

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК / TECHNICAL SERVICE IN AGRICULTURE

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL ARTICLE

УДК 620.1.1052.1

DOI: 10.26897/2687-1149-2020-4-33-40

Трибологические исследования процессов изнашивания рабочих органов технологического оборудования агропромышленного комплекса

КРАВЧЕНКО ИГОРЬ НИКОЛАЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор¹

E-mail: kravchenko-in71@yandex.ru

ЕРОФЕЕВ МИХАИЛ НИКОЛАЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор²

КУЗНЕЦОВ ЮРИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор³

E-mail: kentury@yandex.ru

ЯКОВЛЕВ ДМИТРИЙ ДМИТРИЕВИЧ, аспирант³

E-mail: yakovlev-dm@mail.ru

МАКАРОВ ИВАН ДМИТРИЕВИЧ, аспирант³

E-mail: whyme12345@yandex.ru

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Российская Федерация, Москва, ул. Тимирязевская, 49

² Институт машиноведения имени А.А. Благоднарова РАН; 101000, Российская Федерация, Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4

³ Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина; 302019, Российская Федерация, г. Орёл, ул. Генерала Родина, 69

Дана оценка долговечности быстроизнашиваемых рабочих органов технологического оборудования агропромышленного комплекса. Установлены зависимости износа деталей и элементов технологического оборудования (на примере лопаток смесителей бетонорастворных комплексов, активно используемых для приготовления рабочих смесей при возведении различных объектов производственно-технического назначения в сфере АПК) от их геометрических параметров и прочностных свойств. Предложен способ определения износа рабочих органов технологического оборудования по координатам с использованием метода группового учёта аргументов, обеспечивающий возможность бесконтактного диагностирования и прогнозирования отказов рабочих элементов на период текущей наработки и выбора метода их восстановления. Проведены ускоренные испытания рабочих органов технологического оборудования на изнашивание с использованием абразивной смеси на основе кварцевого песка и каменных материалов. Установлено, что использование заполнителей большей плотности и размера приводит к увеличению интенсивности изнашивания лопаток смесителя. Наибольшая интенсивность изнашивания наблюдается на рабочей и торцевой кромках, износ рабочей поверхности по толщине лопатки незначителен. Характер распределения износа по длине лопаток зависит от коэффициента трения: при коэффициенте трения меньше 0,17 наиболее интенсивно изнашиваются края рабочей поверхности лопатки, при значении коэффициента больше 0,17 – максимальный износ наблюдается в средней части. Отмечено, что увеличение количества рабочих органов уменьшает их износ.

Ключевые слова: рабочие органы, технологическое оборудование, износ, абразив, скорость изнашивания.

Формат цитирования: Кравченко И.Н., Ерофеев М.Н., Кузнецов Ю.А., Яковлев Д.Д., Макаров И.Д. Трибологические исследования процессов изнашивания рабочих органов технологического оборудования агропромышленного комплекса // Агроинженерия. 2020. № 4(98). С. 33-40. DOI: 10.26897/2687-1149-2020-4-33-40.

TRIBOLOGICAL STUDIES OF THE FRICTION AND WEAR OF WORKING ELEMENTS OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

IGOR N. KRAVCHENKO, DSc (Eng), Professor¹

E-mail: kravchenko-in71@yandex.ru

MIKHAIL N. YEROFEYEV, DSc (Eng), Professor²

YURIYA A. KUZNETSOV, DSc (Eng), Professor³

E-mail: kentury@yandex.ru

DMITRIY D. YAKOVLEV, postgraduate student³

E-mail: yakovlev-dm@mail.ru

IVAN D. MAKAROV, postgraduate student³

E-mail: whyme12345@yandex.ru

¹ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127550, Timiryazevskaya Str., 49, Moscow, Russian Federation

² Institute of Machine Science named after A.A. Blagonravov at the Russian Academy of Sciences; 101000, Maliy Kharitonyevskiy Lane, 4, Moscow, Russian Federation

³ Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin; 302019, Generala Rodina Str., 69, Orel, Russian Federation

The paper gives assessment of the durability of high-wear working bodelementsies of technological equipment used in agricultural production. The authors have established the relationship between the wear of parts and elements of technological equipment (using the example of mixer blades of concrete-mortar complexes, actively used for the preparation of working mixtures for the construction of various industrial and technical facilities in the agricultural sector) and their geometric parameters and strength properties. They propose an algorithm to determine the wear of working elements of technological equipment by their coordinates using the method of group accounting of arguments, which provides for contactless diagnostics and prediction of failures of working elements for the period of the current operating time and choosing a method for their recovery. Accelerated wear tests of working elements of technological equipment were carried out using an abrasive mixture based on quartz sand and stone materials. It has been established that the use of aggregates of higher density and size leads to an increased wear rate of the mixer blades. The highest wear rate has been observed on the working and end edges; while the wear of the working surface along the blade thickness is insignificant. The wear distribution pattern along the length of the blades depends on the friction coefficient: when the friction coefficient is less than 0.17, the edges of the blade's working surface wear out most intensively, and when the coefficient is greater than 0.17, the maximum wear is observed in the middle part. The authors note that an increase in the number of working elements reduces their wear.

Key words: working elements, technological equipment, wear, friction, abrasive material, wear rate.

For citation: Kravchenko I.N., Yerofeyev M.N., Kuznetsov Yu.A., Yakovlev D.D., Makarov I.D. Tribological studies of the friction and wear of working elements of technological equipment // *Agricultural Engineering*, 2020; 4 (98): 33-40. (In Rus.). DOI: 10.26897/2687-1149-2020-4-33-40.

Введение. В ходе эксплуатации технологического оборудования АПК установлено, что наиболее подвержены отказам и требуют первоочередного диагностирования следующие элементы: рабочие элементы шнековых транспортёров, лопастных питателей; транспортёрные и элеваторные ленты и ролики; концевые выключатели; подшипниковые узлы и торцевые уплотнения вращающихся и перемещающихся элементов и валов (цепные и ременные передачи, смесительные и шнековые валы, штоки пневмоцилиндров, редукторы, насосы).

В результате исследований установлено, что износ анализируемых групп вышеуказанных деталей находится в пределах 0,03...10 мм [1]. При этом около 80% деталей имеют износ до 0,9...6 мм. Дефекты деталей распределяются следующим образом: износ цилиндрических – 10,2%; износ плоских – 58,8%; износ пространственных – 19,8%; трещины и изломы – 3,8%; нарушение геометрической формы – 7,4%.

Одним из основных факторов, влияющих на особенности изнашивания деталей, является форма их рабочих поверхностей, т.е. конструктивный параметр [2-10]. При этом очень важно знать характер износа деталей и его влияние на технические показатели работы технологического оборудования.

Результаты комплексных исследований технологического оборудования в реальных условиях эксплуатации позволили выявить ряд элементов, подверженных интенсивному изнашиванию.

Цель исследования – выявить и установить закономерности изнашивания деталей и элементов технологического оборудования АПК от их геометрических параметров и прочностных свойств.

Материал и методы. Динамику и характер износа рабочих элементов оборудования оценивали по результатам ускоренных экспериментальных исследований.

Измерения структурных параметров рабочих элементов оборудования (на примере лопасти смесителя бетонорастворного комплекса) производили не менее трёх раз через каждые 200 ч на абразивных смесях на основе кварцевого песка и каменных материалов.

Для описания аналитической связи $I_R = f(t)$ использовали степенное уравнение вида:

$$I_R = K_R \cdot t^m, \quad (1)$$

где I_R – износ лопасти рабочего органа, мм; t – наработка, ч; K_R , m – коэффициенты, полученные по результатам обработки.

Места проведения замеров лопастей рабочих органов указаны на рисунке 1. По результатам измерений построены годографы, позволяющие установить величину, характер и зоны износа рабочих элементов (рис. 2).

Для оценки характера износа использовали способ диагностирования параметров износа по их координатам с применением МГУА (рис. 3) [11].

Обработку экспериментальных данных осуществляли в соответствии с методами численного моделирования и математического программирования [12, 13].

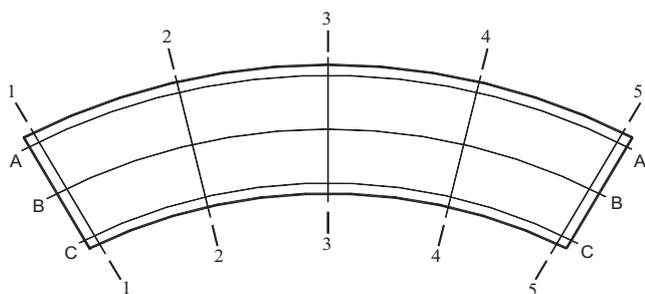


Рис. 1. Точки замеров лопастей:

длина заготовки по А – 3454 мм, по В – 3077,2 мм, по С – 2700,4 мм; длина полулопасти по А – 710 мм, по В – 632 мм, по С – 555 мм

Fig. 1. Measurement points of the blades:

workpiece length along A – 3454 mm, along B – 3077.2 mm, along C – 2700.4 mm; half-blade length along A – 710 mm, along B – 632 mm, along C – 555 mm

Результаты и обсуждение. На основе измерений толщины изношенных деталей получено адекватное

уравнение регрессии, описывающее изменение толщины лопатки от координаты её поверхности:

$$Y = 8,5E + 0,02X_1 - 0,49X_2 - 0,22 + 0,34X_2^2 + 0,59X_1^2 - 7,6E + 0,02X_1^3. \quad (2)$$

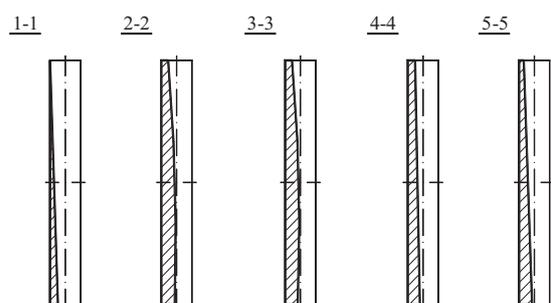
Диапазон количественной размерности габаритов лопатки и толщины износа лежит в разных пределах, поэтому выражение (2) устанавливает дополнительные регрессионные уравнения для каждого из его членов:

$$\begin{cases} X_1 = 2 \cdot (x + 134,68) / 895,88 - 1; \\ X_2 = 2 \cdot (y + 30,19) / 180,38 - 1; \\ Y = 2 \cdot (h + 27,67) / 863,27 - 1, \end{cases} \quad (3)$$

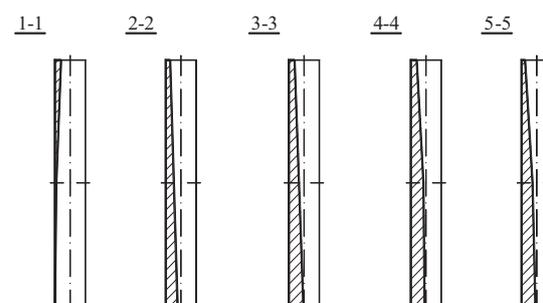
где h – координата по толщине лопатки в заданной точке, мм; x – координата по длине лопатки, мм; y – координата по ширине лопатки, мм.

Результаты исследования характера распределения износа лопаток смесителей показали, что наибольшая интенсивность изнашивания отмечена на рабочей и торцевой кромках (рис. 4) [6, 12, 14].

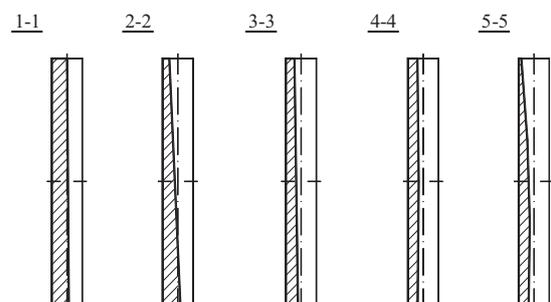
1 правая полулопасть / 1 Right half-blade



2 правая полулопасть / 2 Right half-blade



3 правая полулопасть / 3 Right half-blade



4 правая полулопасть / 4 Right half-blade

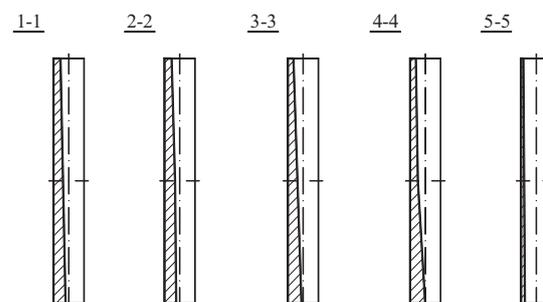


Рис. 2. Голографы (эпюры) износа рабочих деталей (фрагмент)

Fig. 2. Hodographs (diagrams) of wear of working elements (fragment)

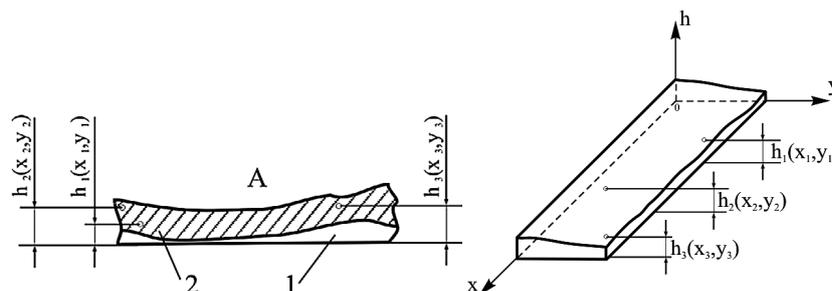


Рис. 3. Схема определения износа лопатки по координатам ее поверхности

Fig. 3. Scheme for determining the blade wear by the coordinates of its surface

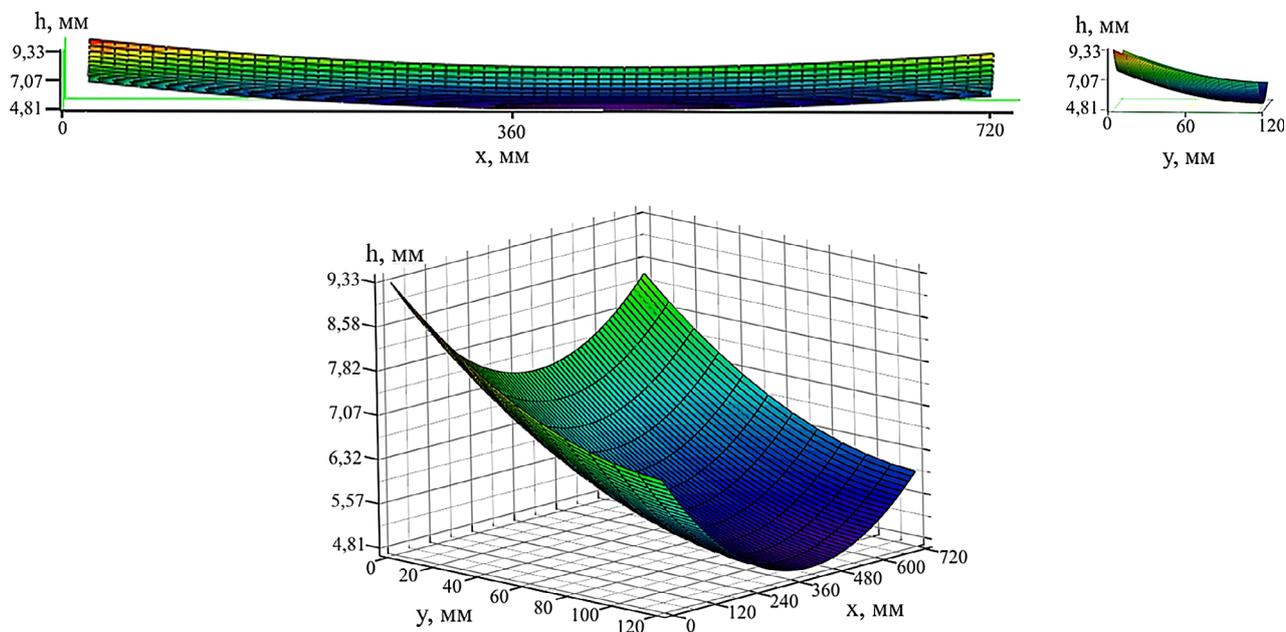


Рис. 4. Изменение толщины лопатки по её координатам
Fig. 4. Changing the blade thickness by its coordinates

Каждая последующая точка на линии входит в уплотнённую абразивную массу, оказывающую большее давление, а, следовательно, и вызывающую более интенсивное разрушение.

Износ рабочей поверхности по толщине не оказывает существенного влияния на качественные показатели приготовляемой смеси. Однако, утончение лопатки за счёт образования шлейфов (канавок), начинающихся сразу за крепежными отверстиями, может привести к разрушению болтового соединения и возникновению аварийной ситуации, при которой возможен отрыв лопатки от лопадержателя, повреждение внутренних элементов и заклинивание вала смесителя. Анализ механизма образования шлейфов показал [6], что он обусловлен различной интенсивностью изнашивания металла лопатки и крепежных болтов. Так, износ болтов, выполненных из закалённой стали 45 (28-32 HRC_s), значительно выше металла, из которого изготовлена лопатка (55-65 HRC_s).

Проведённые исследования показали, что при одном и том же материале крепежных болтов и лопаток, шлейфов в процессе изнашивания не образуется. Поэтому для исключения возникающего утончения лопатки за крепежным отверстием предусмотрена возможность упрочнения шляпок болтов износостойкими материалами. Кроме того, наиболее интенсивное разрушение рабочих кромок лопаток смесителя зависит от их профиля, которое происходит в результате заклинивания и дробления абразивных материалов в зоне радиального зазора.

Рабочие органы являются наименее стойкими к изнашиванию деталями технологического оборудования. При этом срок их службы незначителен и составляет не более 200-250 ч [2-10, 15]. Потребность в периодической замене лопаток осложняет бесперебойную эксплуатацию, заставляет останавливать производство для проведения ремонтно-обслуживающих воздействий или восстановительных работ. Износ рабочих органов по длине неоднороден, обычно при работе с качественной

(незасорённой) смесью первые признаки износа рабочей поверхности технологического оборудования можно наблюдать в средней части, а не с краёв (рис. 5).

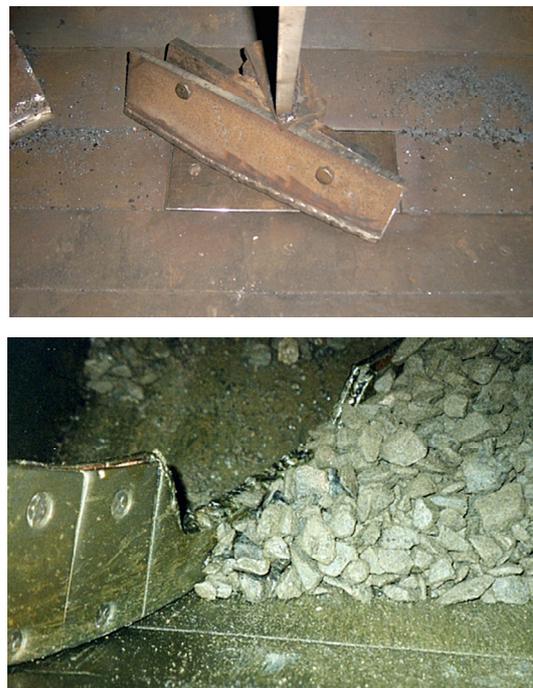


Рис. 5. Взаимодействие рабочих органов технологического оборудования с абразивной средой
Fig. 5. Interaction of working elements of technological equipment with an abrasive medium

Одна из рабочих гипотез, связывающая износ с внешним воздействием, предполагает, что интенсивность износа того или другого участка рабочей поверхности прямо пропорциональна относительной работе силы трения на этом участке [14, 16].

Применительно к рассматриваемому случаю это условие выражается зависимостью

$$U = K_1 \frac{dA}{dp}, \tag{4}$$

где U – интенсивность износа рабочих органов на том или другом её участке; dA – работа силы трения при движении на бесконечно малом участке; K_1 – коэффициент пропорциональности.

Элементарная работа силы трения за бесконечно малый промежуток времени dt составит:

$$dA = fN(v_p - v_{\text{окр.п.с.}})dt, \tag{5}$$

где f – коэффициент трения; N – нормальная составляющая реакции, действующая на рабочую смесь со стороны лопатки; v_p – радиальная скорость центра тяжести смесителя; $v_{\text{окр.п.с.}}$ – окружная скорость смеси относительно центра тяжести; $(v_p - v_{\text{окр.п.с.}})$ – скорость скольжения рабочей смеси по лопатке.

Нормальная составляющая реакции:

$$N = 2m\omega v_p,$$

где m – масса рабочей смеси; ω – угловая скорость смесителя.

Следовательно,

$$dA = 2m\omega f(v_p - v_{\text{окр.п.с.}})v_p dt. \tag{6}$$

Тогда, подставляя dA в уравнение (4) и заменяя $v_p dt$ через dt , получим

$$U = K_2 m\omega f(v_p - v_{\text{окр.п.с.}}), \tag{7}$$

где K_2 – коэффициент пропорциональности.

Если коэффициент трения $f > 0,169$, то рабочая смесь при своём движении по лопатке вначале катится со скольжением, а затем при достижении определённого радиуса переходит к чистому качению. Износ рабочих органов возможен лишь в первой зоне, где качение сопровождается скольжением [14].

Используя полученные ранее выражения для v_p и $v_{\text{окр.п.с.}}$ преобразуем уравнение (7) к виду:

$$U = K_2 m\omega^2 f R_b \left[\sqrt{\frac{5}{7}} \cdot \sqrt{\left(\frac{p^2}{R_b^2} - 1\right)} - 5f \left(\frac{p}{R_b} - 1\right) \right]. \tag{8}$$

Место максимума интенсивности износа рабочих органов можно найти из выражения:

$$\frac{dU}{dp} = K_2 m\omega^2 f R_b \left[\frac{\sqrt{5}}{7} \cdot \frac{p}{R_b^2 \sqrt{\frac{p^2}{R_b^2} - 1}} - \frac{5f}{R_b} \right] = 0.$$

Радиус, на котором износ рабочих органов максимален, составит

$$p_u = \frac{\sqrt{35f}}{\sqrt{35f^2 - 1}} R_b. \tag{9}$$

Анализ полученной зависимости показывает, что чем выше коэффициент трения, тем на меньшем радиусе расположен максимум интенсивности износа (рис. 6).

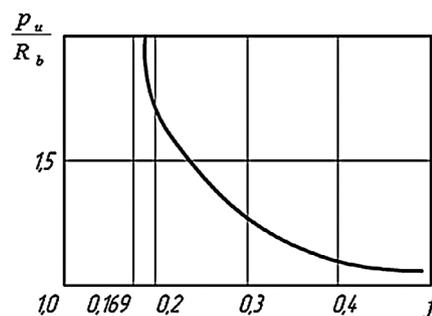


Рис. 6. Зависимость между радиусом, на котором износ рабочих органов максимален, и коэффициентом трения f

Fig. 6. Relationship between the radius of the maximum wear of working elements and the friction coefficient f

Значение максимума интенсивности износа на том или другом радиусе можно получить следующим образом. Из уравнения (9) имеем

$$f = \frac{\frac{p_u}{R_b}}{\sqrt{35} \sqrt{\frac{p_u^2}{R_b^2} - 1}}. \tag{10}$$

Подставляя выражение (10) для f в уравнение (8) и учитывая, что $p = p_u$, получаем зависимость величины максимума интенсивности износа от радиуса:

$$U_{\text{max}} = \frac{1}{7} K_2 m\omega^2 f R_b \frac{\frac{p_u}{R_b}}{\frac{p_u}{R_b} + 1}. \tag{11}$$

Данная зависимость графически представлена на рисунке 7. Результаты анализа графика показывают, что величина максимальной интенсивности износа меньше в том случае, когда максимум расположен на малых радиусах, что соответствует большим значениям коэффициента трения.

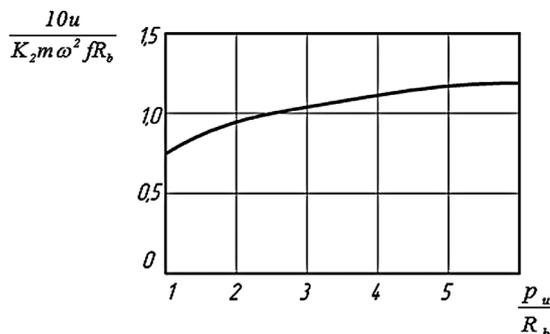


Рис. 7. Величина максимума интенсивности износа в зависимости от его расположения по длине рабочих органов

Fig. 7. The value of the maximum wear intensity, depending on its location along the length of the working elements

Проведённый анализ относится к случаю, тогда коэффициент трения $f > 0,169$. При малых значениях

коэффициента трения ($f < 0,169$) рабочая смесь скользит по всей рабочей поверхности рабочих органов, что качественно меняет картину износа последних. Интенсивность износа растёт с увеличением радиуса.

Выражение для интенсивности износа для этого случая можно получить, если в уравнение (11) подставить значение v_p и $v_{окр.р.с.}$

Тогда получим

$$U = K_2 m \omega^2 f R_b \left[\frac{1}{1+f} \cdot \sqrt{\left(\frac{p^2}{R_b^2} - 1\right)} - 5f \left(\frac{p}{R_b} - 1\right) \right]. \quad (12)$$

На больших радиусах при малых коэффициентах трения выражение для интенсивности износа имеет вид

$$U = K_2 m \omega^2 f \frac{1-5f}{1+f} p. \quad (13)$$

Следовательно, интенсивность износа прямо пропорциональна радиусу, на котором находится рассматриваемая точка рабочих органов.

Из уравнения (13) можно найти наиболее неблагоприятный в смысле износа коэффициент трения. С этой целью возьмём первую производную от U по f и, приравняв её к нулю, получим

$$\frac{dU}{df} = \frac{(1-5f)(1+5f) - 5f(1+f) - f(1-5f)}{(1+f)^2} = 0,$$

откуда $f \approx 0,1$.

Данный коэффициент трения является наименее благоприятным при условии, что максимальная интенсивность износа лопатки наблюдается в конце её рабочей поверхности.

На рисунке 8 показана кривая интенсивности износа по длине лопатки для коэффициента трения $f = 0,1$.

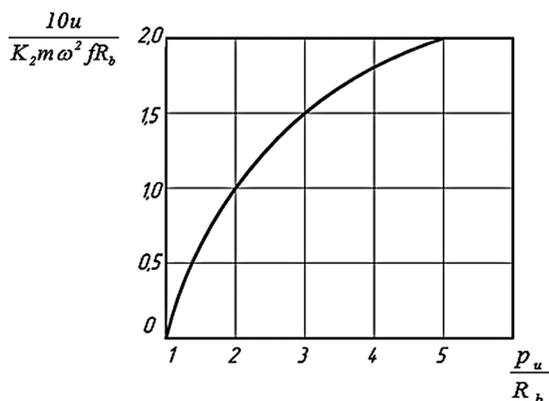


Рис. 8. Интенсивность износа рабочих органов по длине при коэффициенте трения $f = 0,1$

Fig. 8. Wear intensity of working elements along the length with a friction coefficient $f = 0.1$

Библиографический список

1. Кравченко И.Н., Пузряков А.Ф., Ерофеев М.Н. Надёжность машин и рабочего оборудования при эксплуатации и ремонте. Германия: Издательский дом «LAP LAMBERT Academic Publishing», 2011. 476 с.
 2. Батищев А.Н., Ферябков А.В., Кузнецов Ю.А., Кулаков К.В. Технологии восстановления и упрочнения

Выше рассматривался износ рабочих органов, приходящийся на одну частицу рабочей смеси. Естественно предположить, что износ U рабочих органов в той или другой точке будет прямо пропорционален количеству частиц, прошедших по рабочим органам [11].

Используя уравнение (8), при коэффициенте трения $f > 0,169$, получим:

$$U = K \frac{Qt}{\Pi} \omega^2 R_b f \left[\frac{1}{1+f} \cdot \sqrt{\left(\frac{p^2}{R_b^2} - 1\right)} - 5f \left(\frac{p}{R_b} - 1\right) \right], \quad (14)$$

где Q – производительность смесителя по рабочей смеси, кг/мин; t – время, мин; Π – количество лопаток; K – коэффициент пропорциональности.

На основании уравнений (12) и (13) при коэффициенте трения $f < 0,169$ имеем

$$U = K \frac{Qt}{\Pi} \omega^2 R_b f \left[\frac{1}{1+f} \cdot \sqrt{\left(\frac{p^2}{R_b^2} - 1\right)} - 5f \left(\frac{p}{R_b} - 1\right) \right] \approx \approx K \frac{Qt}{\Pi} \omega^2 p f \frac{1-5f}{1+5f}. \quad (15)$$

Комплекс проведённых исследований позволит обоснованно подойти к разработке и выбору износостойких материалов, предназначенных для работы в ударно-абразивных и агрессивных средах, выработать практические рекомендации относительно режимов работы технологического оборудования АПК.

Выводы

1. Износ рабочих органов в любой точке их рабочей поверхности прямо пропорционален производительности смесителя по рабочей смеси, продолжительности работы установки, квадрату угловой скорости вращения рабочего вала и обратно пропорционален количеству лопаток. При этом характер распределения износа по длине лопаток для двух случаев, когда коэффициент трения меньше 0,17 и когда он больше 0,17, качественно различен. В первом случае лопатки интенсивно изнашиваются по краю рабочей поверхности, во втором – в средней части.
2. Увеличение числа рабочих органов уменьшает их износ. При этом количество лопаток лимитируется в основном конструктивными соображениями и пропускной способностью смесителя, а их увеличение сокращает сечение окон на внутреннем радиусе вала.
3. Для увеличения стойкости рабочих органов к ударно-абразивному изнашиванию целесообразно подбирать более износостойкие материалы или наносить твёрдосплавные композиции на рабочие поверхности новых и изношенных штатных рабочих органов.

References

1. Kravchenko I.N., Puzryakov A.F., Yerofeyev M.N. Nadezhnost' mashin i rabocheho oborudovaniya pri ekspluatatsii i remonte [Reliability of machines and working equipment during operation and repair]. Germany, Publishing house "LAP LAMBERT Academic Publishing", 2011: 476. (In Rus.)

деталей машин и оборудования агропромышленного комплекса с применением микродугового оксидирования // Труды ГОСНИТИ. 2007. Т. 100. С. 156-158.

3. Михальченков А.М. Восстановление деталей сельскохозяйственной техники со сложнопрофильным износом // Труды ГОСНИТИ. 2012. Т. 109. № 2. С. 42-46.

4. Кузнецов Ю.А., Гончаренко В.В., Ферыбков А.В. Моделирование изнашивания МДО-покрытий // Техника и оборудование для села. 2015. № 9. С. 40-44.

5. Югов В.И. Увеличение ресурса деталей машин // Главный механик. 2015. № 1. С. 13-21.

6. Кравченко И.Н., Добычин М.В., Макаров К.В., Салаяев Н.И. Динамика и характер изнашивания рабочих элементов смесительного оборудования // Строительные и дорожные машины. 2016. № 5. С. 25-32.

7. Доронина Н.П., Жевора Ю.И., Пантух М.Л. Совершенствование технологии и средств восстановления изношенных деталей // Научное обозрение. 2016. № 21. С. 75-78.

8. Водолазская Н.В., Минасян А.Г., Шарая О.А. О причинах отказа и об оценке износа насосного оборудования перерабатывающих предприятий АПК // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2016. № 3 (11). С. 14-23.

9. Лялякин В.П., Голубев И.Г. Перспективы восстановления деталей сельскохозяйственной техники // Техника и оборудование для села. 2016. № 4. С. 41-43.

10. Жачкин С.Ю., Пухов Е.В., Трифонов Г.И., Комаров Ян.В., Загоруйко К.В. Анализ износостойкости функционального покрытия в условиях абразивного изнашивания сложнопрофильной детали трения // Вестник Воронежского государственного аграрного университета, 2019. Т. 12. № 3 (62). С. 32-40.

11. Ерофеев М.Н., Кравченко И.Н., Соколов И.В. Способ определения износа лопаток бетоносмесителя // Патент RU № 2362661, МПК В23Р6/00. № 2008128100/02; заявл. 11.07.2008; опубл. 27.07.2009. Бюл. № 21.

12. Кравченко И.Н., Салаяев С.И., Салаяев Н.И. Моделирование мобильных строительно-дорожных комплексов методами математического программирования // Механизация строительства. 2013. № 2. С. 19-23.

13. Кравченко И.Н., Салаяев Н.И., Бумарсков Д.А. Модель взаимодействия рабочих элементов смесительного оборудования // Строительные и дорожные машины. 2015. № 5. С. 29-33.

14. Кравченко И.Н., Тростин В.П., Ерофеев М.Н., Мухортов А.Л. Повышение долговечности изнашивающихся рабочих органов бетоносмесителей // Механизация строительства. 2008. № 10. С. 11-15.

15. Густов Ю.И. Исследование конструкционно-технологических и эксплуатационных показателей строительной техники // Вестник КГЛСУ. 2014. № 4 (30). С. 470-475.

16. Кравченко И.Н., Корнеев В.М., Салаяев Н.И. Результаты испытания материалов для упрочнения и восстановления рабочих органов смесительных установок // Доклады ТСХА: Сборник статей. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2016. Вып. 288. Ч. IV. С. 234-238.

2. Batishehev A.N., Feryabkov A.V., Kuznetsov Yu.A., Kulakov K.V. Tekhnologii vosstanovleniya i uprochneniya detaley mashin i oborudovaniya agropromyshlennogo kompleksa s primeneniym mikrodugovogo oksidirovaniya [Technologies for the restoration and hardening of farm machinery and equipment parts with micro-arc oxidation]. *Trudy GOSNITI*, 2007; 100: 156-158. (In Rus.)

3. Mikhal'chenkov A.M. Vosstanovleniye detaley sel'skokhozyaystvennoy tekhniki so slozhnoprofil'nym iznosom [Restoration of farm machinery parts featuring complex-profile wear]. *Trudy GOSNITI*, 2012; 109; 2: 42-46. (In Rus.)

4. Kuznetsov Yu.A., Goncharenko V.V., Feryabkov A.V. Modelirovaniye iznashivaniya MDO-pokrytiy [Modeling the wear of micro-arc oxide coatings]. *Tekhnika i oborudovaniye dlya sela*, 2015; 9: 40-44. (In Rus.)

5. Yugov V.I. Uvelicheniye resursa detaley mashin [Increasing the service life of machine parts]. *Glavniy mekhanik*, 2015; 1: 13-21. (In Rus.)

6. Kravchenko I.N., Dobyichin M.V., Makarov K.V., Salyayev N.I. Dinamika i kharakter iznashivaniya rabochikh elementov smesitel'nogo oborudovaniya [Wear dynamics and pattern of the working elements of mixing equipment]. *Stroitel'niye i dorozhniye mashiny*, 2016; 5: 25-32. (In Rus.)

7. Doronina N.P., Zhevora Yu.I., Pantukh M.L. Sovershenstvovaniye tekhnologii i sredstv vosstanovleniya iznosennykh detaley [Improvement of technology and means for restoring worn-out parts]. *Nauchnoye obozreniye*, 2016; 21: 75-78. (In Rus.)

8. Vodolazskaya N.V., Minasyan A.G., Sharaya O.A. O prichinakh otказа i ob otsenke iznosa nasosnogo oborudovaniya pererabatyvayushchikh predpriyatiy APK [On the causes of failure and on the wear assessment of the pumping equipment used by farm processing enterprises]. *Innovatsii v APK: problemy i perspektivy*, 2016; 3 (11): 14-23. (In Rus.)

9. Lyalyakin V.P., Golubev I.G. Perspektivy vosstanovleniya detaley sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [Prospects for the restoration of farm machinery parts]. *Tekhnika i oborudovaniye dlya sela*, 2016; 4: 41-43. (In Rus.)

10. Zhachkin S.Yu., Pukhov Ye.V., Trifonov G.I., Komarov Yan.V., Zagoruyko K.V. Analiz iznosostoykosti funktsional'nogo pokrytiya v usloviyakh abrazivnogo iznashivaniya slozhnoprofil'noy detali treniya [Analysis of wear resistance of a functional coating under conditions of abrasive wear of a complex-shaped friction part]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2019; 12; 3 (62): 32-40. (In Rus.)

11. Yerofeyev M.N., Kravchenko I.N., Sokolov I.V. Spособ opredeleniya iznosa lopatok betonosmesitelya [Method for determining the wear of concrete mixer blades]: Patent RU No. 2362661, МПК В23Р6/00. No. 2008128100/02, 2009. (In Rus.)

12. Kravchenko I.N., Salyayev S.I., Salyayev N.I. Modelirovaniye mobil'nykh stroitel'no-dorozhnykh kompleksov metodami matematicheskogo programmirovaniya [Modeling mobile road-building complexes using the methods of mathematical programming]. *Mekhanizatsiya stroitel'stva*, 2013; 2: 19-23. (In Rus.)

13. Kravchenko I.N., Salyayev N.I., Bumarskov D.A. Model' vzaimodeystviya rabochikh elementov smesitel'nogo

oborudovaniya [Interaction model of working elements of mixing equipment]. *Stroitel'niye i dorozhniye mashiny*, 2015; 5: 29-33. (In Rus.)

14. Kravchenko I.N., Trostin V.P., Yerofeyev M.N., Mukhortov A.L. Povysheniye dolgovechnosti iznashivayushchikhsya rabochikh organov betonosmesiteley [Increasing the durability of the wearing parts of concrete mixers]. *Mekhanizatsiya stroitel'stva*, 2008; 10: 11-15. (In Rus.)

15. Gustov Yu.I. Issledovaniye konstruksionno-tekhnologicheskikh i ekspluatatsionnykh pokazateley stroitel'noy tekhniki [Study of structural, technological, and operational indicators of construction equipment]. *Vestnik KGL-SU*, 2014; 4 (30): 470-475. (In Rus.)

16. Kravchenko I.N., Korneyev V.M., Salyayev N.I. Rezul'taty ispytaniya materialov dlya uprochneniya i vostanovleniya rabochikh organov smesitel'nykh ustanovok [Results of testing materials for hardening and restoration as exemplified by working elements of mixing plants]. *Doklady TSKHA: Sbornik statey*. Moscow, Izd-vo RGAU-MSKHA, 2016; 288; IV: 234-238. (In Rus.)

Критерии авторства

Кравченко И.Н., Ерофеев М.Н., Кузнецов Ю.А., Яковлев Д.Д., Макаров И.Д. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели обобщение и написали рукопись. Кравченко И.Н., Ерофеев М.Н., Кузнецов Ю.А., Яковлев Д.Д., Макаров И.Д. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила 01.07.2020

Опубликована 31.08.2020

Contribution

I.N. Kravchenko, M.N. Yerofeyev, Kuznetsov Yu.A., D.D. Yakovlev, I.D. Makarov performed theoretical studies, and based on the results obtained, generalized the results and wrote a manuscript. I.N. Kravchenko, M.N. Yerofeyev, Kuznetsov Yu.A., D.D. Yakovlev, I.D. Makarov have equal author's rights and bearequal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The paper was received on July 1, 2020

Published 31.08.2020