

АНАЛИЗ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ В УСЛОВИЯХ АБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ СЛОЖНОПРОФИЛЬНОЙ ДЕТАЛИ ТРЕНИЯ

Сергей Юрьевич Жачкин¹
Евгений Васильевич Пухов²
Григорий Игоревич Трифонов³
Ян Викторович Комаров³
Кирилл Викторович Загоруйко²

¹Воронежский государственный технический университет

²Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

³Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
Министерства обороны Российской Федерации

Основной причиной эксплуатационных отказов машин и механизмов в агропромышленном комплексе является износ и повреждение рабочих поверхностей деталей. В настоящее время самыми распространенными устройствами, используемыми для транспортировки абразивных (зерновых) смесей в сельском хозяйстве, являются шнековые транспортирующие конвейеры. Шнековые транспортеры используются в сложных условиях (например, непрерывная работа, транспортировка абразивных материалов, работа в условиях низких температур), возникающих в том числе и при транспортировке различных зерновых смесей. Главную роль при транспортировке выполняет сложнопрофильная деталь – шнек. С учетом высокой стоимости детали вопросы аналитической оценки износостойкости рабочей (винтовой) поверхности шнека после газотермической обработки приобретают все большую актуальность. Проанализированы факторы и критерии износа функционального покрытия винтовой поверхности шнека транспортирующего конвейера. Рассмотрено силовое воздействие на абразивную частицу материала (зерна) при его транспортировке рабочей областью конвейера. Проведена аналитическая и математическая оценка износостойкости функционального покрытия в условиях абразивного изнашивания сложнопрофильной поверхности шнека. Разработаны расчетные уравнения интенсивности изнашивания при упругом контакте, при пластическом контакте, при усталостном разрушении, а также при микрорезании. Проанализированы и усовершенствованы расчетные формулы, применяемые для определения весовой, линейной и энергетической интенсивности изнашивания в условиях повышенного абразивного износа. Учтены удельные характеристики весового и линейного износа рабочей поверхности шнека. Поскольку в данной работе рассматривается абразивное изнашивание функционального (износостойкого) покрытия шнека, то при математическом моделировании была учтена такая физико-механическая величина, как модуль Юнга, который выражен посредством коэффициентов Ламе, интерпретированных для функционального покрытия, нанесенного газотермическим методом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: износ, интенсивность изнашивания, шнек, абразив, деталь, трение, покрытие.

ANALYSIS OF WEAR RESISTANCE OF FUNCTIONAL COATING IN CONDITIONS OF ABRASIVE WEAR OF GEOMETRICALLY COMPLICATED FRICTION PART

Sergey Yu. Zhachkin¹
Evgeniy V. Pukhov²
Grigoriy I. Trifonov³
Yan V. Komarov³
Kirill V. Zagoruyko²

¹Voronezh State Technical University

²Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great

³Military Educational and Scientific Center of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin
Air Force Academy (Voronezh) the Ministry of Defence of the Russian Federation

The root cause of operational failures of machines and mechanisms used in Agro-Industrial Complex are wear and damage of the working surfaces of different parts. Currently, the most common devices used for the transportation of

abrasive (grain) mixtures in agriculture are screw transporting conveyors. Screw conveyors are used in difficult conditions (continuous operation, transportation of abrasive materials, operation at low temperatures) appearing in particular during transportation of various grain mixtures. The main load during transportation is accounted for the screw having the form of complicated friction part. Due to high cost of the detail, the issues of an analytical estimation of wear resistance of a working (spiral) surface of the screw after gas-thermal spraying are coming into ascendance. The authors discussed the factors and criteria of the wearing process of functional coating of spiral surface of the screw of transporting conveyor, as well as force effect on the abrasive particle of the material (grain) during its transportation by the working area of the conveyor. The authors also carried out analytical and mathematical estimation of wear resistance of functional coating in conditions of abrasive wear of complicated surface of friction part; developed design equation of wear intensity at elastic contact, at plastic contact, at fatigue failure, and at micro-cutting; analyzed and upgraded formulas used for determining mass, linear and energetical wear rate in conditions of increased abrasive wear taking into account specific characteristics of mass and linear wear rate of the working surface of the screw. Since in the paper the authors discussed abrasive wear of the functional (wear-resistant) coating of the screw, at the mathematical modeling they took into account such a physical and mechanical parameter as the Young's modulus, which was expressed by means of the Lamé's constants interpreted for the functional coating applied by the gas-thermal method.

KEYWORDS: wear, wear intensity, screw, abrasive, part, friction, coating.

В настоящее время самыми распространенными устройствами для транспортировки абразивных смесей являются шнековые транспортирующие конвейеры, которые активно применяются в агропромышленном комплексе [9]. Мощные шнековые транспортеры используются в сложных условиях (например, непрерывная работа, транспортировка абразивных материалов, работа в условиях низких температур и др.), возникающих в том числе и при транспортировке различных зерновых смесей [4]. Достаточно сложные условия эксплуатации приводят к изменению эксплуатационных свойств, ухудшению технического состояния рабочих узлов конвейера и появлению неисправностей, которые выражаются в изменении первоначальных форм, массы и механических свойств.

Из анализа опубликованных научных работ [11, 13, 21] следует, что основным видом изнашивания шнеков транспортирующих конвейеров является абразивное. Это связано с тем, что рабочая (винтовая) поверхность шнека при эксплуатации контактирует с зерном, что приводит к активному абразивному изнашиванию (рис. 1). При этом возникает высокая степень концентрации контактных напряжений, и поверхностный слой шнека подвергается интенсивному разрушению.

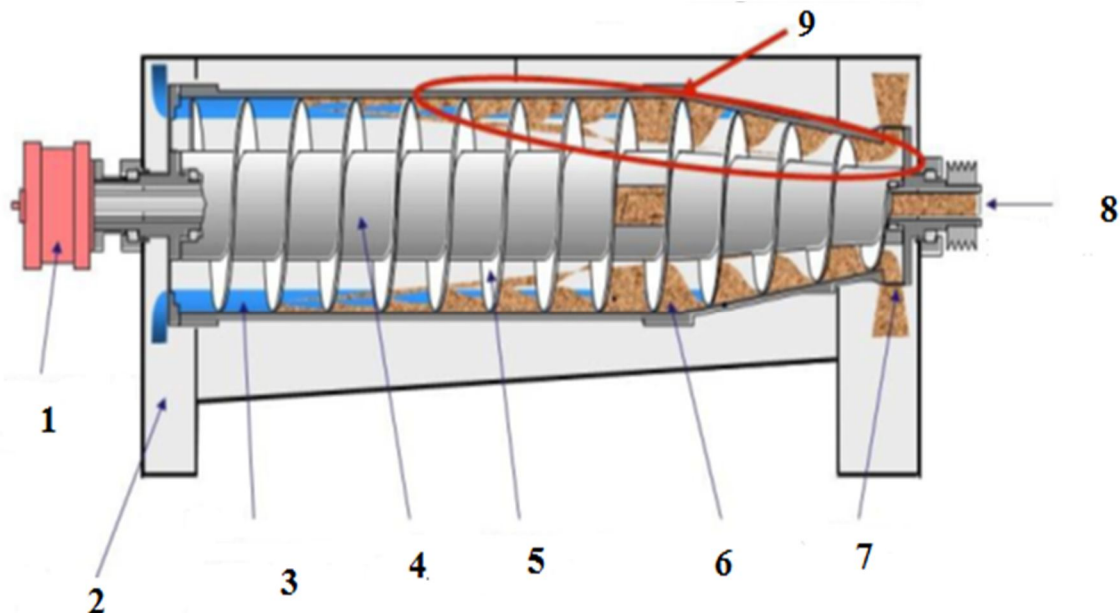


Рис. 1. Распределение абразива и области наибольшего износа шнека:
 1 – планетарный редуктор; 2 – выход фильтра; 3 – пруд-скопление транспортируемого продукта; 4 – тело шнека; 5 – лопасти шнека;
 6 – зона концентрации абразивного материала; 7 – выход твердой фазы;
 8 – вход продукта; 9 – область наибольшего износа

В условиях интенсивной эксплуатации шнековых конвейеров особое значение приобретает оперативное и качественное восстановление его рабочих поверхностей. Как показывает анализ научных работ [12, 15–17, 22], одной из наиболее эффективных технологий восстановления поверхностей деталей является плазменное напыление.

Целью проведенных исследований являлся анализ особенностей абразивного износа винтовой поверхности шнека транспортирующего конвейера после нанесения газотермическим методом функционального покрытия.

Установлено, что на срок эксплуатации шнека и его производительность значительное влияние оказывает транспортируемый груз. В агропромышленном комплексе, как правило, роль транспортируемого груза выполняет зерновая смесь. Зерно имеет высокую засоренность, поскольку транспортируется с поля вместе с различными примесями как органического, так и минерального происхождения. Причем количество примесей изменяется в широких пределах – 8–18% [5]. Это влечет за собой снижение производительности, повышение износа, расхода топлива и, как следствие, рост издержек производства.

Рассмотрим процесс транспортировки абразивной смеси и факторы, влияющие на износостойкость шнека винтового конвейера. Выполним математический анализ движения элементарной абразивной частицы по поверхности шнека.

Во время перемещения элементарной абразивной частицы по шнеку транспортирующего винтового конвейера на нее воздействуют определенные силы (рис. 2) [9].

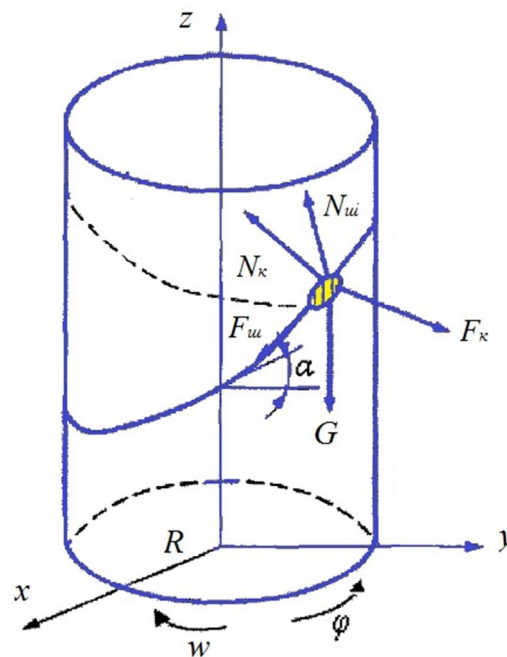


Рис. 2. Схема сил, действующих на абразивную частицу

Как видно из приведенной схемы, на абразивную частицу транспортируемой зерновой смеси (рис. 2) действуют сила трения частицы о стенку кожуха F_{κ} , сила трения частицы о винтовую поверхность шнека $F_{ш}$ и сила веса частицы G . Для определения величины приведенных сил трения воспользуемся следующими выражениями [11]:

$$\begin{aligned} F_{\kappa} &= N_{\kappa} \times f_{\kappa} \quad ; \\ F_{ш} &= N_{ш} \times f_{ш} \quad , \end{aligned} \tag{1}$$

где N_{κ} – нормальная реакция со стороны стенки кожуха шнека, Н;
 $N_{ш}$ – нормальная реакция со стороны винтовой поверхности шнека, Н;
 f_{κ} – коэффициент трения зерна о стенку кожуха;
 $f_{ш}$ – коэффициент трения материала о шнек.

Время t , за которое абразивная частица достигает установившегося движения внутри конвейера, тем меньше, чем больше угловая скорость шнека w и коэффициент трения абразивной частицы о стенку кожуха f_k [2]. При увеличении коэффициента трения материала о винтовую поверхность шнека f_{uu} и угла подъема винтовой линии α указанное время возрастает

$$\begin{aligned} & \downarrow t, \dots, f_k \uparrow, w \uparrow ; \\ & \uparrow t, \dots, f_{uu} \uparrow, \alpha \uparrow . \end{aligned} \quad (2)$$

Кроме того, для более полного описания картины силового воздействия на абразивную частицу зернового материала учитывают центробежную силу, которая перемещает зерновую смесь к периферии винтовой поверхности шнека. Причем при малых показателях величины центробежной силы F_u винтовой конвейер недостаточно эффективен. Следовательно, условие нормального функционирования конвейера с учетом F_u запишется как

$$F_{uu} \leq F_u . \quad (3)$$

Абразивный износ является главной причиной разрушения и деформации конструкции шнека винтового конвейера. В ходе перемещения зерновой абразивной смеси твердые частицы прижимаются к винтовой поверхности шнека, что приводит к износу поверхности в процессе эксплуатации. Также причинами интенсивного износа рабочей поверхности шнека является высокая концентрация абразивных частиц в зерновой смеси, недостаточный уровень защиты лопастей шнека от износа. Износ, вызванный абразивным воздействием твердых частиц, влияет на производительность и срок службы винтового конвейера в целом [1].

Для оценки износостойкости функционального покрытия, нанесенного газотермическим методом, необходимо знать интенсивность распространения абразивного изнашивания в процессе эксплуатации.

Интенсивность абразивного изнашивания при упругом контакте абразивной смеси с покрытием, полученным плазменным напылением, определяется по формуле (4) [6]

$$I_1 = \frac{c_1 p (1 - v^2)}{E} , \quad (4)$$

где c_1 – константа шероховатости;

p – контурное удельное давление, Н/м²;

v – коэффициент Пуассона;

E – модуль Юнга, Н/м².

Поскольку в данной работе рассматривается абразивное изнашивание функционального (износостойкого) покрытия шнека, то следует учитывать, что в уравнениях, описывающих закон Гука, модуль Юнга может быть записан с учетом коэффициентов Ламе λ и μ при плазменном напылении функциональных покрытий [14]:

$$\lambda = \frac{Ev}{(1+v)(1-2v)} ; \quad \mu = \frac{E}{2(1+v)} . \quad (5)$$

С учетом коэффициентов Ламе λ и μ формула (4) примет следующий вид:

$$I_1 = \frac{c_1 p (1 - v^2)}{2 \mu (1 + v)} . \quad (6)$$

При этом контурное удельное давление определяется по формуле (7) [21]

$$p = \frac{1,4HB^2(1-\nu^2)^4}{\Delta^2 E^4}, \quad (7)$$

где HB – твердость по Бринеллю, кгс/мм²;

Δ – комплексная характеристика шероховатости (учитывает остроту выступов и распределение шероховатого нанесенного функционального слоя по высоте профиля).

В итоге расчетное уравнение для определения величины изнашивания при упругом контакте можно представить в следующем виде:

$$I_1 = 0,0875 \frac{c_1 HB^2 (1-\nu^2)^5}{\Delta^2 \mu^4 (1+\nu)^4}. \quad (8)$$

Интенсивность абразивного изнашивания при пластическом контакте определяется по формуле (9) [10]

$$I_2 = \frac{c_2 P}{HB}. \quad (9)$$

Преобразуем уравнение (9) с учетом коэффициентов Ламе λ и μ

$$I_2 = \frac{1,4c_2 HB(1-\nu^2)^4}{\Delta^2 \mu^4 (1+\nu)^4}, \quad (10)$$

где c_2 – константа шероховатости (характеризует поверхность).

Интенсивность абразивного изнашивания, основанная на закономерности усталостного разрушения, в общем виде определяется по формуле (11)

$$I_3 = \frac{4i_h A_r}{\pi A_a}, \quad (11)$$

где A_a – номинальная площадь контакта, мкм²;

A_r – фактическая площадь контакта, мкм²;

i_h – удельная интенсивность изнашивания.

Интенсивность абразивного изнашивания при микрорезании определяется по формуле (12) [21]

$$I_4 = \frac{h_0 k n_a}{A_r} \times 10^{-6}, \quad (12)$$

где h_0 – глубина внедрения частиц, мкм;

k – ширина царапания, мкм;

n_a – усредненное число частиц, участвующих в процессе износа.

Так как абразивному износу преимущественно подвергается винтовая поверхность шнека, то уравнение площади контакта запишется как

$$A_r = \left[R\sqrt{R^2 + h^2} + h^2 \ln \left(\frac{R + \sqrt{R^2 + h^2}}{h} \right) \right] \times \pi \times m - F_v, \quad (13)$$

где R – внешний радиус шнека, мкм;

h – шаг винтовой линии;

m – количество витков шнека, шт.;

F_v – площадь винтовой поверхности без функционального покрытия, мкм².

С учетом уравнения (13) формулы (11) и (12) могут быть представлены в следующем виде:

$$I_3 = \frac{4i_h \times \left[R\sqrt{R^2 + h} + h^2 \ln \left(\frac{R + \sqrt{R^2 + h^2}}{h} \right) \right] \times \pi \times m - F_v}{\pi A_a}; \quad (14)$$

$$I_4 = \frac{h_0 k}{\left[R\sqrt{R^2 + h} + h^2 \ln \left(\frac{R + \sqrt{R^2 + h^2}}{h} \right) \right] \times \pi \times m - F_v} \times 10^{-6}.$$

В соответствии с ГОСТ 50740-95 и ГОСТ 30479-97 интенсивность изнашивания определяется как отношение значения износа к обусловленному пути, на котором происходит изнашивание, или объему выполненной работы [7, 8].

Весовая интенсивность изнашивания может быть определена по формуле (15) [3]

$$I_5 = \frac{G_0}{L}, \quad (15)$$

где G_0 – масса изношенного материала, г;

L – путь трения, мкм.

Поскольку предметом исследования является шнек винтового конвейера, то путь трения L абразивных частиц вдоль рабочей (винтовой) поверхности выражается как

$$L = 2\pi Rn, \quad (16)$$

где n – количество оборотов шнека.

После преобразования формула (15) примет следующий вид:

$$I_5 = \frac{G_0}{2\pi Rn}. \quad (17)$$

Линейная интенсивность изнашивания будет определяться по формуле (18)

$$I_6 = \frac{m_0}{2\pi Rn}, \quad (18)$$

где m_0 – толщина слоя функционального покрытия, снятого с площади фактического контакта A , при ее однократном воспроизведении, мкм.

Помимо перечисленных видов интенсивности абразивного изнашивания существует энергетическая интенсивность изнашивания, которая определяется по формуле (19) [20]

$$I_7 = \frac{V}{A}, \quad (19)$$

где V – объем изношенного материала, мкм³;

A – работа трения, Дж.

Кроме того, интенсивность абразивного изнашивания характеризуется такими удельными характеристиками, как весовой износ i_0 и линейный износ i_1 , которые определяются по формуле (20):

$$i_0 = \frac{G_0}{2\pi Rn \times \left[R\sqrt{R^2 + h} + h^2 \ln \left(\frac{R + \sqrt{R^2 + h^2}}{h} \right) \right] \times \pi \times m - F_v},$$

$$i_1 = \frac{V_v}{d \times \left[R\sqrt{R^2 + h} + h^2 \ln \left(\frac{R + \sqrt{R^2 + h^2}}{h} \right) \right] \times \pi \times m - F_v},$$
(20)

где V_v – объем отделившегося функционального покрытия при перемещении на длину, равную диаметру пятна касания, мкм³;

d – диаметр единичного пятна касания, мкм.

Приведенные критерии интенсивности износа функционального покрытия винтовой поверхности шнека определяются механизмом износа в рамках определенной теории износа [18, 19]. При проведении расчетов интенсивности изнашивания по разработанным расчетным уравнениям необходимо учитывать не только возникающий в процессе трения контакт, но и вид изнашивания.

В работах И.В. Крагельского с соавт., А.В. Чичинадзе с соавт., С.Ю. Жачкина с соавт. были классифицированы возникающие при трении контакты (упругий, пластический, микрорезание, адгезионное взаимодействие, когезионный отрыв), а также показано, что вид контакта определяется свойствами взаимодействующих материалов [18, 19, 23]. В реальных условиях могут иметь место несколько видов изнашивания, поэтому следует установить ведущий вид, лимитирующий долговечность, и отделить его от остальных, сопутствующих, незначительно влияющих на работоспособность.

Выводы

Выполнен анализ критериев износа функционального покрытия винтовой поверхности шнека транспортирующего конвейера.

Рассмотрено силовое воздействие на абразивную частицу зерновой смеси при ее перемещении по шнеку транспортирующего винтового конвейера.

Проведена аналитическая оценка износостойкости функционального покрытия в условиях абразивного изнашивания сложнопрофильной детали трения, в частности, разработаны расчетные уравнения интенсивности изнашивания при упругом контакте, при пластическом контакте, при усталостном разрушения и при микрорезании.

Усовершенствованы расчетные формулы по определению весовой, линейной и энергетической интенсивности изнашивания в условиях абразивного износа. В полученных зависимостях определены удельные характеристики весового и линейного износа шнека.

Библиографический список

1. Адигамов К.А. Транспортирование материалов вертикальным шнековым конвейером : монография / К.А. Адигамов, Г.В. Черненко, С.Н. Байбара. – Шахты : ФГБОУ ВПО «ЮРГУЭС», 2012. – 96 с.
2. Байбара С.Н. Обоснование параметров однозаходового вертикального шнекового конвейера : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13 / С.Н. Байбара. – Шахты, 2008. – 22 с.
3. Бартенев Г.М. Трение и износ полимеров / Г.М. Бартенев, В.В. Лаврентьев. – Ленинград : Химия, 1972. – 240 с.
4. Бороховский Л.А. Проектирование предприятий по хранению и переработке зерна / Л.А. Бороховский. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Колос, 1971. – 383 с.
5. Бутковский В.А. Технологии зерноперерабатывающих производств : учебник / В.А. Бутковский, А.И. Мерко, Е.М. Мельников. – Москва : Интерграф сервис, 1999. – 470 с.
6. Гевко Б.М. Технология изготовления спиралей шнеков / Б.М. Гевко. – Львов : Вища школа. Изд-во при Львов. ун-те, 1986. – 128 с.
7. ГОСТ 30479-97. Обеспечение износостойкости изделий. Методы установления предельного износа, обеспечивающего требуемый уровень безопасности. Общие требования. – Введ. 1998–07–01. – Москва : ИПК Изд-во стандартов, 1997. – 12 с.
8. ГОСТ 50740-95. Триботехнические требования и показатели. Принципы обеспечения. Общие положения. – Введ. 1996–01–01. – Москва : Госстандарт России, 1995. – 11 с.
9. Григорьев А.М. Винтовые конвейеры / А.М. Григорьев. – Москва : Машиностроение, 1972. – 184 с.
10. Зотов Б.Н. Расчет характеристик шнеков постоянного и переменного шага / Б.Н. Зотов // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. – 2015. – № 3. – С. 29–40.
11. Комбалов В.С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов : справочник / В.С. Комбалов ; под ред. К.В. Фролова, Е.А. Марченко. – Москва : Машиностроение, 2008. – 383 с.
12. Леонов С.Л. Моделирование износа наплавленных поверхностей деталей / С.Л. Леонов, А.А. Ситников, М.Е. Татаркин // Ползуновский альманах. – 2012. – № 1. – С. 228–229.
13. Овчинникова Т.В. Результаты экспериментальных исследований влияния шага шнека и скорости воздушного потока на производительность и суммарную мощность привода пневмовинтовой установки / Т.В. Овчинникова, П.И. Павлов // Научное обозрение. – 2015. – № 8. – С. 10–13.
14. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование / А.Ф. Ильющенко, А.И. Шевцов, В.А. Оковитый, Г.Ф. Громыко. – Минск : Издательский дом «Беларусская наука», 2011. – 357 с.
15. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления : учеб. пособие по курсу «Технология конструкций из металлокомпозитов» / А.Ф. Пузряков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 360 с.
16. Пухов Е.В. Анализ методов обновления, списания и планирования сервисного обслуживания транспортных и технологических машин / Е.В. Пухов, Д.В. Овсянников, М.Г. Тимошинов, Е.А. Горбунов // Повышение эффективности использования мобильных энергетических средств в различных режимах движения : матер. международной науч.-практ. конф., посвященной 115 годовщине со дня рождения профессора Харитончика Ефима Мироновича. Редколлегия: Н.И. Бухтояров, В.А. Гулевский, В.И. Оробинский ; под общей редакцией О.И. Поливаева, О.М. Костикова, А.В. Божко. – Воронеж : ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2017. – Ч. 1. – С. 366–372.

17. Пухов Е.В. Анализ технологии восстановления деталей термическими методами / Е.В. Пухов, К.В. Загоруйко // Проблемы развития технологий создания, сервисного обслуживания и использования технических средств в агропромышленном комплексе : матер. международной науч.-практ. конф. (Россия, г. Воронеж, 15–16 ноября 2017 г.) ; под общей редакцией Н.И. Бухтоярова, В.И. Оробинского. – Воронеж : ФГБОУ ВО ВГАУ, 2017. – Ч. 1. – С. 355–361.

18. Трение, изнашивание и смазка : справочник : в 2 кн. / В.В. Алисин, А.Я. Алябьев, А.М. Архаров и др. ; под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. – Москва : Машиностроение, 1978. – Кн. 1. – 400 с.

19. Трение, износ и смазка (Трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и др.; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – Москва : Машиностроение, 2003. – 575 с.

20. Трение и износ материалов на основе полимеров / В.А. Белый, А.И. Свириденко, М.И. Петровец, В.Г. Савкин. – Минск : Наука и техника, 1976. – 432 с.

21. Трифонов Г.И. Абразивный износ и факторы, определяющие износостойкость рабочих поверхностей шнеков транспортирующих конвейеров / Г.И. Трифонов // Сборник научных статей по итогам работы Международного научного форума «Наука и инновации – современные концепции» (Россия, г. Москва, 6 марта 2019 г.) ; отв. ред. Д.Р. Хисматуллин. – Москва : Изд-во Инфинити, 2019. – Т. 1. – С. 121–125.

22. Трифонов Г.И. Оценка интенсивности абразивного износа плазменного покрытия / Г.И. Трифонов, С.Ю. Жачкин, С.Н. Шарифуллин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2018. – № 10. – С. 41–43.

23. Трифонов Г.И. Расчетные методы оценки абразивного износа плазменного покрытия винтовой поверхности детали / Г.И. Трифонов, С.Ю. Жачкин // Приложение к журналу. Вестник Тамбовского университета. Сер. Естественные и технические науки. – 2018. – Т. 23, № 122. – С. 294–298.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Сергей Юрьевич Жачкин – доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированного оборудования машиностроительного производства ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Россия, г. Воронеж, e-mail: zhach@list.ru.

Евгений Васильевич Пухов – доктор технических наук, зав. кафедрой эксплуатации транспортных и технологических машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: puma231@yandex.ru.

Григорий Игоревич Трифонов – младший научный сотрудник 12 отдела ФГКВУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации, Россия, г. Воронеж, e-mail: trifonov_gi@mail.ru.

Ян Викторович Комаров – кандидат технических наук, командир взвода (научного) – младший научный сотрудник роты (научной) ФГКВУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации, Россия, г. Воронеж, e-mail: yaniks88@bk.ru.

Кирилл Викторович Загоруйко – аспирант кафедры эксплуатации транспортных и технологических машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: kir835@yandex.ru.

Дата поступления в редакцию 05.08.2019

Дата принятия к печати 15.09.2019

AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Sergey Yu. Zhachkin, Doctor of Engineering Sciences, Professor, the Dept. of Automated Production Equipment and Machinery, Voronezh State Technical University, Russia, Voronezh, e-mail: zhach@list.ru.

Evgeniy V. Pukhov, Doctor of Engineering Sciences, Head of the Dept. of Transport Vehicles and Production Machines Operation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: puma213@yandex.ru.

Grigoriy I. Trifonov, Junior Researcher, Military Educational and Scientific Center of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy (Voronezh) the Ministry of Defence of the Russian Federation, Russia, Voronezh, e-mail: trifonov_gi@mail.ru.

Yan V. Komarov, Candidate of Engineering Sciences, Scientific Platoon Commander, Junior Researcher at the Scientific Company, Military Educational and Scientific Center of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy (Voronezh) the Ministry of Defence of the Russian Federation, Russia, Voronezh, e-mail: yaniks88@bk.ru.

Kirill V. Zagoruyko, Postgraduate Student, the Dept. of Transport Vehicles and Production Machines Operation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: kir835@yandex.ru.

Received August 05, 2019

Accepted September 15, 2019