

КАТЕГОРИИ КАРЬЕРНЫХ ДОРОГ  
CATEGORIES OF PIT ROADS

*Бусел Б.У.*, кандидат технических наук, доцент  
(Белорусский национальный технический университет)

*Busel Barys*, Candidate of technical sciences, Associate professor  
(Belarusian National Technical University)

**Аннотация.** *В статье приведены результаты обследования карьерных дорог по их влиянию на ресурс редукторов мотор – колёс карьерных самосвалов. Предложено классифицировать карьерные дороги по трём категориям. Использование предложенной классификации позволит повысить точность расчётов конструктивных параметров редукторов мотор – колёс карьерных самосвалов.*

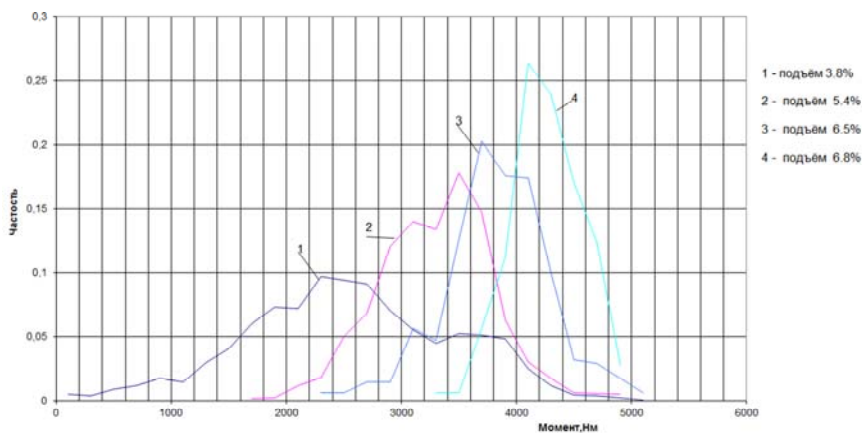
**Abstract.** *Result of inspection of pit roads on their influence on a resource of reducers the motor wheels of dump trucks are given in the article. It is offered to classify by three categories. Use of offered classification will allow to increase the accuracy of calculations of design data of reducers the motor wheels of dump trucks.*

Дорожные условия по макропрофилю дороги при движении самосвала с грузом на подъем оказывают определяющее влияние на силу тока тяговых электродвигателей и крутящий момент на входе в редуктор мотор – колеса. Соответственно ресурс этих агрегатов будет, в первую очередь, зависеть от параметров, характеризующих макропрофиль карьерных дорог. В настоящее время общепринятыми характеристиками карьерных дорог по макропрофилю являются: величина руководящего уклона, значения максимальных уклонов дороги, глубина карьера или подъёма. Этих параметров недостаточно для правильного назначения нагрузочных режимов при проектировочных и проверочных расчётах и испытаниях трансмиссионных агрегатов, в частности, редукторов мотор-колёс карьерных самосвалов. В работе предлагаются параметры в полной мере характеризующие продольный профиль карьерной дороги как основной фактор выработки ресурса трансмиссионных агрегатов в эксплуатации, приведены конкретные параметры нагрузочных режимов.

При движении самосвала с грузом квазистатический момент на входе в редуктор формируется, главным образом, из следующих составляющих:

- момент, обусловленный суммарным дорожным сопротивлением;
- момент для разгона или торможения самосвала;
- момент, возникающий вследствие специфики распределения тяговых усилий по колесам при движении на поворотах.

Изучение экспериментально записанных реализаций и законов распределения момента [1, 2, 3] показывает, что первая составляющая является определяющей в суммарном процессе. Причем с увеличением угла подъема трассы движения ее доля в суммарном процессе растет и при превышении величины подъема более 4 % становится подавляющей. На рисунке 1 показаны полигоны распределения момента на входе в редуктор для самосвала БелАЗ-75191 при движении на подъемах разной крутизны. Видно, что с увеличением угла подъема распределение момента «сжимается» около среднего значения, соответствующего суммарному дорожному сопротивлению. Текущая величина крутящего момента в трансмиссии карьерного самосвала определяется суммарным дорожным сопротивлением в значительно большей степени, чем в трансмиссии тяжелого автомобиля общего транспортного назначения. Аналогичный вывод можно сделать и из данных, приведенных в [4]. Поэтому для анализа и оценки нагрузочного режима редукторов мотор – колес представляется возможным использовать характеристики дорожных условий.



**Рисунок 1** – Полигоны распределения момента при движении на подъемы самосвала БелАЗ-75191

Сопоставимый показатель накопления усталостных повреждений  $R$  в деталях трансмиссии определяется выражением

$$R = \sum_i M_i^m p_i, \quad (1)$$

где  $M_i$  – середина  $i$ -го уровня сортировки момента;

$p_i$  – частота  $i$ -го уровня;

$m$  – показатель степени кривой усталости.

Величина  $R$  выражается через распределение удельной тяговой силы  $\gamma_i$ :

$$R = \left( \frac{G_a r_k}{2u\eta} \right)_i^m \sum \gamma_i^m p_i, \quad (2)$$

где  $G_a$  – вес самосвала;

$r_k$  – статический радиус колеса;

$u$  и  $\eta$  – передаточное число и КПД редуктора соответственно.

Учитывая, что множитель  $\frac{G_a r_k}{2u\eta}$  – постоянная величина для конкретно-

го самосвала, а  $\gamma_i$  – относительная величина, введем для дальнейшего анализа понятие «темпы накопления усталостных повреждений по удельной тяговой силе»:

$$R_\gamma = \sum \gamma_i^m p_i. \quad (3)$$

Эта величина позволяет оценивать и сопоставлять нагрузочные режимы не только для конкретного самосвала, но и для различных по конструктивным параметрам самосвалам.

Выполним оценку нагруженности, исходя из характеристики макропрофиля дороги. Момент на входе в редуктор при движении на  $j$ -й подъем стремится к величине

$$M_{j\alpha} = \frac{G_a (\alpha_j + f_j) r_k}{2\eta u}.$$

Значение  $M_{j\alpha}$  будет достаточно близко к математическому ожиданию момента, зафиксированного при движении самосвала на участке трассы с подъемом  $\alpha_j$  и коэффициентом сопротивления качению  $f_j$ . Для этого случая среднее значение удельной тяговой силы определится как

$$\gamma_{j\alpha} = \frac{2M_{j\alpha} u \eta}{G_a r_k} = (\alpha_j + f_j),$$

а выражение (3) можно записать в виде

$$R_{\gamma\alpha} = \sum (\alpha_j + f_j)^m p_j,$$

где  $p_j$  – частота  $j$ -го участка дороги с параметрами  $\alpha_j$  и  $f_j$ , определяемая отношением его длины к протяженности дороги.

Очевидно, что параметр  $R_{\gamma\alpha}$  прямо связан с величиной  $r_\alpha$  – оценкой темпа накопления усталостных повреждений на 1 км пробега по карьерной дороге, введенной для оценки сложности технологического маршрута [10].

$$r_\alpha = \frac{\sum (f_j + \alpha_j)^3 l_j}{L},$$

где  $\alpha_j$  и  $f_j$  – коэффициент сопротивления движению на подъем и коэффициент сопротивления качению на  $j$ -м участке дороги, м;

$l_j$  – длина  $j$ -го участка дороги, м;

$L$  – длина дороги, км.

В дальнейшем принимаем  $m = 3$  (контактная выносливость).

На рисунке 2 показана зависимость  $R_\gamma$  (по выражениям (1)–(3)) от параметра  $r_\alpha$ , полученная по экспериментальным данным. Видно, что точки пар значений  $r_\alpha - R_\gamma$  группируются в узкой зоне около прямой линии. Таким образом, для задач оценки нагрузочного режима в связи с макропрофилем карьерной дороги можно использовать зависимость

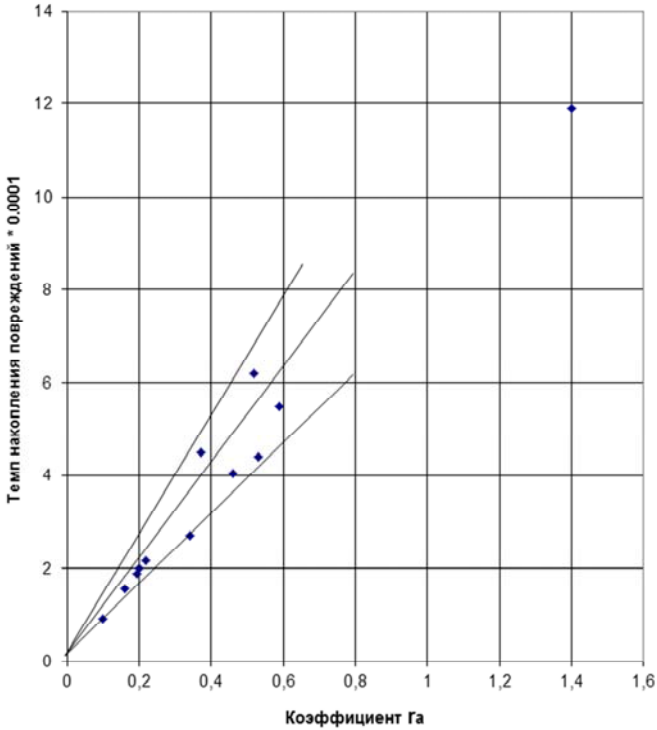
$$R_{\gamma\alpha} = \frac{1}{1000} r_\alpha.$$

Учитывая, что коэффициент пробега

$$k_{\Pi} = \frac{R_\gamma}{\gamma_p^3},$$

где  $\gamma_p$  – расчетная удельная сила, получаем выражение для оценки коэффициента пробега по параметрам макропрофиля карьерной дороги:

$$k_{\Pi\alpha} = \frac{r_{\alpha}}{1000\gamma_p^3} .$$



**Рисунок 2** – Зависимость сопоставимого показателя накопления усталостных повреждений от коэффициента сложности карьерной дороги по макропрофилю

Следовательно, располагая величиной коэффициента  $r_{\alpha}$  (т.е. имея гистограмму распределения углов подъема трассы), представляется возможным получить оценку величины важнейшего параметра нагруженного режима трансмиссии – коэффициента пробег. В таблице 1 приведены характеристика макропрофиля  $r_{\alpha}$  и значения  $k_{\Pi}$  и  $k_{\Pi\alpha}$ . При расчете  $k_{\Pi}$  и  $k_{\Pi\alpha}$  было принято  $\gamma_p = 0,13$ . Видно, что величина оценки  $k_{\Pi\alpha}$  с удовлетворительной точностью соответствует значениям  $k_{\Pi}$ , определенным по гистограммам распределения момента на входе в редуктор.

Таблица 1 – Параметры карьерных дорог и нагрузочных режимов

Самосвал, дорога	Участок дороги	$r_\alpha$	$R_r \cdot 10^4$	$k_{\Pi}$ по распределению момента	$k_{\Pi\alpha}$ – оценка по макропрофилю	Отклонение $\frac{k_{\Pi\alpha} - k_{\Pi}}{k_{\Pi}}$ , %	Отклонение $\frac{k_{\Pi\alpha}}{k_{\Pi}}$
БелАЗ-7519 Костамукша	Подъем 6,8 %	0,61	5,5	0,25	0,277	+7,6	1,076
	Подъем 5,5 %	0,55	4,4	0,20	0,25	+20,0	1,2
	Подъем 5,4 %	0,35	2,7	0,12	0,159	+29,0	1,28
	Подъем 3,8 %	0,166	1,6	0,073	0,076	-2,0	0,98
	Маршрут № 1	0,2	2,0	0,091	0,091	0,0	1,0
БелАЗ-75211 Нерюнгри	Маршрут № 1	0,1	0,92	0,042	0,046	+9,5	1,1
БелАЗ-549	Участок 0-1	0,22	2,18	0,099	0,1	+1,0	1,01
	Участок 2-3	0,46	4,05	0,184	0,209	+13,6	1,14
	Участок 3-4	1,4	11,9	0,542	0,617	+13,7	1,14
	Участок 5-6	0,37	4,5	0,205	0,168	-18,0	0,82
	Участок 6-7	0,20	1,95	0,089	0,091	+2,2	1,02
	Маршрут в целом	0,52	6,2	0,282	0,237	-16,0	0,84

В таблице 2 приведены параметры  $r_\alpha$  и  $\alpha_{\max}$ , характеризующие сложность карьерной дороги по макропрофилю и оценка коэффициента  $k_{\Pi\alpha}$ . Данные таблицы 2 представлены в графическом виде на рисунке 3. При расчете оценки  $k_{\Pi\alpha}$  принято, что  $\gamma_p = 0,13$ . Рекомендуемый в работе [5] нагрузочный режим для расчета деталей редукторов мотор-колес соответствует зоне на графике (рисунок 3), ограниченной  $r_\alpha = 0,4$  и  $k_{\Pi\alpha} = 0,18$ . В этой зоне находятся параметры всего 8<sup>ми</sup> дорог из 44 обследованных. Поэтому можно утверждать, что нагрузочный режим [1] отражает легкие и средние по сложности макропрофиля условия эксплуатации карьерных самосвалов особо большой грузоподъемности. Действительно, испытания [6, 8], на основе которых разработаны рекомендации [5], проведены в сравнительно легких дорожных условиях. К ним относятся испытания в Костамукшском ГОКе и в ПО «Якутуголь» (БелАЗ-75211). Испытания самосвала БелАЗ-549 [7] проведены в сравнительно более тяжелых дорожных условиях по макропрофилю. По различным заездам  $k_{\Pi}$  находится в диапазоне 0,27–0,32, а коэффициент  $r_\alpha = 0,48$ –0,65. В сравнительно тяжелых условиях проведены испытания самосвала БелАЗ-7519 в ПО «Печенганикель» [1]. Значение коэффициента пробега равно 0,23. Следует отметить, что по результатам этих

испытаний Каноник И.В. рекомендовал принять для расчетов долговечности  $\gamma = 0,15$  и  $M_p = 7000$  Нм, (против  $M_p = 6100$  Нм и  $\gamma = 0,13$  для других испытаний этого же самосвала) коэффициент пробега при этом становится равным 0,15. В связи с приведенными данными следует отметить, что ширина диапазона эксплуатационных дорожных условий является довольно широкой, коэффициент  $r_\alpha$  изменяется в пределах 0,1–1,2. Поэтому целесообразно дорожные условия эксплуатации по макропрофилю карьерных самосвалов особо большой грузоподъемности разделить на три категории:

категория № 1 – легкие и средние условия эксплуатации  $r_\alpha = 0,1–0,4$ ;

категория № 2 – умеренно тяжелые условия эксплуатации  $r_\alpha = 0,41–0,72$ ;

категория № 3 – тяжелые условия эксплуатации  $r_\alpha > 0,72$ .

Таблица 2 – Параметры обследованных карьерных дорог

№ дороги	$r_\alpha$	$\alpha_{\max}$	$\sum (\alpha_j + f_j)^m p_j$	$k_{П\alpha}$ при $\gamma_p = 0,13$	$k_{П\alpha}$ при $\gamma_p = 0,15$
1	2	3	4	5	6
1	0,23	8,5	0,00023	0,105	0,07
2	0,09	8,8	0,00009	0,041	0,027
3	0,27	8,1	0,00027	0,123	0,08
4	0,4	8,6	0,00040	0,182	0,12
5	0,36	11,7	0,00036	0,164	0,106
6	0,6	11,0	0,00060	0,273	0,178
7	0,54	11,9	0,00054	0,246	0,16
8	0,78	16,0	0,00078	0,355	0,23
9	0,46	8,0	0,00046	0,209	0,136
10	0,74	12,3	0,00074	0,337	0,219
11	0,63	11,5	0,00063	0,287	0,187
12	0,93	19,7	0,00093	0,423	0,276
13	0,51	10,2	0,00051	0,232	0,151
14	0,62	11,5	0,00062	0,282	0,184
15	0,53	9,0	0,00053	0,24	0,157
16	0,56	9,6	0,00056	0,255	0,166
17	0,81	13,0	0,00081	0,369	0,24
18	0,84	13,5	0,00084	0,382	0,25
19	0,83	12,7	0,00083	0,378	0,246
20	0,60	8,2	0,00060	0,273	0,178
21	0,70	10,0	0,00070	0,319	0,207
22	0,93	13,0	0,00093	0,423	0,276
23	0,91	10,0	0,00091	0,414	0,270
24	0,90	10,0	0,00090	0,410	0,267
25	0,83	12,0	0,00083	0,378	0,246

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5	6
26	0,93	11,4	0,00093	0,423	0,276
27	0,98	11,4	0,00098	0,446	0,29
28	0,99	10,0	0,00099	0,451	0,293
29	0,88	8,0	0,00088	0,40	0,261
30	0,79	11,0	0,00079	0,36	0,234

В таблице 2 и на рисунке 4 показаны значения максимального угла подъема на карьерных дорогах в связи с коэффициентом  $r_\alpha$ . Видно, что в зоне значений  $r_\alpha \geq 0,4$  максимальный подъем составляет 8–9 %, в зоне, соответствующей 2 категории, наиболее вероятны максимальные подъемы 10–12 %, в зоне 3 категории максимальные подъемы могут превышать 15 %. Очевидно, что это обстоятельство требует корректировки значений удельной расчетной силы тяги по категориям. Предлагается для первой категории дорожных условий эксплуатации оставить  $\gamma_p = 0,13$  [1, 6], для второй категории использовать  $\gamma_p = 0,14$  и для третьей –  $\gamma_p = 0,16$ .

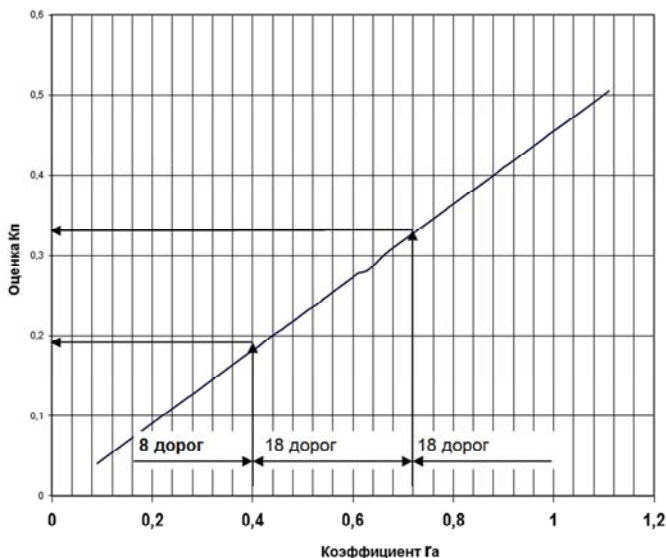
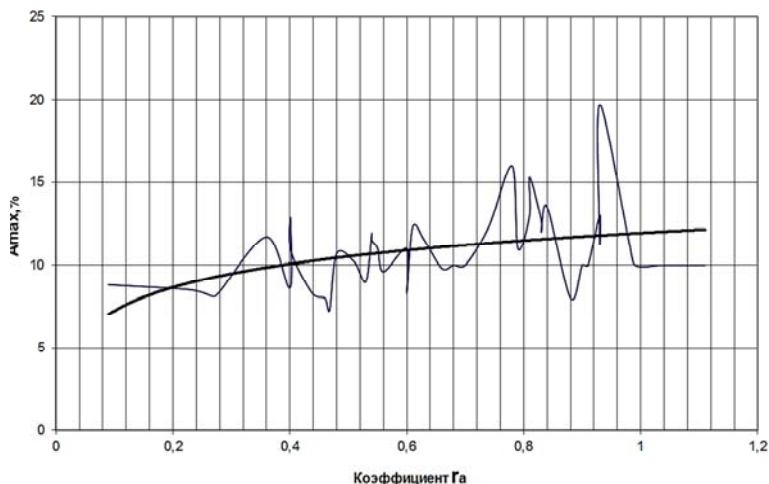


Рисунок 3 – Зависимость оценки  $K_{п}$  от коэффициента сложности дороги  $r_\alpha$

Для расчетов долговечности деталей редукторов применительно к первой категории дорожных условий рекомендуется принимать  $\gamma_p = 0,13$  и  $k_{пн} =$



= 0,18; для расчетов применительно ко второй категории  $\gamma_p = 0,14$  и  $k_{ПН} = 0,24$ ; для расчетов применительно к третьей категории  $\gamma_p = 0,16$  и  $k_{ПН} = 0,24$ .



**Рисунок 4** – Связь максимального угла подъема и коэффициента сложности дороги  $r_a$

Следует отметить что увеличение углов подъемов карьерных дорог рассматривается добывающими организациями как путь снижения затрат на создание и поддержание дорожной сети карьеров. Кроме этого, увеличение углов подъемов и утяжеление макропрофилей дорог в целом является прямым следствием заглубления карьеров со временем. В настоящее время все больше карьеров переходят в категорию глубоких. Динамика утяжеления дорожных условий по макропрофилю четко прослеживается при анализе реализаций макропрофиля карьеров, полученных нами с интервалом 5–8 лет. Поэтому БелАЗу рекомендуется при расчетах и проектировании редукторов мотор-колес для самосвалов использовать нагрузочный режим 2 категории эксплуатации, т.е.  $\gamma_p = 0,14$  и  $k_{ПН} = 0,22–0,25$ .

В связи с рекомендациями, данными выше, представляет интерес планирование дорожных условий по макропрофилю на перспективу, в частности, зарубежными добывающими фирмами. В таблицах 3 и 4 представлены параметры макропрофиля карьера Чилийской медно-рудной компании на период до 2010 года и с 2010 года. Глубина карьера фактически не изменяется, но длина дороги на подъем уменьшается на 1880 метров за счет увеличения углов  $r_a$ . Очевидно, что для таких условий расчет должен вестись по параметрам нагрузочного режима для 3 категории.

Таблица 3 – Параметры дороги на период 2000 г. – 2010 г.

Проектный вариант эксплуатации на период до 10 годов					
Трасса S2W(211)-exp47W			Отвал SBL		
Уча- сток	% угла накло- на (ската)	Горизонт. дистанция, м	Дистанция под наклоном, м	Общая ди- станция, м	% дистанции под наклоном
1-1	0,0 %	280		280	0,00 %
1-2	9,0 %		1235	1235	100,00 %
1-3	0,0 %	270		270	0,00 %
1-4	9,0 %		833	833	100,00 %
1-5	0,0 %	330		330	0,00 %
1-6	9,0 %		2048	2048	100,00 %
1-7	0,0 %	430		430	0,00 %
1-8	10,0 %		563	563	100,00 %
1-9	0,0 %	250		250	0,00 %
1-10	8,0 %		1425	1425	100,00 %
1-11	0,0 %	240		240	0,00 %
1-12	10,0 %		1266	1266	100,00 %
1-13	0,0 %	4010		4010	0,00 %
1-14	8,0 %		201	201	100,00 %
Всего		5810	7571	13381	56,58 %

Таблица 4 – Проектный вариант дороги на период с 2010 г. и далее

Трасса S2W(211)-exp47W			Отвал SBL		
Участок (марш- рут)	% угла наклона (ската)	Горизонт. дистанция, м	Дистанция под наклоном, м	Общая ди- станция, м	% дистанции под наклоном
1-1	0,0 %	280		280	0,00 %
1-2	12,0 %		926	926	100,00 %
1-3	0,0 %	270		270	0,00 %
1-3	12,0 %		625	625	100,00 %
1-5	0,0 %	330		330	0,00 %
1-6	12,0 %		1536	1536	100,00 %
1-7	0,0 %	430		430	0,00 %
1-8	12,0 %		469	469	100,00 %
1-9	0,0 %	250		250	0,00 %
1-10	12,0 %		950	950	100,00 %
1-11	0,0 %	240		240	0,00 %
1-12	12,0 %		1055	1055	100,00 %
1-13	0,0 %	4010		4010	0,00 %
1-14	12,0 %		134	134	100,00 %
Всего		5810	5695	11505	49,50 %

Предлагаемая классификация дорожных условий эксплуатации позволяет ОАО «БелАЗ» при конструировании трансмиссионных агрегатов дифференцированно выбирать нагрузочные режимы с учётом назначения машин по условиям эксплуатации и обоснованно назначать и выполнять гарантийные обязательства, планировать производство и поставки запчастей.

### Литература

1. Определение параметров нагрузочного режима и расчет зубчатых колес и подшипников редукторов мотор-колес самосвалов БелАЗ-7519 и БелАЗ-75211: отчет о НИР / Министерство автомобильной промышленности СССР, НАМИ, рук. работы И.В. Каноник. – Минск, 1986. – 41 с.
2. Исследование долговечности и динамической нагруженности редуктора мотор-колеса автомобиля БелАЗ-549, х/д № 128: отчет о НИР / Белорусский политехнический институт, рук. работы В.Г. Ревский. – Минск, 1973. – 42 с. – № госрегистрации 72056721.
3. Исследование виброактивности электромотор-колес карьерных самосвалов БелАЗ, х/д № 1579: отчет о НИР / Белорусский политехнический институт, рук. работы Б.У. Бусел. – Минск, 1985. – 115 с. – № госрегистрации 01.83.0016079
4. Кулешов, А.А. Пневмоколесные машины с бортовыми приводами и мотор-колесами / А.А. Кулешов, И.И. Марголин. – М.: Машиностроение, 1975. – 312 с.
5. Нагрузочные режимы редукторов мотор-колес карьерных самосвалов / И.В. Каноник [и др.] // Сборник научных трудов НАМИ. – 1990. – С. 61–66.

УДК 656.11

## ТРАНСПОРТНЫЙ ПОТОК КАК ВОЛНА THE TRANSPORT FLOW AS A WAVE

**Гук В.И.**, доктор технических наук, профессор  
(Харьковский национальный университет строительства и архитектуры)

**Hook V.I.**, Doktor of Technicfl Sciences, Professor  
(Kharkov National University of Construction and Architecture)

*Аннотация. Освещаются волновые свойства транспортного потока и его характеристик для целей совершенствования организации дорожного движения, управление движением автоматизированными системами, проектирования улично-дорожных структур и повышения их пропускной способности.*