

УДК 631.331

UDC 631.331

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки, сельскохозяйственные науки)

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences, agricultural sciences)

ВЕРОЯТНОСТНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗНАШИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

PROBABILISTIC MATHEMATICAL MODEL OF WEAR OF AGRICULTURAL MACHINERY PARTS

Шапиро Евгений Александрович
к.т.н., доцент
РИНЦ SPIN – код: 5975-4917

Shapiro Evgeny Aleksandrovich
Cand.Tech.Sci., docent
RSCI SPIN-code: 5975-4917

Труфляк Евгений Владимирович
д.т.н., профессор
Scopus Author ID: 57188716454
РИНЦ SPIN – код: 2502-0340
ФГБОУ ВО «Кубанский ГАУ», Краснодар, Россия

Truflyak Evgeny Vladimirovich
Dr.Sci.Tech, professor
Scopus Author ID: 57188716454
RSCI SPIN code: 2502-0340
Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

В настоящее время в качестве одного из актуальных направлений исследования абразивного изнашивания деталей сельскохозяйственной техники ученые рассматривают прогнозирование остаточного ресурса деталей, узлов и машины в целом. Однако, применяемые в настоящее время методы исследования изнашивания деталей сельскохозяйственной техники, не учитывают в достаточной мере предусматриваемого теорией износа вероятностного характера износа деталей машин во времени. На основании изложенного выше были сформулированы цель, задачи и гипотеза исследования. В ходе исследования статистических закономерностей износа различных деталей сельскохозяйственных машин, в том числе: лемехов и отвалов тракторных плугов, лап культиваторов, дисков борон, и др. рабочих органов сельскохозяйственных машин, нами были сформулированы основные требования к вероятностной математической модели изнашивания деталей сельскохозяйственных машин

Currently, scientists consider predicting the residual life of parts, assemblies and the machine as a whole as one of the relevant areas of research on the abrasive wear of agricultural machinery parts. However, the methods currently used to study the wear of parts of agricultural machinery do not sufficiently take into account the probabilistic nature of the wear of machine parts over time provided for by the theory of wear. Based on the above, the purpose, objectives and hypothesis of the study were formulated. During the study of statistical patterns of wear of various parts of agricultural machines, including: ploughshares and dumps of tractor plows, cultivator paws, harrow discs, and other working bodies of agricultural machines, we formulated the basic requirements for a probabilistic mathematical model of wear of agricultural machine parts. During the study of statistical patterns of wear of various parts of agricultural machines, including: ploughshares and dumps of tractor plows, cultivator paws, harrow discs, and other working bodies of agricultural machines, we formulated the basic requirements for a probabilistic mathematical model of wear of agricultural machine parts

Ключевые слова: ДЕТАЛИ, ИЗНОС, РАБОЧИЕ ОРГАНЫ, РЕСУРС, СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ МАШИНЫ, ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ

Keywords: PARTS, WEAR, WORKING BODIES, RESOURCE, AGRICULTURAL MACHINES, PROBABILISTIC MODEL

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-187-025>

Введение. Все детали с.-х техники подвергаются износу, однако, наиболее сильно изнашиваются те из них, рабочие органы которых непосредственно взаимодействуют с окружающей средой, и прежде всего с почвой.

<http://ej.kubagro.ru/2023/03/pdf/25.pdf>

Здесь важно отметить, что интенсивность износа деталей рабочих органов почвообрабатывающих машин, таких как зубья борон, лапы культиваторов, лемеха тракторных плугов, и др., существенно зависит от физико-механических свойств почвы.

При этом, самым твердым почвогрунтом является песчаная и супесчаная почва. Песчаная почва почти целиком состоит из зернышек кварца, о твердости которых можно судить хотя бы по тому, что о песчаник можно затачивать многие закаленные инструменты. Поэтому зерно кварцевого песка оставляет большую царапину на лемехе плуга или на зубе бороны.

Чем сильнее происходит нажим на песок или камень, тем глубже будет царапина, тем быстрее изнашивается деталь. Поэтому отвал плуга изнашивается быстрее зуба бороны.

Царапины на деталях оставляют главным образом такие зерна песка, у которых имеются выступы; этих зерен не так много, в речном обкатанном песке их меньше, чем в карьерном.

Кроме того, когда выступ зерна начнет вдавливаться в поверхность детали, то зерно может повернуться в рыхлом песке и царапина на этой детали не образуется.

Если бы не было этих обстоятельств, то износ лемехов плуга, зубьев борон, лап культиваторов, шнеков и иных деталей происходил бы гораздо быстрее.

Частица песка, зажатая в каменистой почве, не может повернуться, и поэтому износ от небольших камней, находящихся в грунте, больше чем от рыхлой песчаной почвы.

Имеет значение и вид камней, например округленная галька, или острые обломки камней в песчаном карьере, или после дробления.

Вот отчего так быстро изнашиваются зубья ковшей экскаваторов, работающих на строительстве с.-х объектов при погрузке камня.

Ускорение износа вызывается также и неправильным обращением с с.-х машиной: если затупилась режущая кромка лемеха плуга или зуба бороны, то для того, чтобы лемех или зуб врезались в грунт, необходимо производить на них гораздо большее давление, поэтому выступы зерен, песка будут глубже врезаться в металл, и быстрее будет изнашиваться деталь.

Кроме того, увеличение усилия вспашки или боронования потребует затрат дополнительной мощности двигателя, а передача увеличенных усилий вызовет ускоренный износ шестерен, подшипников и других деталей трактора или другой с.-х машины.

Сельским механизаторам необходимо, поэтому уделять больше внимания состоянию режущих кромок, и вообще рабочих органов различных с.-х машин, не допуская их чрезмерного износа.

Для поддержания рабочих органов с.-х машин в хорошем состоянии следует делать их периодическую заточку или наплавку.

Во многих случаях можно периодически наплавлять рабочие органы с.-х машин, не разбирая их, применяя так называемую профилактическую наплавку лемехов плуга, зубьев борон и некоторых других деталей.

Поэтому в ремонтных мастерских агрохозяйств, ремонтирующих с.-х машины, обязательно должны быть станки с гибким валом для заточки ножей непосредственно на с.-х машинах и электроды для износостойкой наплавки.

Профилактическая наплавка лемехов плугов может быть выполнена в течение обеденного перерыва, если износ лемеха не достиг значительных размеров.

Сроки профилактической наплавки зависят от типа обрабатываемой почвы.

Однако следует применять такие лемехи плугов и зубья борон, которые во время работы самозатачиваются.

Нужно изготавливать лемех или зуб из более износостойкой стали, тогда износ происходит меньше, но это не всегда возможно и тогда прибегают к наплавке в два или три слоя.

Металл детали только в редких случаях бывает однородным. Износостойкий слой обычно состоит из очень твердых зерен карбидов (соединение железа с углеродом, хрома с углеродом, марганца с углеродом) и основной составляющей – основы.

Чем больше твердость карбидов и основы, тем труднее вдавливать в них зерна песка, или иного материала.

Вместе с тем, применяемые в настоящее время методы исследования изнашивания деталей с.-х техники, не учитывают в достаточной мере предусматриваемого теорией износа вероятностного характера износа деталей машин во времени.

В настоящей статье рассматривается вероятностная математическая модель процесса изнашивания деталей с.-х машин, имеющая случайный характер.

Весомый вклад в разработку методов исследования изнашивания деталей с.-х техники внесли такие российские ученые, как: М.М.Севернев, Г.П. Каплун, В.А. Короткевич, С.Н. Кот, П.Ф. Купреев, Н.Н. Подлекарев, И.А. Синявский и многие др. ученые.

В качестве одного из актуальных направлений исследования абразивного изнашивания деталей с.-х техники ученые рассматривают прогнозирование остаточного ресурса деталей, узлов и машины в целом.

Однако, применяемые в настоящее время методы исследования изнашивания деталей с.-х техники, не учитывают в достаточной мере предусматриваемого теорией износа вероятностного характера износа деталей машин во времени.

На основании вышеизложенного были сформулированы следующие цель, задачи и гипотеза исследования.

Цель исследований. Повышение надежности и эффективности производственной и технической эксплуатации с.-х техники путем разработки и применения вероятностной математической модели процесса изнашивания деталей с.-х машин.

Объект исследований. Процесс производственной и технической эксплуатации с.-х техники в условиях агрохозяйств Краснодарского края.

Предмет исследований. Статистические закономерности износа различных деталей с.-х машин, проявляющиеся в условиях агрохозяйств Краснодарского края в рядовых условиях эксплуатации, для использования их для прогнозирования ресурса машин.

Рабочая гипотеза исследований. Проведенный подробный инженерно-технический анализ предмета исследований позволил сделать предположение о том, что в основу вероятностной математической модели процесса изнашивания деталей с.-х техники, может быть положен бесконечный степенной ряд.

Задачи исследований:

1. Разработать предусматриваемые теорией износа вероятностную математическую модель процесса изнашивания деталей с.-х техники для использования её в дальнейшем для прогнозирования остаточного ресурса.

2. Выполнить экспериментальную проверку выдвинутой гипотезы: на основе проведенного анализа установить допустимость применения бесконечного степенного ряда для описания процесса изнашивания деталей с.-х техники, на примере лезвия лемеха плуга современного трактора ТЛ-4 (ТЛС-5 Барнаулец).

3. Рассмотреть методы восстановления изношенных лезвий лемеха тракторного плуга путем хромистых и хромо-марганцовистых покрытий.

Для проверки гипотезы исследования была разработана вероятностная математическая модель процесса изнашивания деталей.

Материалы и методы исследований. В настоящей работе в качестве методов исследований применяется метод микрометрических измерений, который основан на измерении фактических параметров изношенных деталей с.-х машин. Все микрометрические измерения проводятся микрометром и штангенциркулем. При этом, точность измерения фактических размеров деталей составляет не менее 0,01 – 0,001 мм.

Далее следует отметить, что твердость поверхности деталей после восстановления измеряется по Бринеллю. Бринелль, это – условная величина, представляющая частное от деления нагрузки на шарик на поверхность отпечатка шарика на металле.

Если измерять твердость по Бринеллю, вдавливая стальной шарик в металл детали, то даже при диаметре шарика 2,5 мм вмятина от пего перекроет сотни зерен, карбидов и основы, величина которых в поплавке обычно составляет 0,02 – 0,05 мм, следовательно, мы определим среднюю твердость.

Твердость зерна кварцевого песка обычно равна или меньше твердости зерна карбида, но выше, чем твердость зерна основы. Поэтому выступ на зерне песка вдавится в основу, оставляя на ней канавку, но в зерна карбидов не сможет вдавиться.

При небольшом нажиме на зерно песка оно будет переходить через зерна карбидов, а при большом нажиме – выламывать зерна карбидов из основы.

Следовательно, чем прочнее связь основы с карбидами, тем больше и износостойкость металла. Таким образом, износостойкость определяется не общей средней твердостью данного металла, определенной по Бринеллю, а твердостью зерен карбидов и зерен основы и прочностью основы.

Кроме того, если деталь подвергается ударным нагрузкам, (например, била молотковой дробилки), то основа металла должна быть еще и достаточно вязкой.

Твердость отдельных зерен металла или микротвердость определяется путем вдавливания в зерно металла четырехгранной алмазной пирамиды.

Площадь отпечатка пирамиды, т. е. сумма площадей четырех треугольников, определяется измерением диагонали отпечатка на специальном приборе (ПМТ-3).

Микротвердость, или твердость отдельного зерна, как и твердость по Бринеллю или Роквеллу, представляет собой условную величину и является частным от деления нагрузки на алмазную пирамиду на площадь отпечатка, поэтому микротвердость выражается в $\text{кг}/\text{мм}^2$.

Микротвердость не всегда остается неизменной. Если деталь, например щека камнедробилки, изготовленная из марганцовистой стали, испытывает во время работы настолько большие удельные нагрузки, что происходит пластическая деформация зерен основы, то микротвердость их значительно увеличивается, иногда на 50%, вследствие чего возрастает и износостойкость стали.

Это явление называется наклепом (нагартовкой). В зернах карбидов наклепа не происходит.

Если удельная нагрузка мала, наклепка не происходит. Поэтому, например, нерационально изготовлять зубья ковшей экскаваторов из дорогой стали 13ГЛ, так как микротвердость аустенита этой стали при микротвердости зерен всего $400 \text{ кг}/\text{мм}^2$, т.е. меньше микротвердости зерен песка и многих зерен гранита, и стойкость таких зубьев не выше, чем зубьев, изготовленных из углеродистой стали.

Для оценки износостойкости различных металлов производят испытания на истирание образцов из этих металлов. Испытания производят на различных машинах трения.

Полученные результаты исследований. В современных технологиях возделывания с.-х культур весьма энергоемким технологическим

процессом является обработка почвы, которая связана с механическим воздействием рабочего органа с.-х машины на обрабатываемую среду.

Поэтому для математического описания процесса изнашивания деталей с.-х машин важно знать три математических уравнения:

1) уравнение, выражающее математическое ожидание случайного процесса накопления износа деталей с.-х машин во времени, т.е. неслучайную составляющую процесса изнашивания;

2) уравнение, выражающее верхнюю доверительную границу случайного процесса износа деталей машин;

3) уравнение, которое отражает нижнюю доверительную границу процесса накопления износа деталей с.-х машин во времени.

Все эти три уравнения, в их единстве и взаимосвязи, образуют вероятностную математическую модель процесса изнашивания деталей машин во времени.

В ходе исследования статистических закономерностей износа различных деталей с.-х машин, в том числе: лемехов и отвалов тракторных плугов, лап культиваторов, дисков борон, и др. рабочих органов с.-х машин, нами были сформулированы основные требования к вероятностной математической модели изнашивания деталей с.-х машин:

– эта модель должна учитывать случайный (вероятностный) характер процесса изнашивания детали во времени;

– данная вероятностная модель должна учитывать нелинейность накопления износа детали на протяжении периода приработки и нормальной эксплуатации с.-х машин;

– предлагаемая нами математическая модель должна быть удобной для расчётов в инженерной практике;

– данная математическая модель не должна быть сложной в инженерных расчетах процесса изнашивания и расчета остаточного ресурса деталей с.-х машин;

– разрабатываемая нами теоретическая модель не должна противоречить инженерной практике.

Для реализации сформулированных выше требований, запишем систему из четырех математических уравнений [1]:

$$q = q_0 + we; \quad (1)$$

$$q = q_0 e^r; \quad (2)$$

$$q = q_0 \left[1 - \exp\left(\frac{e}{w}\right) \right]; \quad (3)$$

$$q = q_0 \exp(-we) \text{ и др.} \quad (4)$$

Лучшие результаты при производственной и технической эксплуатации современных тракторов ТЛ-4 (ТЛС-5 Барнаулец) при расчете фактической скорости изнашивания носовой части лезвия лемеха тракторного плуга \bar{T} дает математическое выражение вида:

$$\bar{T} = \frac{dy}{de} = f(y), \quad (5)$$

где \bar{T} – фактическая скорость изнашивания лезвия лемеха плуга;

e – наработка рассматриваемого трактора.

Далее формулу (5) представим в форме бесконечного степенного ряда, то есть:

$$\frac{dy}{de} = u + iy + i_1 y^2 + \dots + i_{y-1} y^i. \quad (6)$$

Выражение (6) после небольших преобразований, примет следующий вид:

$$e - e_1 = \frac{1}{i} \ln \frac{u + i\bar{y}}{u - i\bar{y}_1}. \quad (7)$$

Введем в наши расчеты десятичные логарифмы, после чего получим следующее выражение:

$$e - e_1 = \frac{1}{i \lg e} \ln \frac{\frac{u}{i} + \bar{y}}{\frac{u}{i} - \bar{y}_1}. \quad (8)$$

Применим такие обозначения, как: $i = 0$; $\frac{u}{i} = p$, в результате чего получим математическое выражение, которое представляет собой математическое ожидание процесса изнашивания носовой части лезвия лемеха плуга современного трактора ТЛ-4 (ТЛС-5 Барнаулец):

$$\bar{y} = (\bar{y}_1 + p)10^{\frac{e-e_1}{N}} - p. \quad (9)$$

Продифференцировав выражение (9), получим математическое уравнение скорости изнашивания носовой части лезвия лемеха:

$$T = \frac{dy}{de} = \frac{\bar{y}_1 + p}{N \lg u} 10^{\frac{e-e_1}{N}}. \quad (10)$$

Подставив в формулу (10) вместо математического ожидания исходного износа верхний доверительный предел этой случайной величины $y_1^1 = \bar{y}_1 + e_\alpha g_1$, получим такое выражение:

$$a^v = (\bar{a}_1 + s_d f_\alpha + e)10^{\frac{s-s_1}{O}} - e, \quad (11)$$

где a^v – верхний доверительный предел износа носовой части лемеха;

s_d – расчетное среднеквадратическое отклонение износа носовой части лемеха плуга при наработке l ;

f_α – коэффициент, зависящий от принятой вероятности α .

Если мы подставим в уравнение (9) нижнюю доверительную границу процесса изнашивания носовой части лемеха тракторного плуга, то мы будем иметь следующее выражение:

$$y^h = (\bar{y}_1 - e_\alpha g_1 + p)10^{\frac{e-e_1}{N}} - p, \quad (12)$$

где y^h – текущий нижний доверительный предел износа лемеха плуга.

Математические выражения для постоянных N и p будем иметь, если подставим в соотношения (11) и (12) вместо a^v и y^h значения верхнего и нижнего доверительного пределов:

$$N = \frac{e_2 - e_1}{\lg \frac{g_2}{g_1}}; \quad (13)$$

$$p = \frac{\bar{y}_2 - ay_1 \frac{g_2}{g_1}}{\frac{g_2}{g_1} - 1}, \quad (14)$$

где y_2 и g_2 – фактический средний износ носовой части лемеха плуга и его среднее квадратическое отклонение в момент наработки e_2 .

Апробация полученных результатов. Представленные выше уравнения (12) – (14) дают возможность при помощи статистического исследования износов деталей бывших в эксплуатации на протяжении двух значений наработки t_1 и t_2 найти уравнение математического ожидания и уравнения доверительных границ процесса изнашивания узла в случайных (реально существующих) условиях эксплуатации.

На рисунке 1 представлены результаты оценки величины износа носовой части лезвия лемеха современного трактора ТЛ-4 (ТЛС-5 Барнаулец), используемого в ООО «Агрофирма «Луч» Динского района Краснодарского края.

Из приведенного выше рисунка видно хорошее совпадение теоретических и фактических значений средних износов (сплошная линия) лезвий лемеха тракторного плуга на всех исследуемых интервалах наработки.

При этом, исследовался один восьмикорпусной плуг (8 лемехов) на вспашке зяби современным трактором ТЛ-4 (ТЛС-5 Барнаулец) при суммарной наработке 250 га (рисунок 2). Причем замеры износа носовой части лезвия лемехов проводились через каждые 50 га.

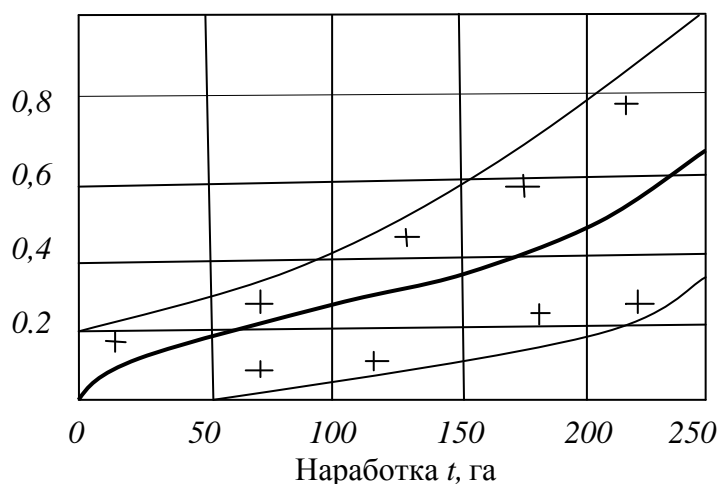


Рисунок 1 – Кривые накопления износа носовой части лезвия лемеха тракторного плуга

Практически все экспериментальные точки лежат под верхней доверительной границей (пунктирная линия), при этом крайние точки копируют её форму.

Проведенные исследования также показали, что средний износ лемеха тракторного плуга в зоне носка по толщине на песчаной почве при скорости движения трактора ТЛ-4 (ТЛС-5 Барнаулец) 2,77 м/сек составляет более 0,61 мм.

Важно также отметить, что износостойким должен быть только наружный слой, вся остальная часть восстанавливаемой детали является как бы державкой для него.

Этот наружный слой должен обладать следующими основными свойствами.



Рисунок 2 – Трактор ТЛ-4 (ТЛС-5 Барнаулец) с плугом

Во-первых, твердость карбидов железа и карбидов марганца должна быть такая же, как кварцевых зерен песка, еще меньше твердость перлита.

В свою очередь, углеродистые стали, содержащие меньше 0,9% углерода, состоят из феррита и перлита, поэтому без термической обработки они не пригодны для применения в качестве износостойких покрытий быстроизнашивающихся деталей с.-х машин.

Во-вторых, даже после закалки и отпуска, а отпуск обязателен для устранения хрупкости, твердость их все же недостаточна, например, у стали 65Г она составляет $480 - 500 \text{ кг/мм}^2$, т. е. значительно ниже твердости кварцевых зерен песка (800 кг/мм^2).

Поэтому для придания покрытию восстанавливаемых с.-х деталей высокой износостойкости против истирания или против так называемого абразивного износа приходится применять покрытия, в состав которых, помимо углерода, входят другие элементы, повышающие прочность и твердость сплава, т. е. применять легирование.

Поскольку в России имеются большие запасы марганца, то целесообразнее применять легирование марганцем, в связи с тем, что этот химический элемент является очень дешевым элементом.

Для лемехов тракторных плугов и зубьев борон выгоднее, когда объем карбидов составляет 20 – 25% объема наплавки, для ножей, шнеков и других деталей, подвергающихся небольшим удельным нагрузкам, не вызывающим наклепа основы – порядка 25 %.

В инженерных расчетах можно использовать специальную номограмму, применяемую для расчета состава марганцовистого покрытия и распределения углерода и марганца между основой и карбидами в зависимости от коэффициента.

Например, мы хотим иметь наплавку, 25% объема которой занимают комплексные карбиды железа-марганца.

Содержание углерода в наплавке принимаем равным 2%. По данной номограмме можно видеть, что из этого количества 0,5% будет в основе наплавки и 1,5% в карбидах.

Если общее содержание марганца в наплавке 14%, то по этой номограмме можно определить, что основа будет содержать менее 8% марганца, а для получения высокой твердости требуется более 8% марганца.

Поэтому надо взять такой состав, чтобы марганца в наплавке было 20% и более, а основа содержала 12 – 14% марганца. Это обеспечит нужную твердость основы, кроме того, наплавка будет более вязкой.

Содержание углерода и марганца следует выбирать, поэтому исходя из сказанного.

Добавление никеля в марганцовистую наплавку значительно увеличивает ее ударную вязкость. Поэтому эту наплавку следует особенно рекомендовать для защиты деталей с.-х техники от усиленного истирания при большой удельной нагрузке (35 – 40 кг/мм²), сопровождаемой ударами, например, лемехов плугов, зернодробилок, и др. деталей.

Заключение. В заключение следует отметить, что для лемехов тракторных плугов и зубьев борон выгоднее, когда объем карбидов составляет 20 – 25% объема наплавки, для ножей, шнеков и других деталей, подвер-

гающихся небольшим удельным нагрузкам, не вызывающим наклепа основы, объем карбидов составляет порядка 25 %.

В настоящей работе рассмотрены методы восстановления изношенных лезвий лемеха тракторного плуга путем хромистых и хромомарганцовистых покрытий, которые успешно можно применять в ремонтно-обслуживающем производстве.

В итоге можно заключить, что рассмотренное выше математическое выражение в виде бесконечного степенного ряда вполне удовлетворительно описывает процесс изнашивания деталей с.-х машин и может быть рекомендовано для прогнозирования их износа и долговечности.

Настоящее исследование абразивного изнашивания деталей с.-х техники выполнено в рамках госбюджетной темы НИР Кубанского ГАУ за 2023г.: «Разработать методы и средства повышения надёжности и эффективности функционирования технологических комплексов и поточных линий в ремонтно-обслуживающей сфере АПК Краснодарского края», подраздел: «Разработать интегрированную инженерную инфраструктуру обслуживания агропромышленного производства Краснодарского края».

Библиографический список

1. Шапиро Е.А. Обоснованная методика борьбы с износом и повреждаемостью деталей автотракторных дизелей / А.С. Крылов, И.М. Дроздов, А.Н. Мельничук // Сб. ст. XVII Междунар. науч.-практ. конф.: Прогрессивные технологии в современном машиностроении. – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2022. – С. 104–107.

References

1. Shapiro E.A. Obosnovannaja metodika bor'by s iznosom i povrezhdaemost'ju detalej avtotraktornyh dizelej / A.S. Krylov, I.M. Drozdov, A.N. Mel'nichuk // Sb. st. XVII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.: Progressivnye tehnologii v sovremennom mashinostroenii. – Penza: Privolzhskij Dom znaniy, 2022. – S. 104–107.