

УДК 621.891  
DOI: 10.12737/20236

## ТРЕНИЕ И ИЗНОС

С.Г. Бишутин, А.Г. Суслов

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ ШЛИФОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ

Представлена математическая модель изнашивания поверхности, имеющей отклонение формы и расположения, шероховатость, волнистость и сформированный при финишной абразивной обработке поверхностный слой. Приведены результаты

триботехнических испытаний шлифованных стальных поверхностей.

**Ключевые слова:** поверхность трения, скорость изнашивания поверхности, математическое моделирование, абразивная обработка.

S.G. Bishutin, A.G. Suslov

### MATHEMATICAL MODELING OF GROUND FRICTION SURFACE WEAR PROCESS

Many factors affecting considerably surface wear cannot be taken into account within the bounds of existing approaches to the mathematical description of this process. It is well-known that the modes of finish grinding have a significant influence upon wear resistance of a friction surface. It is explained, for example, by differences in a structural – phase state of a surface layer formed in the course of thermal and force impact of abrasion. Therefore, for reliable forecasting of the resource of many tribo-couplings it is necessary to estimate friction surface wear resistance taking into account the influence of conditions and modes of finishing abrasion.

The mathematical modeling of the process under consideration allowed obtaining an equation for the computation of a wear rate of run-in ground friction

surfaces and non-run-in ones in which pressure in a contact, slip velocity, abrasion modes, form errors in a friction surface and also a state of a surface layer and a position error of a friction surface in a coupling are taken into account.

Experimental researches have confirmed a possibility of use in practice the mathematical dependences obtained.

The researches carried out allow forecasting more reliably ground friction surface wear of machinery and mechanisms.

**Key words:** friction surface, surface wear velocity, mathematical modeling, abrasion.

Несмотря на успехи, достигнутые современной трибологией, проблему моделирования процесса изнашивания нельзя считать решенной. Множество факторов, существенно влияющих на изнашивание поверхности, невозможно учесть в рамках существующих подходов к математическому описанию данного процесса. Так, результаты исследований [1;2] показали, что режимы финишного шлифования оказывают значительное влияние на износостойкость поверхностей трения. Скорость изнашивания таких поверхностей при варьировании режимов обработки может меняться в 1,5 – 3 раза. Это объясняется различиями структурно-фазового состояния материала поверхностного слоя, фор-

мируемого в ходе термического и силового воздействия абразивной обработки. Поэтому для достоверного прогнозирования ресурса трибосопряжений необходимо оценивать износостойкость поверхностей трения с учетом влияния условий и режимов финишной абразивной обработки.

Рассмотрим подвижный контакт двух поверхностей, имеющих макроотклонения, волнистость и шероховатость (рис. 1). Контактующие поверхности 1 и 2 прижаты силой  $P$  и перемещаются друг относительно друга с постоянной скоростью  $V$ . Между поверхностями в пределах некоторой площади  $A$  образуются пятна контакта 3, на которых возникают фрикционные связи, приводящие к отделению частиц

материала с одной или двух поверхностей. Объем отделяемого материала зависит от конкретных условий изнашивания и может определяться нанообъемами (перенос группы атомов в ходе механохимических процессов, наблюдаемых при трении) и макрообъемами (вырывы материала с по-

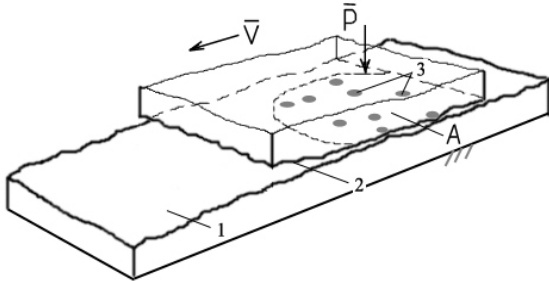


Рис. 1. Подвижный контакт двух поверхностей

верхности при заедании). Отделение частиц материала приводит к износу контактирующих поверхностей. Износостойкость поверхностей деталей оценивают величиной, обратной интенсивности или скорости изнашивания.

Получим уравнения для скоростей изнашивания контактирующих поверхностей. Износ поверхности на некоторую величину  $h$  в единицу времени произойдет, если с части  $A$  этой поверхности трения, на которой образуются пятна контакта (рис. 1), отделится объем материала, равный  $hA$ . При этом скорость изнашивания поверхности

$$\gamma = h \frac{vS}{A}, \quad (1)$$

где  $h$  – средняя толщина материала, удаляемого за одно нарушение фрикционной связи;  $v$  – частота возникновения фрикционных связей в пределах поверхности трения в единицу времени;  $S$  – площадь пятен контакта, охваченная фрикционными связями;  $A$  – часть площади поверхности трения, в пределах которой возникают пятна контакта.

Уравнение для расчета частоты возникновения фрикционных связей можно представить в виде

$$v \approx k_v \left( \frac{\tau_n}{\tau_c} \right)^w nV, \quad (2)$$

где  $k_v$  – размерный коэффициент пропорциональности;  $\tau_n$  – время существования пятна контакта;  $\tau_c$  – время существования фрикционной связи [3];  $w$  – показатель степени;  $n$  – число пятен контакта на поверхности трения;  $V$  – скорость скольжения.

При изнашивании поверхности о закреплённый абразив  $\tau_n/\tau_c=1$ .

Учитывая, что число  $n$  пятен контакта увеличивается с увеличением нагрузки  $P$  (при ненасыщенном контакте) [4], уравнение (2) можно записать следующим образом:

$$v \approx k_v \left( \frac{\tau_n}{\tau_c} \right)^w k_n PV, \quad (3)$$

где  $k_n$  – коэффициент пропорциональности между величинами  $n$  и  $P$ .

Часть  $A$  поверхности трения, на которой образуются пятна контакта, можно выразить как

$$A = A_a t_p, \quad (4)$$

где  $A_a$  – площадь поверхности трения;  $t_p$  – доля поверхности трения, на которой образуются пятна контакта (меняется с течением времени  $t$ ).

$$t_p \approx \begin{cases} b \left( \frac{y + k_t \gamma t}{H} \right)^a, & y + k_t \gamma t < H; \\ 1, & y + k_t \gamma t \geq H, \end{cases} \quad (5)$$

где  $y$  – сближение поверхностей трения под нагрузкой  $P$  в начальный момент времени  $t=0$  (зависит от контактной жесткости поверхностей);  $a$ ,  $b$  – параметры аппроксимации значений  $t_p$  степенной функцией;  $k_t$  – коэффициент, учитывающий взаимосвязь  $\gamma$  и  $t$ ;  $H$  – величина, учитывающая макроотклонение, волнистость, шероховатость и погрешность положения поверхности в паре трения (рис. 2).

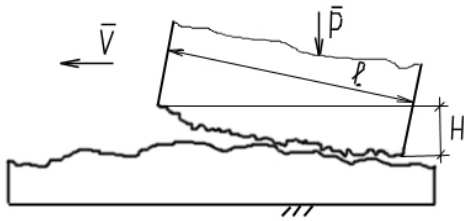


Рис. 2. Схема к определению величины Н

Для конкретной пары трения Н определяется индивидуально, так как степень влияния перечисленных факторов в каждом случае различна. Если одна из поверхностей трения значительно меньше другой, то можно рекомендовать следующую зависимость для расчета Н:

$$\gamma = hS k_v \left( \frac{\tau_n}{\tau_c} \right)^w k_n \frac{pV}{A_a t_p} = V_m k_v \left( \frac{\tau_n}{\tau_c} \right)^w k_n \frac{pV}{t_p}, \quad (6)$$

где  $V_m = hS$  – объем материала, удаляемого с поверхности трения за одно нарушение фрикционной связи (зависит от вида изнашивания и структурно-фазового состояния поверхностного слоя);  $p = P/A_a$  – давление на поверхности трения.

Как правило, контактные перемещения поверхностей значительно меньше их износ. Тогда уравнение (6) с учетом (5) для неприработанных поверхностей можно представить следующим образом:

$$\gamma = k_\gamma (pV)^{\frac{1}{1+a}} (k_t t)^{-\frac{a}{1+a}} (H/b)^{\frac{a}{1+a}}. \quad (7)$$

Величина  $k_\gamma = k_v k_n (\tau_n / \tau_c)^w V_m$  является коэффициентом, характеризующим износостойкость поверхности трения, и зависит от условий финишной абразивной обработки.

Анализ формулы (7) показывает, что скорость изнашивания является степенной зависимостью произведения  $pV$  и гиперболической зависимостью от времени  $t$  работы сопряжения. Это подтверждается результатами экспериментальных исследований многих ученых [3-8 и др.].

При достижении износа, равного Н, поверхность полностью прирабатывается и скорость изнашивания определяется уравнением

$$\gamma = k_\gamma pV. \quad (8)$$

$$H = \sqrt{\Delta^2 + H_{\max}^2 + (W_{\max} + R_{\max})^2}.$$

Здесь  $H_{\max}$ ,  $W_{\max}$ ,  $R_{\max}$  – соответственно макроотклонение (отклонение формы), волнистость и шероховатость меньшей из поверхностей трения;  $\Delta$  – погрешность положения поверхности в паре трения или сборочном узле.

Отметим, что параметры  $a$ ,  $b$ ,  $H_{\max}$ ,  $W_{\max}$ ,  $R_{\max}$  и  $\Delta$  определяются технологией сборки узла трения и финишной обработки рассматриваемой поверхности.

При подстановке (2 – 4) в (1) получим

Такой вид закона изнашивания приработанных поверхностей согласуется с результатами исследований А.С. Проникова, М.М. Хрушова, Д. Арчарда, Д.Г. Эванса, Д.К. Ланкастера и др.

Для определения скорости изнашивания второй (сопряженной) поверхности трения необходимо в формулах (7) и (8) произведение  $pV$  умножить на коэффициент, учитывающий размеры поверхности трения. Так, для пар трения с возвратно-поступательным перемещением поверхностей данный коэффициент равен  $l/L$ , где  $l$ ,  $L$  – длины поверхностей трения в направлении перемещений. Отметим, что в эти формулы необходимо подставлять величины  $a$ ,  $b$ ,  $H$  и  $k_\gamma$ , которые характеризуют состояние сопряженной поверхности трения.

Уравнение (8) можно представить в виде

$$\gamma = ckpV,$$

где  $c$  – размерный коэффициент, зависящий от условий изнашивания поверхности;  $k$  – безразмерный коэффициент износостойкости материала поверхностного слоя детали пары трения.

Значение  $k$  будет определяться структурно-фазовым состоянием материала поверхностного слоя, зависящим от условий и режимов финишной абразивной

обработки. Получим формулу для расчета коэффициента  $k$ .

Анализ процесса абразивной обработки показал, что существует четыре фактора, в наибольшей степени определяющие структурно-фазовое состояние поверхностного слоя:  $\dot{\epsilon}$  – скорость деформирования материала в ходе обработки,  $\text{с}^{-1}$ ;  $a_z$  – глубина внедрения вершин абразивных зерен в обрабатываемый материал, м;  $\rho$  – радиус скругления вершин абразивных зерен, м;  $\lambda$  – интенсивность контактирования рассматриваемого участка поверхности заготовки с абразивным инструментом,  $\text{с}^{-1}$ . Эти факторы комплексно характеризуют термическое и силовое воздействия абразивной обработки, формирующие поверхностный слой [1;2;9;10].

Запишем уравнение размерности величины  $k$ , полагая, что существует однозначная взаимосвязь между  $k$  и  $\dot{\epsilon}$ ,  $a_z$ ,  $\lambda$ ,  $\rho$ .

$$L^0 T^0 = (T^{-1})^\alpha (L)^\beta (T^{-1})^\delta (L)^\varphi, \quad (9)$$

где  $T$  – время;  $L$  – длина;  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$ ,  $\varphi$  – постоянные числа.

Из уравнения (9) следует, что  $\alpha = -\delta$  и  $\beta = -\varphi$ . Тогда формулу для  $k$  можно представить в виде

$$k = \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\lambda} \right)^\alpha \left( \frac{a_z}{\rho} \right)^\beta. \quad (10)$$

Величина  $\lambda = \omega H$ , где  $\omega$  – частота вращения заготовки или число рабочих ходов абразивного инструмента в единицу времени;  $H$  – число контактов рассматриваемого участка поверхности заготовки со шлифовальным кругом.

Таким образом, величина  $k$  в полной мере отражает влияние режимов финишной абразивной обработки на износостойкость поверхности.

Для определения значений  $\alpha$  и  $\beta$  были использованы результаты экспериментов, представленные в [1;2]. Часть этих результатов представлена в таблице.

Таблица

Условия обработки и износостойкость стальных шлифованных поверхностей образцов

| Материал (твердость)           | Глубина шлифования, мкм | Время выхаживания, мин | Износ образца, мкм | Скорость изнашивания, мкм/ч |
|--------------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------|-----------------------------|
| Сталь 45 (HB 200...220)        | 20                      | 0                      | 17,0               | 1,70                        |
|                                |                         | 5                      | 9,5                | 0,95                        |
|                                | 6                       | 0                      | 12,0               | 1,20                        |
|                                |                         | 5                      | 6,3                | 0,63                        |
| Сталь 12ХН3А (HRC 58...62)     | 6                       | 0                      | 3,4                | 0,34                        |
|                                |                         | 5                      | 2,2                | 0,22                        |
| Сталь 45 (HRC 46...50)         | 20                      | 0                      | 4,8                | 0,78                        |
|                                |                         | 5                      | 3,5                | 0,35                        |
|                                | 6                       | 0                      | 3,7                | 0,37                        |
|                                |                         | 5                      | 2,9                | 0,29                        |
| Сталь 12Х18Н10Т (HB 190...210) | 20                      | 0                      | 37,0               | 3,70                        |
|                                |                         | 5                      | 15,5               | 1,55                        |
|                                | 6                       | 0                      | 18,0               | 1,80                        |
|                                |                         | 5                      | 14,0               | 1,40                        |
| Сталь 35ХГСА (HRC 40...45)     | 20                      | 0                      | 8,2                | 0,82                        |
|                                |                         | 5                      | 3,9                | 0,39                        |
|                                | 6                       | 0                      | 4,7                | 0,47                        |
|                                |                         | 5                      | 3,2                | 0,32                        |

Примечания: 1. Испытания проводились на машине трения МИ-1М по схеме «вращающийся диск - невращающийся твердосплавный индентор» при нагрузке на индентор 150 Н и скорости скольжения 1,3 м/с. 2. В качестве смазочного материала использовалось масло И-20А.

Анализ полученных результатов показывает, что коэффициент  $k$  имеет тесную корреляцию (коэффициент парной корреляции  $Q = 0,89$ ) со скоростью изнашивания

$$k = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\lambda}\right)^{0,2} \left(\frac{a_z}{\rho}\right)^{1,5};$$

$$3,5 \cdot 10^3 \leq \frac{\dot{\epsilon}}{\lambda} \leq 9 \cdot 10^6; 0,25 \leq \frac{a_z}{\rho} \leq 0,75.$$

Значения  $\dot{\epsilon}/\lambda$  и  $a_z/\rho$  можно рассчитать по формулам [9;10].

Последнее уравнение позволяет оценивать износостойкость поверхности с

поверхности (рис. 3). Можно установить, что  $\alpha = 0,2$  и  $\beta = 1,5$ . Тогда уравнение (10) применительно к условиям экспериментов имеет вид

учетом условий и режимов финишной абразивной обработки.

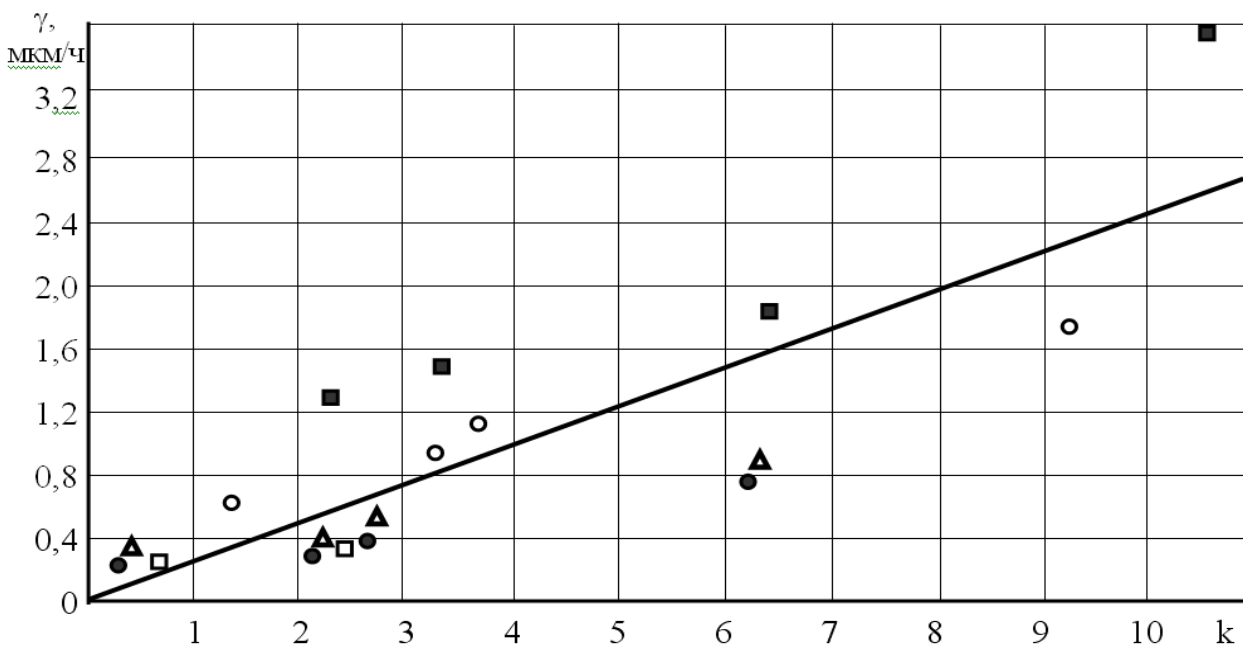


Рис. 3. Взаимосвязь скорости изнашивания  $\gamma$  и коэффициента износостойкости  $k$  материала поверхностного слоя:  $\square$  – сталь 12ХН3А (HRC 58...62);  $\circ$  – сталь 45 (HB 200...220);  $\blacksquare$  – сталь 12Х18Н10Т (HB 190...210);  $\bullet$  – сталь 45 (HRC 46...50);  $\blacktriangle$  – сталь 35ХГСА (HRC 40...45)

Таким образом, полученные результаты позволяют:

- достоверно и оперативно оценивать износостойкость поверхностей, сформированных при абразивной обработке;

- целенаправленно выбирать режимы шлифования с учетом требуемой износостойкости поверхности.

Предложенная математическая модель процесса изнашивания имеет следующие преимущества перед существующими аналогами:

- модель справедлива для основных видов изнашивания подвижных сопряже-

ний, поскольку различные механизмы разрушения поверхности трения могут быть учтены изменением коэффициента  $k_\gamma$ ;

- напрямую учитывается совместное влияние давления в контакте и скорости скольжения на скорость изнашивания поверхности;

- в рамках данной модели одной и той же совокупностью уравнений описываются период приработки и нормальное изнашивание поверхности;

- учитываются погрешности поверхности трения, образующиеся при ее обработке, а также состояние поверхностного

слоя и погрешность положения поверхности трения в сопряжении;

- появляется возможность учета влияния на износ термомеханических процессов при трении путем прогнозиро-

вания частоты образования фрикционных связей на пятнах контакта.

Проведенные исследования позволяют более достоверно прогнозировать износ шлифованных поверхностей трения деталей машин и механизмов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бишутин, С.Г. Износостойкость сформированных при шлифовании поверхностных слоев деталей машин: монография/ С.Г. Бишутин, М.И. Прудников; под ред. С.Г. Бишутина. – Брянск: БГТУ, 2010. – 100 с.
2. Бишутин, С.Г. Качество и износостойкость шлифованных поверхностей деталей автомобилей/ С.Г. Бишутин. – Брянск: Десяточка, 2011. – 100 с.
3. Громаковский, Д.Г. Физические основы, механика и технические приложения трибологии: курс лекций для техн. вузов/ Д.Г. Громаковский. – М.: Машиностроение, 2006. – 266 с.
4. Чичинадзе, А.В. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учеб. для техн. вузов/ А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше [и др.]; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.
5. Крагельский, И.В. О расчете износа поверхностей трения/ И.В. Крагельский, Г.М. Харач// Расчетные методы оценки трения и износа: сб. науч. тр. – Брянск: Приок. кн. изд-во, Брян. отд-ние, 1975. – С.5-47.
6. Крагельский, И.В. Узлы трения машин / И.В. Крагельский, Н.М. Михин. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
7. Мышкин, Н.К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии/ Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – М.: Физматлит, 2007. – 368 с.
8. Основы трибологии: учеб. для техн. вузов/ под ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Наука и техника, 1995. – 778 с.
9. Бишутин, С.Г. Обеспечение требуемой совокупности параметров качества поверхностных слоев деталей при шлифовании / С.Г. Бишутин. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 144 с.
10. Бишутин, С.Г. Структурирование поверхностных слоев деталей при финишной абразивной обработке/ С.Г. Бишутин. – Брянск: БГТУ, 2009. – 100 с.
1. Bishutin, S.G. Wear Resistance of Machinery Surface Layers Formed at Grinding: Monograph/ S.G. Bishutin, M.I. Prudnikov; under the editorship of S.G. Bishutin. – Bryansk: BSTU, 2010. – pp.100.
2. Bishutin, S.G. Quality and Wear Resistance of Ground Surfaces in Motor Car Parts/ S.G. Bishutin. – Bryansk: Desyatochka, 2011. – pp. 100.
3. Gromakovsky, D.G. Physical fundamentals, mechanics and technical applications of tribology: Lecture Course for Technical Colleges/ D.G. Gromakovsky. – M.: Mechanical Engineering, 2006. – pp. 266.
4. Chichnadze, A.V. Fundamentals of Tribology (Friction, Wear, Lubrication): Textbook of Technical Colleges/ A.V. Chichnadze, E.D. Brown, N.A. Bushe [et al.]; under the general editorship of A.V. Chichnadze. – M.: Mechanical Engineering, 2001. – pp. 664.
5. Kragelsky, I.V. On wear computation of friction surfaces / I.V. Kragelsky, G.M. Kharch// Computation Methods for Friction and Wear Estimate: Proceedings - Bryansk: Prioksk. Publishing House, Bryansk Branch, 1975. – pp. 5-47.
6. Kragelsky, I.V. Machinery Friction Units / I.V. Kragelsky, N.M. Mikhin. – M.: Mechanical Engineering, 1984. – pp. 280.
7. Myshkin, N.K. Friction, Lubrication, Wear. Physical Fundamentals and Technical Applications of Tribology/ N.K. Myshkin, M.I. Petrokovets. – M.: Physmathlit, 2007. – pp. 368.
8. Tribology Fundamentals: Textbook for Technical Colleges/ under the editorship of A.V. Chichnadze. – M.: Science and Technics, 1995. – pp. 778.
9. Bishutin, S.G. Assurance of Required Quality Parameter Totality for Parts at Grinding / S.G. Bishutin. – M.: Mechanical Engineering-1, 2004. – pp. 144.
10. Bishutin, S.G. Surface Layer Structuring of Parts at Finish Abrasion/ S.G. Bishutin. – Bryansk: BSTU, 2009. – pp. 100.

*Статья поступила в редколлегию 4.04.2016.*

*Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета  
Киричек А.В.*

**Сведения об авторах:**

**Бишутин Сергей Геннадьевич**, д. т. н., профессор кафедры «Автомобильный транспорт» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832) 51-19-97.

**Суслов Анатолий Григорьевич**, д.т.н., профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, тел.: (4832) 51-19-97.

**Bishutin Sergey Gennadievich**, D.Eng., Prof. of the Dep. "Motor Transport" Bryansk State Technical University, Phone: (4832) 51-19-97.

**Suslov Anatoly Grigorievich**, D.Eng., Prof. of Bauman State Technical University of Moscow, Phone: (4832) 51-19-97.