471-6096](http://orcid.org/0000-0002-3471-6096), [orcid.org/0000-0001-7551-2332](http://orcid.org/0000-0001-7551-2332)

## **TO DETERMINATION OF EQUIVALENT SLOPE OF RAILWAY WAYS OF QUARRIES**

At the decision of row of the tasks related to the portage of mountain mass on enterprises on strip-mining of minerals, apply hauling calculations. Implementation of hauling calculations requires the expenses of time and implementation of considerable volume of calculations. Foremost it is related to plenty of routes the amount of that in the developed quarry can arrive At the decision of row of the tasks related to the portage of mountain mass on enterprises on strip-mining of minerals, apply hauling calculations. Implementation of hauling calculations requires the expenses of time and implementation of considerable volume of calculations. Foremost it is related to plenty of routes the amount of that in the developed quarry can arrive at a few ten and by the far of curves, including small radius. In addition, the specific of work of iron-ore quarry supposes the frequent enough changes of plan and profile of routes of routes, in this connection there is a necessity of regular adjustment of hauling calculations for concrete routes. For the acceleration of implementation of hauling calculations often use the concept of equivalent on mechanical work slope. The labour intensiveness of determination of equivalent slope for a concrete route is conditioned by the necessity of implementation of calculations requiring the preliminary analysis of longitudinal profile of way.

The simplified procedure of determination of equivalent slope is offered in the article, dependence of this size is for what analysed on the overfall of heights of starting and eventual point of routes, extent of the last and influence of resistance to motion from curves.

**Keywords:** equivalent slope; hauling calculation; resistance to motion; lowering; curve; profile; route.

Internal reviewer *Sichenko V.G.*

External reviewer *Beygul O.A.*