

**Венцель Е.С.,  
Щукин А.В.,  
Скапович В.И.**

Харьковский национальный  
автомобильно-дорожный университет,  
г. Харьков, Украина  
**E-mail:** [supercar\\_88@mail.ru](mailto:supercar_88@mail.ru)

## **О ВЗАИМОСВЯЗИ РЕСУРСА И ИЗНОСА НОЖЕЙ АВТОГРЕЙДЕРОВ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ РАБОЧИХ ОПЕРАЦИЙ**

УДК 621.869.98

Разработана математическая модель, описывающая закономерности износа ножа и учитывающая влияние различных режимов эксплуатации автогрейдера при работе его с различными грунтами с разной степенью абразивности. Получены зависимости ресурса ножа от времени его контакта работы с тремя категориями грунта. Получена эмпирическая зависимость суммарной вероятности безотказной работы ножа автогрейдера от величины его износа, а также динамической и усталостной составляющей.

**Ключевые слова:** ресурс, безотказная работа, износ, рабочее оборудование, грунт.

### **Введение**

При исследовании работы автогрейдеров выявлено, что значительное количество отказов связано с выходом из строя рабочего оборудования. При этом, как свидетельствуют данные [1, 2 и др.], до 90 % отказов обусловлено быстрым износом режущих элементов рабочих органов (РО).

Как известно, эксплуатация автогрейдеров происходит в различных условиях. При этом отдельные рабочие операции отличаются друг от друга схемами приложения внешних нагрузок, поэтому по-разному формируется нагруженность узлов. Следовательно, статистические характеристики нагруженности в общем случае могут быть постоянными. Вместе с тем можно принять, что в каждом случае сумма накопленных усталостных повреждений не зависит от последовательности возникновения нагрузочных режимов. Это позволяет представить работу автогрейдера, состоящую из отдельных типичных режимов нагружения, которые определяются так же определёнными грунтовыми условиями. Основная часть времени работы приходится на режимы, при которых его рабочий орган совершает относительно медленные вертикальные и угловые перемещения. Однако, средняя скорость последних мала по сравнению со скоростью перемещения самой машины.

Результаты экспериментальных исследований, проводимые с рабочими органами землеройно-транспортных машин (ЗТМ) в условиях связанных однородных грунтов, показывают существенные высокочастотные колебания сил резания [3]. В реальных условиях при резании грунта широкими ножами присутствует не один скол грунта, а последовательность сколов, происходящих одновременно. Пульсации, являющиеся причиной этого, не могут быть обнаружены по причине их демпфирования массами рабочего оборудования.

На числовые характеристики (математическое ожидание, дисперсия и др.) случайного процесса суммарного нагружения ножа автогрейдера оказывают влияние только числовые характеристики прочностных показателей грунта. Из-за достаточно медленного изменения прочностных показателей однородных грунтов можно представить их влияние дискретным набором характеристик. При этом в каждом конкретном случае параметры грунтовых условий неизменные.

Вместе с тем известно, что РО ЗТМ, в частности, режущие элементы автогрейдеров, работают весьма в неблагоприятных условиях. При этом наиболее ярко выраженным процессом, влияющим на долговечность РО, является изнашивание. В свою очередь, износ РО ЗТМ, главным образом, зависит от абразивности грунтов, т.е. способности их изменять поперечное сечение режущих элементов, что в конечном итоге приводит к проведению процедуры по их восстановлению или в худшем случае к отколу режущей части с дальнейшей заменой всего ножа. При этом абразивность грунтов возрастает с увеличением содержания, размера и закреплённости кварцевых частиц (оксида кремния  $\text{SiO}_2$ ) [3]. К тому же, как установлено в [4], с увеличением плотности грунта износ РО может увеличиться в 5 раз (особенно при малом содержании глинистых частиц).

### **Цель и постановка задачи**

Целью настоящей работы является определение взаимосвязи ресурса с износом ножа рабочего оборудования автогрейдера при различных динамических и знакопеременных нагрузках.

### **Изложение материалов исследования**

Одними из основных показателей надёжности РО ЗТМ являются вероятность безотказной работы и ресурс.

Всё эксплуатационное нагружение рабочего оборудования автогрейдера возможно разложить на составляющие, классифицируемые по характерным признакам [5]. В первую очередь необходимо рассмотреть такие составляющие:

$P(P_{дин})$  – вероятность безотказной работы ножа, зависящая от максимальной нагрузки, действующая на кромку ножа;

$P(h_{из})$  – вероятность, зависящая от величины, на которую изменилась толщина ножа в результате изнашивания;

$P(P_{из})$  – вероятность, зависящая от знакопеременной нагрузки.

Зная их влияние на вероятность безотказной работы всего рабочего оборудования автогрейдера, появляется возможность внести корректировки на этапе проектирования ножа.

Тогда согласно [5] найдём суммарную вероятность безотказной работы ножа автогрейдера:

$$P_{\Sigma} = P(P_{дин}) \cdot P(h_{из}) \cdot P(P_{из}). \quad (1)$$

В действительности же вероятности  $P(P_{дин})$ ,  $P(h_{из})$ ,  $P(P_{из})$  взаимосвязаны между собой следующим образом: при износе рабочей поверхности ножа на величину  $h_{из}$  изменяется сечение ножа, а следовательно, и его несущая способность. В свою очередь, от последней зависит максимальное значение усилия на кромке ножа, которое он может выдержать. От несущей способности зависит также вероятность  $P(P_{из})$ .

В результате исследований процессов резания, зарезания, стопорения и удара автогрейдера о труднопреодолимое препятствие была проведена оценка нагруженности РО [6, 7, 8]. Кроме того, было проведено исследование влияния угла установки отвала в плане на величину максимального усилия на кромке ножа отвала при ударе о труднопреодолимое препятствие.

На рис. 1 представлен, полученный нами расчетным путем, график изменения максимального усилия  $P_{max} = \max(R_x)$  на кромке ножа отвала при ударе о труднопреодолимое препятствие в зависимости от угла установки отвала в плане  $\alpha$  для трёх категорий грунта.

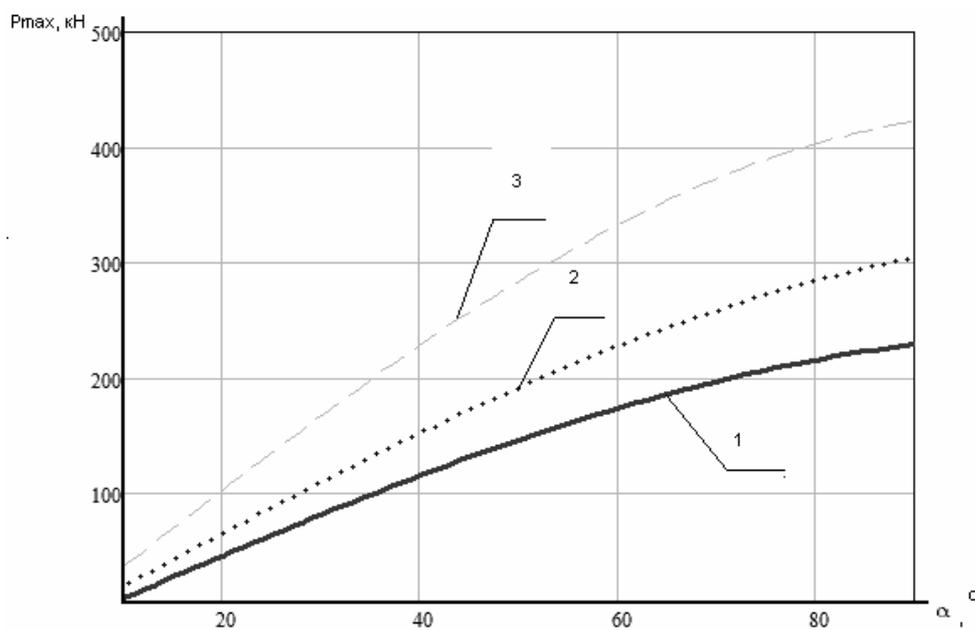


Рис. 1 – Зависимость  $P_{max}$  от угла захвата отвала  $\alpha$ :  
1 – I категория грунта; 2 – II категория; 3 – III категория

Аппроксимируя зависимость  $P_{max} = f(\alpha)$ , представленную на рис. 1, получим:

$$P_{max}(\alpha) = A \cdot \sin\left(B \cdot \frac{\alpha - C}{80}\right) + D, \quad (2)$$

где коэффициенты A, B, C и D, полученные на основании аппроксимации зависимости  $P_{max} = f(\alpha)$ , представлены в табл. 1.

Значение коэффициентов А, В, С и D

Категория грунта	A	B	C	D
I	250	1,2	5	-10
II	305	1,25	10	20
III	380	1,4	12	50

Согласно [4] будем рассматривать первые 700 часов работы ножа в грунте. Тогда зависимость износа ножа автогрейдера как случайной функции наработки в общем случае может быть представлена в виде  $h(t) = a_u t^\beta + b_u$  (рис. 2). В этом уравнении при расчетах были использованы статистические данные, полученные авторами во время эксплуатации ЗТМ. При этом было принято, что показатель  $\beta = 1/2$ ,  $b_u = 0$  [9].

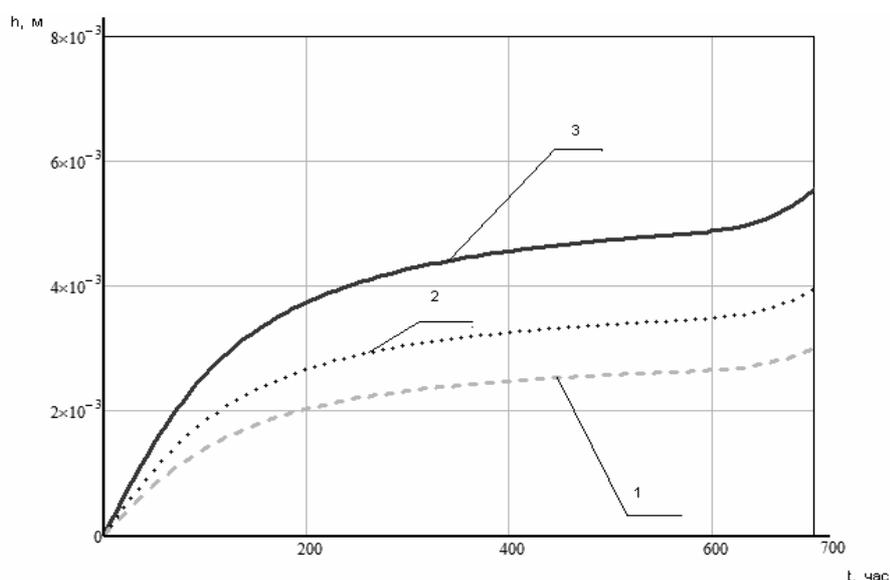


Рис. 2 – График зависимости величины износа  $h$  от наработки  $t$  для трёх разных категорий грунта: 1 – I категория грунта; 2 – II категория; 3 – III категория

Из графика на рисунке 2 видно, что на первых 50 - 100 часах работы износ происходит интенсивно и линейно. Далее износ постепенно квазистабильзируется, а затем после 500 - 600 часов значительно возрастает. Соответственно, скорость изнашивания ножа автогрейдера для каждой категории грунта может быть определена как  $v = dh_{из} / dt$  [10].

В уравнении (1) первый множитель, касающийся вероятности безотказной работы ножа и зависящий от максимальной нагрузки, был преобразован следующим образом:

$$P(P_{дин}) = 1 - \frac{1}{2\pi S_x \sigma_v} \int_0^{v_x} \int_0^{R_x} e^{-\left[ \frac{(p-\bar{p})^2}{2S_x^2} + \frac{v^2}{2\sigma_v^2} \right]} dPdv. \quad (3)$$

На рис. 3 показаны зависимости вероятности безотказной работы ножа автогрейдера  $P(P_{дин})$  от времени его эксплуатации в абразивной среде, полученные на основании применения нормального закона распределения (3).

Падающая характеристика графиков на рис. 3 свидетельствует о снижении вероятности безотказной работы ножа  $P(P_{дин})$  в процессе эксплуатации рабочего оборудования автогрейдера.

В результате аппроксимации зависимости вероятности  $P(P_{дин})$  от времени работы ножа в абразивной среде  $t$  (рис. 3) получена зависимость

$$P(P_{дин}) = 1 - 0,02 \cdot t^{1/z}, \quad (4)$$

где  $z = 2,4; 2,13; 2$  – для I, II и III категорий грунта соответственно.

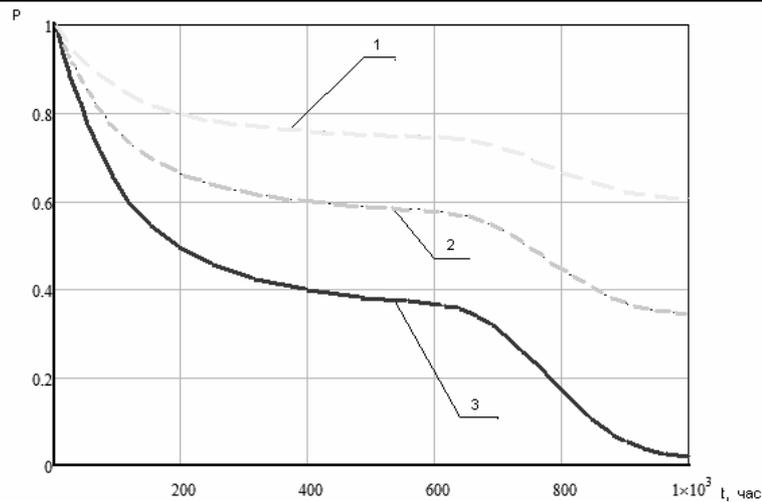


Рис. 3 – График изменения вероятности безотказной работы ножа автогрейдера  $P(P_{\text{дун}})$  от времени его работы в абразивной среде  $t$ , ч:  
1 – I категория грунта, 2 – II категория, 3 – III категория

Разработанная математическая модель суммарной вероятности (1) позволяет получить теоретическое описание изменения вероятности безотказной работы рабочего оборудования автогрейдера в процессе выполнения рабочих операций и описать изменение ресурса работы ножа автогрейдера. Исходя из принятых допущений, как было сказано выше, предложено рассматривать вероятность безотказной работы как мультипликативную функцию вероятностей, каждый аргумент которых зависит от аргумента другой вероятности. Тогда суммарная вероятность безотказной работы ножа автогрейдера будет составлять:

$$P_{\Sigma} = P(P_{\text{дун}}) \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[ \Phi \left[ \frac{P_{-1}^{\max} - m(P_{-1})}{\sqrt{2D(P_{-1})}} \right] - \Phi \left[ \frac{P_{-1}^{\min} - m(P_{-1})}{\sqrt{2D(P_{-1})}} \right] \right] \right\} \left\{ \Phi \left[ \frac{\frac{I_{np}}{T^b} - m(a_u)}{\sqrt{D(a_u)}} \right] \right\}, \quad (5)$$

где  $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$  – функция Лапласа;

$$P_{-1} = P_{0-1} - R_x;$$

$P_{0-1}$  – несущая способность при усталостном нагружении;

$R_x$  – действующая нагрузка на кромку ножа;

$m(P_{-1})$  – математическое ожидание (среднее значение) предела разности несущей способности ножа автогрейдера и максимальной нагрузки;

$D(P_{-1})$  – среднеквадратическое отклонение предела разности несущей способности и максимальной нагрузки.

В зависимости  $h(t) = a_u t^{\beta} + b_u$  рассмотрим случай предельного износа. Для этого в формулу износа вместо  $h(t)$  подставим значение предельного износа  $I_{np}$  и решим получившееся уравнение относительно  $t = T$  при  $b_u = 0$ . Тогда ресурс ножа будет иметь следующий вид:

$$T = \sqrt[\beta]{\frac{I_{np}}{a_u}}, \quad (6)$$

где  $I_{np}$  – предельный износ ножа.

На рис. 4 приведён график-поверхность  $P_{\Sigma} = f(P(P_{\max}), P(h_{из}))$ , построенная с использованием зависимости (1).

Зависимость суммарной вероятности безотказной работы рабочего оборудования  $P_{\Sigma}$  от вероятностей  $P(P_{\max})$  и  $P(h_{из})$ ,  $P_{\Sigma} = f(P(P_{\max}), P(h_{из}))$  аппроксимируем полиномом второй степени:

$$P_{\Sigma} = 0.2 + 1.08P(P_{\max}) + 0.24P(h_{из}) - 0.13P(P_{\max})^2 - 0.08P(h_{из})^2 + 0.846P(P_{\max})P(h_{из}). \quad (7)$$

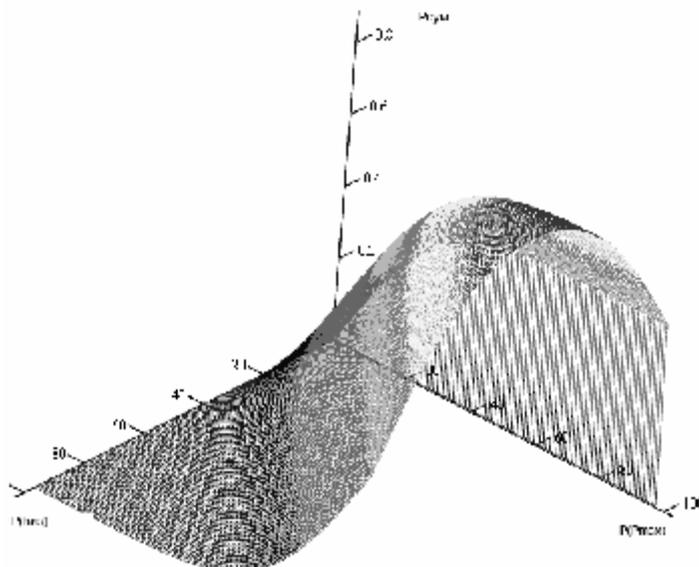


Рис. 4 – Зависимость изменения суммарной вероятности безотказной работы  $P_{\Sigma}$  от  $P(P_{\max})$  и  $P(h_{из})$

Таким образом, получена зависимость вероятности безотказной работы ножа, в которую вошли параметры износа, динамическая и знакопеременная нагрузки (рис. 4). Следует также иметь в виду, что уравнение регрессии  $P_{\Sigma} = f(P(P_{\max}), P(h_{из}))$  действительно только в пределах тех опытных данных, в частности, величины износа, на основании которых они получены. Если значения выйдут за пределы опытных данных, то в этом случае прогноз вероятности безотказной работы ножа может быть получен со значительными ошибками. Для расширения границ применения уравнений их необходимо строить на основе данных по нескольким или всем современным моделям объектов одного функционального назначения.

Зная суммарную вероятность безотказной работы, найдём ресурс ножа автогрейдера. Для этого необходимо решить уравнение (5) относительно величины  $T$ .

Функция Лапласа вычисляется только с помощью специальной таблицы. Следовательно, уравнение (5) не представляется возможным решить аналитически. Поэтому используя операторы MATLAB  $erf(x)$ , решим численно это уравнение для суммарной вероятности.

Принимая во внимание нелинейность изменения величины износа ножа от времени работы  $h_{из} = f(t)$  в абразивной среде при выполнении рабочих операций (рис. 2), получим ресурс работы ножа рабочего оборудования автогрейдера как функцию  $T = f(t)$  (рис. 5) для трёх категорий грунта.

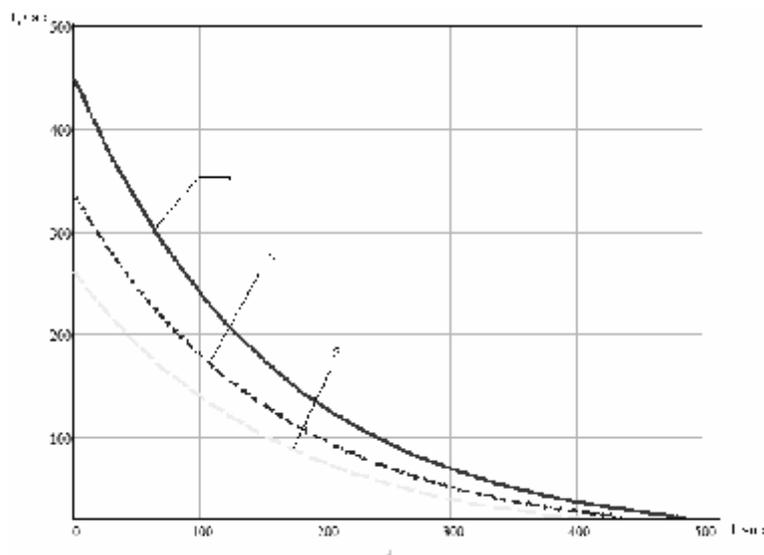


Рис. 5 – Зависимость ресурса ножа  $T$  от времени его работы в абразивной среде  $t$ :  
1 – I категория грунта; 2 – II категория; 3 – III категория

Аппроксимируя зависимость ресурса ножа от времени его работы в абразивной среде, получим следующую экспоненциальную зависимость:

$$T(t) = x \cdot e^{-\frac{t}{160}}, \quad (7)$$

где коэффициент  $x = 447; 340; 260$  – для I, II и III категорий грунта соответственно.

Полученное уравнение не противоречит классу решений мультипликативного уравнения (5) для суммарной вероятности безотказной работы ножа рабочего оборудования автогрейдера.

Таким образом, из (7) видно, что чем ниже категория грунта, тем выше ресурс работы ножа в этом грунте.

### Выводы

Полученное уравнение регрессии даёт возможность оценить степень влияния износа ножа на его ресурс в зависимости от категории грунта. Закономерность изменения ресурса от износа ножа РО автогрейдера носит экспоненциальный характер. При этом чем выше категория грунта, тем износ, а следовательно и ресурс, меньше.

### Литература

1. Густов Ю.И. Повышение износостойкости рабочих органов и сопряжений строительных машин / Ю.И. Густов // Механизация строительства. – 1996. – №5. – С. 15-16
2. Кравченко И.Н. Износостойкие материалы для восстановления деталей рабочих органов строительных и дорожных машин / И.Н. Кравченко, В.Ю. Гладков, С.В. Карцев, В.П. Тростин // Строительные и дорожные машины. – 2004. – №5. – С. 32-34.
3. Волков Д.П. Надёжность роторных траншейных экскаваторов. / Д.П. Волков, С.Н. Николаев, И.А. Марченко. – М.: Машиностроение, 1972. – 207 с.
4. Рейш А.К. Повышение износостойкости строительных и дорожных машин / А.К. Рейш – М.: Машиностроение, 1986. – 184 с.
5. Анилович В.Я. Надёжность машин в задачах и примерах / В.Я. Анилович, А.С. Гринченко, В.Л. Литвиненко. – Х.: Око, 2001. – 318 с.
6. Гречишников Б.А. Исследование средств и способов снижения нагруженности основных узлов автогрейдера : дис. ... кандидата техн. наук : 05.05.04 / Гречишников Борис Алексеевич. – Харьков, 1980. – 189 с.
7. Назаров Л.В. Динамические нагрузки на ходовое оборудование и конечные элементы трансмиссий пневмоколесных ЗТМ. / Л.В. Назаров, Б.А. Гречишников, И.А. Евтушок // Повышение эффективности работы колесных и гусеничных машин в суровых условиях эксплуатации. – Тюмень, 1996. – С. 98-103.
8. Воронович А.В. Совершенствование автогрейдеров массой 15...16 т комплектацией энергосиловыми модулями повышенной надежности : дис. ... кандидата техн. наук : 05.05.04 / Воронович Андрей Викторович. – Харьков, 2007. – 172 с.
9. Волков Д.П. Надёжность строительных машин и оборудования : учебное пособие / Д.П. Волков, С.Н. Николаев. – М.: Высшая школа, 1979. – 400 с.
10. Барейн А.Г. Повышение износостойкости и долговечности ножей куттеров при самозаточивании : дис. ... кандидата техн. наук : 05.02.04 / Барейн Ананий Генрикович. – Ставрополь, 2000. – 181 с.

Поступила в редакцию 10.04.2013

Ventsel E.S., Shchukin A.V., Skapovich V.I. **On the interrelation of life and wear of the blade when carrying out working operations.**

While examining earth-moving machines it was determined that the wear of the operating tools blades, particularly ones of the motor-graders, is most often characterized by the change in the size of the part in direction, perpendicular to the surface of friction. Hence, it has been assumed that the blade's wear appears throughout the contact area uniformly, i.e. is of the linear character.

The empiric dependence, describing the wear process of the bulldozer blade wear is known, according to which the wear occurs linearly over the whole period of time of the blade's operation in the abrasive environment, which does not take into account the dynamics of this process. Therefore, we have considered fuller characteristics of the blade wear process in terms of the dependence  $h_{uz} = f(t)$ , where  $h_{uz}$  is part wear,  $t$  is part operating length.

Working load of the shovel of the moto-grader (therefore of its blades too) is presented with the use of normal law of frequency distribution. Mathematical expectation of the normal loads is stipulated for each working operation by the complex of reasons.

As a result of the researches carried out, the dependencies of the total probability of the failure-free operation of the blade from the wear and dynamic compounds of the load to the shovel, as well as the dependencies of the blade life from the time of his operation in the abrasive environment on the 3 categories of coat have been received.

**Keywords:** resource, reliable operation, wear, work equipment, soil.

### References

1. Gustov Ju.I. Povyshenie iznosostojkosti rabochih organov i soprjazhenij stroitelnyh mashin Mehani-zacija stroitel'stva, 1996, No. 5, pp. 15–16.
2. Kravchenko I.N., Gladkov V.Yu., Karcev S.V., Trostin V.P. Iznosostojkie materialy dlja vosstanov-lenija detalej rabochih organov stroitel'nyh i dorozhnyh mashin, Stroitel'nye i dorozhnye mashiny, 2004, No. 5, pp. 32–34.
3. Volkov D.P., Nikolaev S.N., Marchenko I.A. Nadjozhnost' rotornyh transhejnyh jekskavatorov. M., 1972, 270 p.
4. Rejsh A.K. Povyshenie iznosostojkosti stroitel'nyh i dorozhnyh mashin. M.: Mashinostroenie, 1986, 184 p.
5. Anilovich V.Ja, Grinchenko A.S., Litvinenko V.L. Nadjozhnost' mashin v zadachah i primerah. H. Oko, 2001, 318 p.
6. Grechishnikov B.A. Issledovanie sredstv i sposobov snizhenija nagruzhenosti osnovnyh uzlov av-togrejdera : dis. ... kandidata tehn. nauk : 05.05.04, Kharkov, 1980, 189 p.
7. Nazarov L.V., Grechishnikov B.A., Evtushok I.A. Dinamicheskie nagruzki na hodovoe oborudovanie i konechnye jelementy trans-missij pnevmokolesnyh ZTM. Povyshenie jeffektiv-nosti raboty kolesnyh i gusen-ichnyh mashin v surovyyh uslovijah jekspluatatsii, Tjumen, 1996, pp. 98-103.
8. Voronovich A.V. Sovershenstvovanie avtogrejderov massoj 15...16 t komplektaciej jenergosil-ovymi moduljami povyshennoj nadezhnosti, dis. kandidata tehn. nauk, 05.05.04, Kharkov, 2007, 172 p.
9. Volkov D.P., Nikolaev S.N. Nadezhnost' stroitel'nyh mashin i oborudovanija, uchebnoe posobie, M. Vysshaja shkola, 1979, 400 p.
10. Barejan A.G. Povyshenie iznosostojkosti i dolgovechnosti nozhej kutterov pri samozatachi-vanii : dis. ... kandidata tehn. nauk : 05.02.04, Barejan Ananij Genrikovich. Stavropol, 2000, 181 p.