

7. Концевой Е. М. Ремонт крановых металлоконструкций / Е. М. Концевой, Б. М. Розенштейн. – М. : Машиностроение, 1979. – 206 с.
8. Goldak J. A new finite element model for welding heat sources / J. Goldak, A. Chakvanati, M. Bibby // Metallurgical transaction B. – June 1986. – Vol. 15b. – P. 299–305.
9. Goldak J. Computer Modeling of Heat Flow in Welds / Goldak J., Bibby M., Moore J. etc. // Metallurgical transactions B. – September 1986. – Vol. 17b. – P. 587–600.

Одержано 14.10.2013

**Лятуринський В.О., Сидоренко М.В. Моделювання після зварювального напружено-деформованого стану коробчастих кранових балок з криволінійними швами**

*У статті моделюється виникнення залишкових напружень та деформацій при зварюванні кранових балок коробчастого перетину. Розглянуто вплив різноманітних технологічних факторів на післязварювальний напружено-деформований стан вузла з радіусним переходом. Доведено необхідність урахування фазових і структурних перетворень сталі при моделюванні. Виявлено взаємозв'язок характерних руйнувань вузлів з картинами залишкових напружень.*

**Ключові слова:** залишкові напруження, металокопструкція, кран, зварювання, кінцеві елементи.

**Liaturinskii V., Sidorenko M. Simulation of post-weld stress-strain state of box crane girders with curved seams**

*The occurrence of residual stresses and strains caused by welding of crane box beams is modeled. The influence of various technological factors on post-weld stress-strain state of subassemblies with curved transition is considered. The necessity of taking into account the phase and structural transformations in the simulation is proved. The correlation between representative damages of subassemblies with pattern of residual stresses is identified.*

**Key words:** residual stresses, metalware, crane, welding, finite elements.

УДК 620.178.169 : 621.891

Канд. техн. наук С. Н. Попов, С. В. Андриенко

Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

**АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ЭНЕРГИИ КОНТАКТНОГО  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА БАРОВОЙ  
МАШИНЫ В УСЛОВИЯХ ИЗНАШИВАНИЯ С ЗАКРЕПЛЕННЫМ  
АБРАЗИВОМ**

*Исследован механизм взаимодействия при контактном трении поверхностей барового резца с асфальтобетоном. Разработан комплексный системный алгоритм эмпирического расчета сил трения и работы рабочего органа бары. Предложена методика анализа влияния величины силы трения и энергии в зависимости от удельного линейного износа резцов.*

**Ключевые слова:** режущая кромка, резец, сила трения, работа силы трения, геометрические параметры резца, передняя грань резца, угол резания, путь трения, удельный износ.

**Введение**

Проблема анализа влияния основных геометрических параметров барового резца на процесс его изнашивания при разрушении асфальтобетонных покрытий в главной степени определяется величиной и направлением контактных сил при взаимодействии режущего инструмента с абразивной средой и в частности в усло-

виях контакта с закрепленным абразивом практически не изучена.

Это связано с тем, что на сегодняшний день отсутствуют практические алгоритмы для расчетов геометрических параметров резцов баровых машин, в частности величины и распределения усилий, действующих на рабочий орган. Такие параметры резца как ширина

и высота режущей кромки, путь резания, угол резания оказывают существенное влияние на эффективность работы режущих инструментов и их износ [1–3].

Поэтому решение задачи по созданию математических эмпирических и расчетных зависимостей, позволяющих оценить вклад каждого параметра изнашивания на процесс разрушения поверхности трения в условиях изнашивания бар, является актуальной.

#### Литературный обзор данных

Априори показывают [1, 2], что величина действующих сил трения на резце и энергия контактного взаимодействия зависит от комплекса взаимосвязанных параметров – триботехнических, конструкционных, эксплуатационных, материаловедческих и др. При этом определить преобладающий фактор, в большей степени, влияющий на энергию контакта и, в конечном итоге, на износостойкость резца на сегодняшний день пока еще весьма затруднительно. Так, по мнению Слюсаренко В.В. [5], изменение величины и направления сил, действующих на режущий инструмент, может определять характер воздействия, в частности степень закрепленности абразивных зерен – от жестко закрепленного, полужакопленного до незакрепленного, что в свою очередь, влияет на сам процесс резания твердого покрытия и изнашивание рабочего органа – резца. Однако, в работе приводится только качественный анализ влияния отсутствует методика расчета количественных численных значений параметров трибосистемы.

Вследствие этого, исследователи Беркович И. И., Громаковский Д. Г. [6], главным образом, связывают взаимодействие абразивных частиц с поверхностью резца с процессами изнашивания, которые возникают за счет сил трения, при действии которых в условиях диссипации на поверхности материала резца все же образуются и накапливаются повреждения. Так, Якубов Ф. Я., Якубов Ч. Ф. [7] указывают на то, что разрушение материала происходит именно после достижения некоторой критической величины накопленной энергии. Шагарова О.Н. и Дворук В. И. со своими коллегами [9, 10] отмечают, что образование частиц износа при контакте инструмента с породой сопровождается увеличением поверхностной энергии, которая напрямую связана с процессом трения. При этом количество энергии, поглощаемой микрообъемом изнашиваемой поверхности, зависит от энергоемкости процессов, протекающих в металле при взаимодействии с абразивом. В тоже время, в источнике нет четких данных, как и каким образом можно оценить этот вклад. Это, очевидно, связано с тем, что в зависимости от эксплуатационных режимов и параметров контактного трения, механизм разрушения поверхности материала может быть существенно различным.

Так, в исследовании Алимова О. Д. и его коллег [11] указывается, что при работе затупленными резцами силы резания и усилие подачи возрастают, что приво-

дит к значительному повышению энергозатрат на разрушение породы. Кроме того, отмечено, что наиболее эффективными являются резцы с минимальным углом резания. Поэтому, для обеспечения достаточной технологической прочности режущей кромки и износостойкости резцов, они предлагают, угол резания для режущего инструмента принимать в пределах от 75 до 85°.

Другой точки зрения по увеличению износостойкости резцов придерживаются Ведерников Н. И. и Махамов К. Х. [8, 12], которые считают, что повышение удельной энергии разрушение породы, главным образом, связано с уменьшением ширины резца. По их мнению, это обусловлено тем, что при снижении угла резания уменьшается высота контакта передней грани резца с разрушаемым массивом, и выход отделяемых элементов породы практически не затруднен. Поэтому затраты энергии на проходку твердых слоев понижаются, а эффективность процесса резания (разрушения) породы повышаются. По мнению Кузнецовой В. Н. [13], доминирующая величина суммарной силы сопротивления грунта разработке приходится на лобовые поверхности режущих рабочих органов землеройных машин, однако, количественная оценка и расчет не приведены. Самый полный анализ факторов, определяющий производительность резания породы приведен в работе [4], однако в нем не учитывается такой важный фактор как степень закрепленности абразивных частиц, который влияет на механизм изнашивания, что в конечном итоге обуславливает получение некорректных результатов.

Таким образом, единая точка зрения на проблему оценки влияния триботехнических параметров рабочих органов на процесс разрушения поверхности инструментов отсутствует, анализ априори показал недостаточность, бессистемность, а в некоторых аспектах и противоречивость данных, что требует настоящего проведения целенаправленных дальнейших исследований.

#### Методика проведения расчетов

Параметры резания асфальтобетона следующие: рабочая скорость машины 60 м/час; скорость резания (скорость перемещения резцов)  $V = 3 \pm 0,5$  м/с, угол наклона бара 70°. При длине бара  $L_b = 2$  м длина цепи  $L_{\text{ц}} = 5,244$  м. Работы проводились на баровой установке на базе трактора МТЗ-82, с режущим органом «Урал-33» с резцами РП-3. Так как срок службы резцов составляет до 3 смен (до 24 часов работы машины), то после каждой смены нами были отобраны по 5 резцов. После проведения работ резцы очищались от грязи мягкой металлической щеткой, промывались в ацетоне. Замеры проводились по 3-м основным геометрическим параметрам резцов, необходимых для расчета сил: высота и ширина резца, угол резания с помощью штангенциркуля ШЦ 1-125-0,1, угломера типа 1-2ГОСТ 5378-88.

## Результаты исследований

Рассчитать затраченную энергию взаимодействия реза бара возможно исходя из классического понимания работы трения. Так при этом суммарная энергия работы резания (разрушения) асфальтобетона [4]:

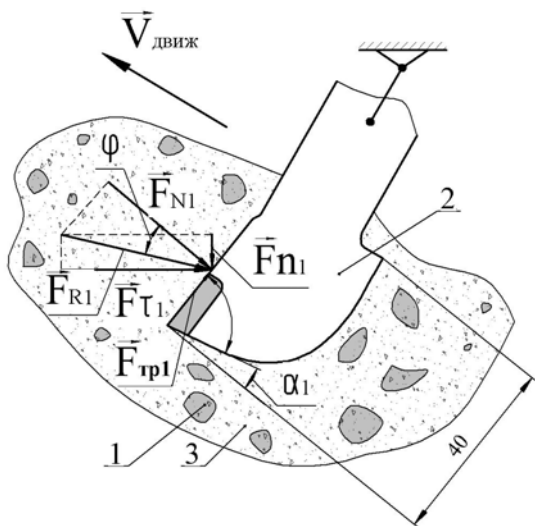
$$A_{mp} = F_{mp} \cdot l, \quad (1)$$

где  $A_{mp}$  – работа трения, Дж;  $F_{mp}$  – сила трения, Н;  $l$  – путь трения, м.

Анализ схемы силового взаимодействия (рис. 1) показывает, что при работе реза на его переднюю грань передается сила давления разрушаемого массива породы  $F_{N1}$ . Под воздействием этой силы давления возникает на передней грани сила трения  $F_{mp1}$  формирующаяся результирующая нагрузка на рабочем инструменте  $F_{R1}$ , которая отклонена от нормали к рабочей поверхности реза на угол трения  $\varphi$ . Равнодействующую этих сил  $F_{R1}$  можно разложить на составляющие по осям координат:  $F_{\tau1}$  – сопротивление резанию передней поверхностью реза и  $F_{n1}$  – сопротивление подаче реза на забой. Соответственно, забой – поверхность массива породы (отделенной массы породы), которая перемещается в процессе горных работ по выемке.

Таким образом, силу трения, действующая на переднюю грань реза можно определить как:

$$F_{mp} = \mu \cdot F_{N1}, \quad (2)$$



**Рис. 1.** Схема силового взаимодействия на переднюю грань реза бара при резании асфальтобетона: 1 – твердые частицы абразива; 2 – резац; 3 – битумная связка;  $F_{n1}$  – нормальная составляющая или сопротивление подачи реза на забой;  $F_{\tau1}$  – касательная составляющая или сопротивление резанию передней гранью реза;  $\alpha$  – угол резания инструмента;  $\varphi$  – угол трения грунта о сталь ( $\varphi = 25 \dots 45^\circ$ ) [14]

где  $\mu$  – коэффициент трения асфальтобетона по стали,  $\mu = 0,5$ ;  $F_{N1}$  – нормальная сила, действующая перпендикулярно передней грани барового реза, Н.

При этом, нормальную составляющую силы  $F_{N1}$  можно легко представить в виде:

$$F_{N1} = F_{R1} \cdot \cos \varphi, \quad (3)$$

где  $F_{R1}$  – равнодействующая сила, Н;  $\varphi$  – угол трения асфальтобетона о сталь,  $\varphi = 30^\circ$ .

Исходя из этого, равнодействующую силу выразим в виде:

$$F_{R1} = \sqrt{F_{n1}^2 + F_{\tau1}^2}, \quad (4)$$

где  $F_{n1}$  – нормальная составляющая или сопротивление подачи реза на забой, Н;  $F_{\tau1}$  – касательная составляющая или сопротивление резанию передней гранью реза, Н.

Нормальная составляющая  $F_{n1}$ :

$$F_{n1} = F_{y\delta} \cdot b \cdot h \cdot k_\alpha \cdot k_v \cdot k_\phi \cdot k_{\delta\lambda} \cdot k_{np} \cdot \operatorname{ctg}(\alpha + \varphi). \quad (5)$$

Касательная составляющая  $F_{\tau1}$ :

$$F_{\tau1} = F_{y\delta} \cdot b \cdot h \cdot k_\alpha \cdot k_v \cdot k_\phi \cdot k_n \cdot k_{np}, \quad (6)$$

где  $F_{y\delta}$  – удельное сопротивление резанию грунта,  $F_{y\delta} = 0,15$  МПа;  $b = 0,013$  м,  $h = 0,04$  м – ширина и толщина среза, м;  $k_\phi$  – коэффициент формы передней грани,  $k_\phi = 1$ ;  $k_\alpha$  – коэффициент, учитывающий влияние угла резания, принимаем  $k_\alpha = 1,23$ ;  $k_v$  – коэффициент влияния скорости резания (при  $v_{рез} = 1 \dots 10$  м/с,  $k_v = 1,01 \dots 1,7$ ). Примем  $k_v = 1,18$ ; – коэффициент, учитывающий пространственность процесса резания (зависит от соотношения толщины и ширины среза),  $k_{np} = 0,68$ ; – коэффициент блокированности реза;  $k_n = 0,57$ .

Таким образом, работу силы трения, учитывая все приведенные выражения и подставляя их в формулу (1), получим:

$$A_{mp1} = \sqrt{F_{n1}^2 + F_{\tau1}^2} \cdot \cos \varphi \cdot \mu \cdot l = \sqrt{(F_{y\delta} b h k_\alpha k_v k_\phi k_{\delta\lambda} k_{np} \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha))^2 + (F_{y\delta} b h k_\alpha k_v k_\phi k_{\delta\lambda} k_{np})^2} \cdot \cos \varphi \cdot \mu \cdot l, \quad (7)$$

Вся последовательность расчета силы трения и энергии, затрачиваемой на ее преодоление, сведена в алгоритм (рис. 2). В то же время расчет силы трения реза

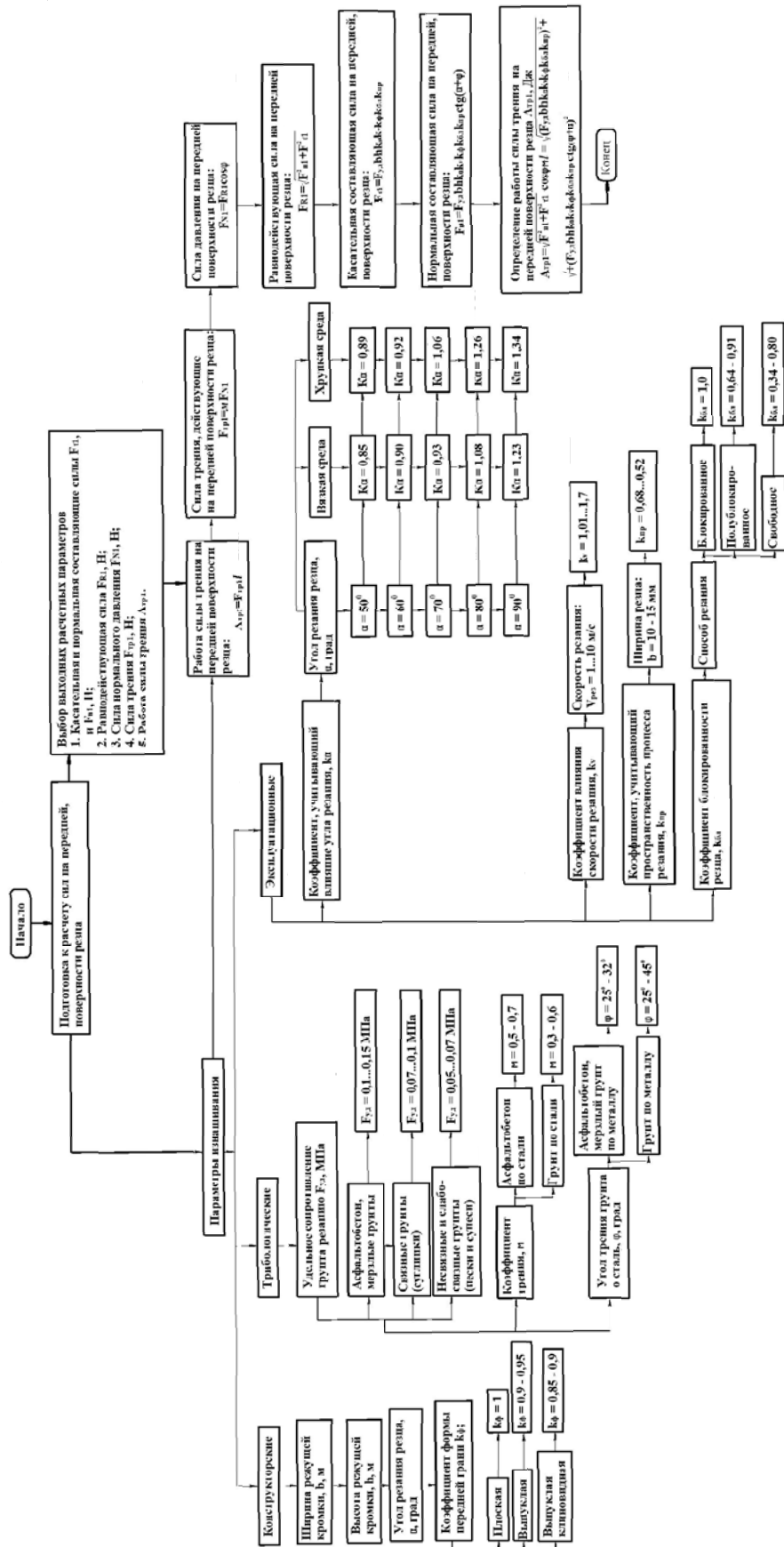


Рис. 2. Алгоритм проведения расчета основных действующих сил на резец баровой машины

требует дополнительного анализа, что связано с необходимостью учесть следующие параметры:

1.  $F_{уд}$  – удельное сопротивление резанию грунта, в основном, зависит от параметров грунта, таких как гранулометрический состав, влажность, плотность и температура. Из-за отсутствия данных в литературе об удельном сопротивлении асфальтобетона, можно принять то, что он соответствует  $F_{уд}$  для мерзлых грунтов. Это объясняется тем, что мерзлый грунт, как и асфальтобетон обладают высокими значениями предела прочности при сжатии:  $\sigma_{сж} = 3,9 - 8,3$  МПа для мерзлого грунта при температуре  $-5^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma_{сж} = 3,5 - 6,2$  МПа для асфальтобетона при температуре  $5 - 10^{\circ}\text{C}$ . Принимаем  $F_{уд} = 0,15$  МПа [15];

2. Ширина инструмента (ширина среза),  $b$ , м. Ширина режущей кромки барового резца  $b = 0,013$  м;

3. Высота рабочей части резца (высота среза),  $h$ , м. Высота рабочей части резца (высота передней грани)  $h = 0,04$  м;

Таким образом, площадь срезанного микрообъема  $S = b \cdot h = 0,013 \cdot 0,04 = 0,00052$  м<sup>2</sup>.

4. Коэффициент формы передней грани  $k_{\phi}$ :

- для резцов с плоской передней гранью  $k_{\phi} = 1$ ;

- для резцов с выпуклой передней гранью  $k_{\phi} = 0,90 - 0,95$ ;

- для резцов с выпуклой клиновидной передней гранью  $k_{\phi} = 0,85 - 0,90$  [16];

5. Коэффициент, учитывающий влияние угла резания  $k_{\alpha}$ , определяется согласно таблице 1 [15], где нижний предел принимается для вязкой абразивной среды, верхний предел – для хрупкой.

**Таблица 1** – Значения коэффициента влияния угла резания  $\alpha$

Угол резания $\alpha, ^{\circ}$	50	60	70	80	90
Коэффициент $k_{\alpha}$	0,85–0,89	0,9–0,92	0,93–1,06	1,08–1,26	1,23–1,34

6. Коэффициент влияния скорости резания  $k_v$  (при  $v_{рез} = 1 \dots 10$  м/с,  $k_v = 1,01 \dots 1,7$ ). Примем  $k_v = 1,18$  [16];

7. Коэффициент, учитывающий пространственность процесса резания, который зависит от соотношения толщины и ширины среза  $k_{np}$ . Так, при ширине режущей кромки  $b = 10 - 15$  мм, коэффициент  $k_{np} = 0,68 - 0,52$  [16]. Принимаем  $k_{np} = 0,68$ ;

8. Коэффициент блокированности резца. Для полублокированной схемы резания [5, 17] коэффициент блокированности определяется согласно таблице 2,  $k_n = 0,65$ .

**Таблица 2** – Значение коэффициента блокированности в зависимости от способа резания

Способ резания	Значение коэффициента блокированности $k_n$
Блокированное	1
Полублокированное	0,64–0,91
Свободное	0,34–0,8

9. Угол трения  $\phi$  грунта по металлу, находящийся в пределах  $25 - 45^{\circ}$ ; для мерзлого грунта  $\phi = 25 - 32^{\circ}$ . Мерзлый грунт – это многокомпонентная система, в которой имеются такие составляющие как твердая, жидкая, газообразная фазы и лед, а асфальтобетон состоит из вязущего материала – битума и минеральных составляющих. Таким образом, твердая фаза – абразивные частицы в асфальтобетоне, как и в мерзлом грунте, жестко закреплены, и угол трения  $\phi$  для асфальтобетона принимаем  $\phi = 30^{\circ}$ ;

10. Коэффициент трения грунта по стали зависит, главным образом, от нормального давления на грунт, характера сложения грунта (нарушенное, ненарушенное),  $\mu$ . В зависимости от типа грунта коэффициент трения  $\mu$  находится в пределах  $0,4 - 0,7$ . Принимаем коэффициент трения асфальтобетона по стали  $\mu = 0,5$ ;

11. Пройденный путь, в нашем случае равен длине цепи,  $l_y$ , м. При длине бара  $2$  м,  $l_y = 5,244$  м. Однако, в контакте с асфальтобетоном находится не все резцы, расположенные в цепи. При глубине резания  $h = 1600$  мм, длина цепи, контактирующей с абразивом, составляет около  $3,985$  м. Поэтому при расчете энергии на преодоление сил трения необходимо учитывать  $l_y = 3,985$  м (около 55 резцов из общего количества 72 штук).

Все результаты замеров и расчетов занесены в таблицы 3 и 4.

Анализ расчетных данных таблицы 4 позволил определить, что величины действующих сил на передней грани резца зависят от ее площади (ширины режущей кромки и высоты рабочей части резца), которая является площадкой контакта с разрушаемым массивом породы. На начальном этапе работы резца ( $t \approx 0,5$  ч,  $l = 4,1 \cdot 10^3$  м) передняя грань резца воспринимает максимальные значения силы трения и работы на их преодоление ( $F_{mp} = 20,95$  Н,  $A_{mp} = 83,48$  Дж), но при увеличении машинного времени баровой установки ( $t = 24$  ч), соответственно и пути трения ( $l = 196,74 \cdot 10^3$  м), сила трения и энергия на их преодоление понижаются ( $F_{mp} = 5,61$  Н,  $A_{mp} = 22,35$  Дж). Это объясняется тем, что площадь контакта передней грани режущего инструмента уменьшается.

Результаты линейного износа резцов (см. табл. 5, рис. 3) по передней грани и по ее высоте позволили нам рассчитать удельный линейный износ. Удельный линейный износ резца определяется величиной

**Таблиця 3** – Замеры основных геометрических параметров резцов (средние значения)\*

Машинное время работы, ч	Ширина режущей кромки (ширина среза), $b$ , м	Высота рабочей части резца (высота среза), $h$ , м	Угол резания, $\alpha$ , град	Пройденный путь резца, $l$ , $\cdot 10^3$ м
$\approx 0,5$	0,013	0,04	85	5,4
8	0,011	0,035	77	86,3
16	0,009	0,032	74	172,6
24	0,006	0,027	72	258,9

\* В таблице представлены средние значения

**Таблиця 4** – Расчет действующих нагрузок на резец и работы на преодоление силы трения по передней грани

№ п/п	Машинное время работы, $t$ , машино-часов	Путь трения резца, $l$ , $\cdot 10^3$ м	Силы, возникающие при взаимодействии резца с асфальтобетоном					
			Нормальная составляющая силы, $F_n$ , Н	Касательная составляющая силы, $F_\tau$ , Н	Равнодействующая сила, $F_R$ , Н	Нормальная сила, $F_N$ , Н	Сила трения, $F_{mp}$ , Н	Работа силы трения, $A_{mp}$ , Дж
1	$\approx 0,5$	4,1	-20,4	43,9	48,4	41,9	20,95	83,48
2	8	65,58	-15,72	33,7	37,19	32,2	16,1	64,16
3	16	131,16	-5,78	23,2	23,9	20,7	10,35	41,24
4	24	196,74	-2,67	12,67	12,95	11,21	5,61	22,35

линейного износа, приходящейся на единицу работы силы трения:

$$I_{уд1} = \frac{\Delta H_{cp1}}{A_{mp1}}, \quad (8)$$

где  $\Delta H_{cp1}$  – средняя величина линейного износа резца по передней грани,  $\Delta H_{cp1}$  – средняя величина линейного износа по высоте, мм (см. табл. 5, рис. 3);  $A_{mp}$  – работа на преодоление сил трения по передней грани, Дж (таблица 4).

Анализ механизма разрушения барового инструмента показал, что при работе новых резцов на их передних гранях сосредоточены высокие контактные давления, что сопровождается большим сопротивлением трения между неразрушенным массивом асфальтобе-

тона и инструментом и износом режущего инструмента. Перед резцом образуется уплотненное ядро (рис. 4) из раздробленного асфальтобетона, перемещающееся по мере движения режущего инструмента с высокой скоростью, что приводит к дополнительному трению между резцом и абразивом. При этом абразивные частицы, прижимаясь к передней поверхности резца, осуществляют наибольшее силовое воздействие на нее.

Это связано с тем, что в результате изнашивания происходит скругление режущих кромок резца, что влечет за собой повышение величины силы сопротивления перемещению. Выше приведенные изменения обуславливают уменьшение угла резания (с  $85^\circ$  до  $72^\circ$ ) и площадки контакта резца с абразивной средой с  $0,00052 \text{ м}^2$  до  $0,00016 \text{ м}^2$  (см. табл. 3, рис. 5), при этом результаты производственных испытаний показывают постоянное увеличение износа.

**Таблиця 5** – Измерение линейного износа по передней грани резца и по высоте (см. рис. 3)

Машинное время работы, ч	Путь трения резца, $l$ , $\cdot 10^3$ м	Линейный износ по передней грани, $\Delta H_4$ , $\times 10^{-3}$ м					Линейный износ резца по высоте, $\Delta H_1$ , $\times 10^{-3}$ м	Удельный линейный износ резца по передней грани, мм/Дж	Удельный линейный износ резца по высоте, мм/Дж
		Сечение 1-1	Сечение 2-2	Сечение 3-3	Сечение 4-4	Сечение 5-5			
$\approx 0,5$	4,1	0,13	0,42	0,89	1,06	1,18	0,5	0,0088	0,0061
8	65,58	0,29	0,81	1,2	1,52	2	4,87	0,0182	0,0761
16	131,16	0,77	1,43	2,18	2,89	3,53	8	0,0524	0,1950
24	196,74	0,88	2,03	3,2	4,03	7,00	13	0,1535	0,5830

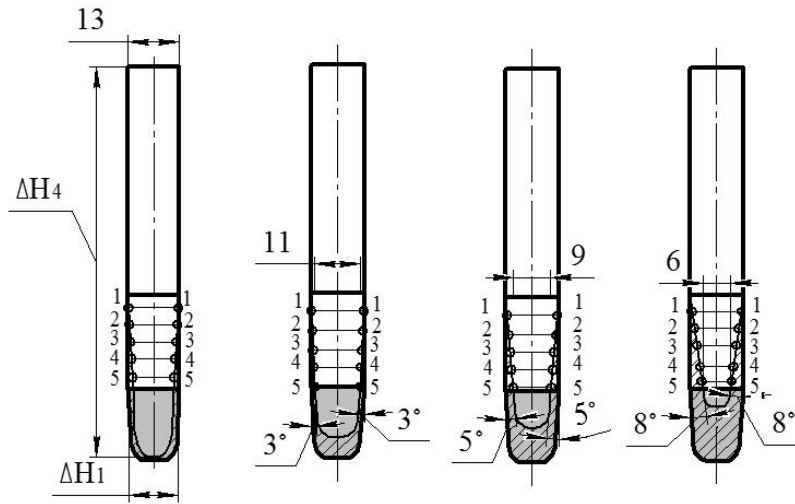



Рис. 3. Эпюры износа исследуемых резцов:  – изношенный металл;  $\Delta H_1$  – линейный износ по передней грани, мм;  $\Delta H_4$  – линейный износ по высоте резца, мм

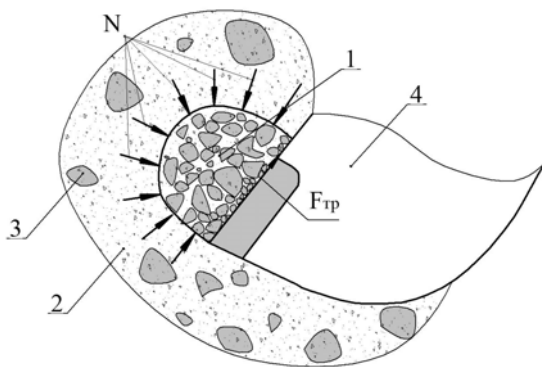


Рис. 4. Схема разрушения асфальтобетона баровым режущим инструментом:  $N$  – усилия, действующие на переднюю грань;

1 – уплотненное ядро; 2 – битумная связка; 3 – абразивные частицы; 4 – рабочая часть резца



Рис. 5. Характер износа передней грани резцов

Размеры уплотненного ядра снижаются, следовательно, это не требует больших значений усилий резания, поскольку выход отделяемых элементов (раздробленного абразива) из прорезцово́й зоны не будет затруднен. Весь объем разрушенного массива породы не

будет выходить на поверхность, а попадет обратно в образованную резцами выемку.

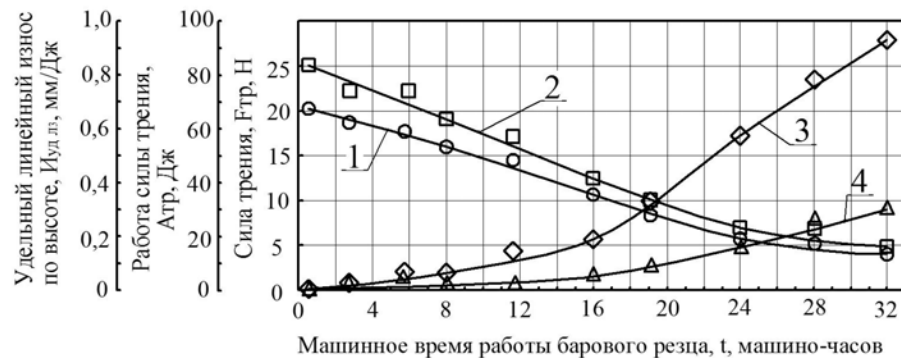
Анализ зависимостей силы трения (кривая 1) и работы (кривая 2) для передней грани (рис. 6) показывает, что снижение сил и работы обусловлено уменьшением площади передней грани резца, контактирующей с абразивной массой, вследствие затупления режущих кромок и износа режущего инструмента. В тоже время удельный линейный износ резца (кривая 3, 4) с увеличением времени работы баровой машины возрастает.

### Выводы

Разработан алгоритм расчета сил, позволяющий правильно выполнить расчет сил на передней поверхности барового резца и определить работу сил трения. При расчете сил трения и энергии на их преодоление нами учитывались геометрические параметры инструмента (ширина и высота режущего инструмента, угол резания).

Анализ полученных расчетных и графических данных показал:

- максимальный износ режущих инструментов зарегистрирован по передней грани резцов, что связано с уменьшением ширины режущей кромки ( $b = 0,013$  м при  $t \approx 0,5$  м/ч до  $b = 0,006$  м при  $t = 24$  м/ч) и высотного размера резца ( $h_1 = 94,5$  мм при  $t \approx 0,5$  м/ч до  $h_1 = 82$  мм при  $t = 24$  м/ч). Это приводит к снижению сил, действующих на резец. С увеличением времени работы баровой машины, а соответственно, пути трения, зафиксирована потеря массы, геометрических размеров резца, уменьшение затрат энергии для разработки асфальтобетона, в результате снижения объема разрабатываемого резцом абразива, что, в свою очередь, не обеспечивает требуемую производительность резания по сравнению с новым инструментом. При этом удельный износ резцов будет постепенно возрастать.



**Рис. 6.** Характер изменения силы трения и энергии на их преодоление в зависимости от машинного времени работы барового реза в асфальтобетоне: изменение силы трения (кривая 1), работы силы трения (кривая 2) и удельного линейного износа реза по передней грани (кривая 3) и удельного линейного износа реза по высоте (кривая 4) в зависимости от машинного времени работы барового реза

- сила трения зависит от геометрических параметров реза (ширины и высоты рабочей части инструмента, угла резания, заднего угла); удельного сопротивления асфальтобетона резанию  $F_{уд}$ , формы передней грани, схемы резания, скорости резания, тогда как работа силы трения зависит от пройденного пути трения реза, формы траектории и величины силы трения;

- максимальные значения силы трения (16–21 Н) и работы на их преодоление (65–84 Дж) достигаются на начальном этапе работы баровых резцов ( $t \approx 0,5$ –8 машино-часов работы баровой машины), а минимальные ( $F_{тр} = 4$ –6 Н,  $A_{тр} = 16$ –22 Дж) – соответствуют предельно изношенному режущему инструменту (24–32 машино-часа работы).

- после работы реза в асфальтобетоне в пределах пути трения  $200 \times 10^3$  м зафиксирован максимальный линейный износ инструмента по передней грани (по высоте  $\Delta H_{1cp} = 15$  мм ( $\approx 16\%$ ) от всей длины реза 95 мм, по ширине режущей кромки  $\Delta H_{4cp} = 4,51$  мм ( $\approx 35\%$ ) от ширины режущей кромки 13 мм).

Таким образом, силы трения, образующиеся в результате взаимодействия абразивных частиц с рабочими поверхностями барового реза, приводят к рассеянию (диссипации) энергии, что проявляется в образовании тепла на контакте реза – абразивная среда. К тому же, это приводит к разрушению режущего инструмента, т. е. к его износу. Знание величины энергии на преодоление сил трения дает нам возможность прогнозировать, на каком этапе работы режущего барового органа произойдет значительное разрушение поверхности реза, т. е. снижение производительности его работы из-за уменьшения работы сил трения, геометрических размеров инструмента и объема разрабатываемого асфальтобетона.

Исходя из вышеизложенного, способом повышения срока службы баровых резцов является армирование рабочих поверхностей износостойким материалом. Результаты этой работы будут использованы нами в

дальнейшем для: 1) разработки упрочняющего износостойкого материала и технологии его нанесения; 2) оптимизации геометрической формы реза.

#### Список литературы

1. Попов С. М. Триботехнічні та матеріалознавчі аспекти руйнування сталей і сплавів при зношуванні / С. М. Попов, Д. А. Антонюк, В. В. Нетребко. – Запоріжжя : ЗНТУ, ВАТ «Мотор Січ», 2010. – 368 с.
2. Popov S.N. Tribotechnical analysis of the influence of cutting parameters asphalt covering on wear rate of a bar cutter / Popov S.N., Andrienko S.V. // Тиждень науки – 2013 : зб. тез доп. щоріч. наук.-практ. конф. викладачів, науковців, молодих учених, аспірантів, студентів ЗНТУ (Запоріжжя, 15–19 кв. 2013 р.). В 4-х т. Т. 1 / відп. ред. Ю.М. Внуков. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2013.
3. Попов С. Н. Исследование характера изнашивания и анализ механизма абразивного разрушения рабочих органов баровых машин / С. Н. Попов, С. В. Андриенко // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2013. – № 1. – С. 50–57.
4. Сукач М. К. Різання ґрунту двосекційним похилим ланцюговим робочим органом / М. К. Сукач, С. І. Лисак // ГБДММ, №76. – 2010. – С. 59–65.
5. Слюсаренко В. В. Методические указания для выполнения лабораторных работ по «Теории резания грунтов» / В. В. Слюсаренко, А. В. Русинов, Д. А. Соловьев. – Саратов : Саратовский гос. агр. ун-т им. Н. И. Вавилова, 2002. – 48 с.
6. Беркович И. И. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения / И. И. Беркович, Д. Г. Громаковский. – Самара, 2000. – 139 с.
7. Якубов Ф. Я. Особенности проявления закономерностей физической мезомеханики при трении и износе / Ф. Я. Якубов, Ч. Ф. Якубов // Вчені записки Кримського інженерно-педагогічного університету. Збірник наукових праць. – 2009. – № 18. – С. 5–9.
8. Маххамов К. Х. Расчет износостойкости машин. Учебное пособие / К. Х. Маххамов. – Ташкент : ТашГТУ, 2002. – 144 с.
9. Дворук В. І. Визначення поверхневої енергії металів при абразивному зношуванні / В. І. Дворук, М. В. Кіндрачук, О. В. Герасимова // Фізика і хімія твердого тіла. –



2006. – Т. 7, № 3. – С. 560–563.
10. Шагарова О. Н. Факторы, влияющие на долговечность горно-обогатительного оборудования при абразивном изнашивании / О. Н. Шагарова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010, №11. – С. 178–181.
  11. Алимов О. Д. Об износе цепного исполнительного органа при резании мерзлых грунтов / О. Д. Алимов, И. Г. Басов, Ф. Ф. Зелингер // Известия Томского ордена трудового красного знамени политехнического института им. С. М. Кирова. – 1965. – Т. 129. — С. 40–47.
  12. Ведерников Н.И. Конспект лекций «Горные машины и комплексы для добычи и обогащения полезных ископаемых». Для студентов 3 и 4 курса специальности 6.090216 «Горное оборудование» дневной и заочной форм обучения. – Алчевск : ДонГТУ. – 2007. – 134 с.
  13. Кузнецова В. Н. Развитие научных основ взаимодействия контактной поверхности рабочих органов землеройных машин с мерзлыми грунтами : автореф. дис. на соискание учен. степени доктора техн. наук: спец. 05.05.04 «Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины» / В. Н. Кузнецова. – Омск, 2009. – 52 с.
  14. Кухар И. В. Машины и механизмы садово-паркового и ландшафтного строительства: Учебное пособие по курсовому проектированию / И. В. Кухар. – Красноярск : СибГТУ, 2006. – 124 с.
  15. Солод В. И. Проектирование и конструирование горных машин и комплексов / В. И. Солод, В. Н. Гетопанов, В. М. Рачек. – М. : Недра, 1982. – 350 с.
  16. Малевич Н. А. Горнопроходческие машины и комплексы / Н. А. Малевич. – М. : Недра, 1980. – 384 с.
  17. Слепченко В. А. Обоснование выбора основных параметров режущего инструмента экскаваторов траншейных бесковшовых : автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.05.04 «Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины» / В. А. Слепченко. – Томск, 2004. – 185 с.

Одержано 05.12.2013

**Попов С.М., Андриєнко С.В. Алгоритм розрахунку енергії контактної взаємодії ріжучого інструменту барової машини в умовах зношування із закріпленням абразивом**

*Досліджений механізм взаємодії при контактному терті поверхонь барового різця з асфальтобетоном. Розроблений комплексний системний алгоритм методики емпіричного розрахунку сил тертя і роботи робочого органу бари. Проведений аналіз зміни величини сили тертя й енергії в залежності від питомого лінійного зносу різців.*

**Ключові слова:** *різальна кромка, різець, сила тертя, робота сили тертя, геометричні параметри різця, передня грань різця, кут різання, шлях тертя, питомий знос.*

**Popov S., Andrienko S. Algorithm for calculating the energy of contact interaction of the operating tool of the bar machine in conditions of wear with a fixed abrasive**

*The mechanism of interaction at contact friction of the surfaces of the bar cutter with asphalt is studied. A complex system algorithm for empirical calculating of the friction forces and work of the operating tool of the bar machine is designed. Analysis method of the influence of the value friction force and energy in depending of the specific linear wear of cutters is proposed.*

**Key words:** *the cutting edge, cutter, the friction force, the work of the friction force, geometrical parameters of the cutter, the front face of the tool, the cutting angle, the friction distance, the specific wear.*