Philatov Ivan – Candidate of Technical Sciences, Teacher of the Tambov Regional State Budgetary Professional Educational Institution "Instrument-Making College", Russia, Tambov, email: ridder@mail.ru.

Rodionov Yury – Full Doctor of Technical Sciences, Professor of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education “Tambov State Technical University”, Russia, Tambov, Professor of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education “Michurinsk State Agrarian University”, Russia, Michurinsk, e-mail: rodionow.u.w@rambler.ru.

Nikitin Dmitry – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education “Tambov State Technical University”, Russia, Tambov, Associate Professor of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education “Michurinsk State Agrarian University”, Russia, Michurinsk, email: vacuum2008@yandex.ru.

Поступила в редакцию (Received): 15.03.2022 Принята к публикации (Accepted): 12.04.2022

УДК 621.9.047
DOI: 10.35887/2305-2538-2022-2-134-142

МАССОПЕРЕНОС ПРИ ГАЛЬВАНИЧЕСКОМ ОСАЖДЕНИИ ПОКРЫТИЙ С ВЫРАВНИВАЮЩЕЙ ДОБАВКОЙ

[1]Жачкин Сергей Юрьевич
[2]Пеньков Никита Алексеевич
[3]Невструев Юрий Алексеевич
[1]БирюковАлександр Вячеславович
[2]Власов Дмитрий Александрович

[1]ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
[2] ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
[3]ООО «Аквапаскаль»

Реферат. *Для получения размерных герметичных гальванических покрытий при восстановлении силовой гидравлической аппаратуры важна возможность управления шероховатостью формируемых осадков с обеспечением выравнивающей способности обрабатываемых деталей. Рассматривается модель, описывающая процесс конвективной диффузии композиционных частиц в гальваническую матрицу формируемого покрытия. Установлено, что представленную задачу можно описать классическим уравнением Лапласа. Однако аналитическое решение в существующей постановке не интегрируется в квадратурах. Для его решения использован численный метод, описанный Ватсоном и Эдвардсом. Он позволяет получить связь между электрическими характеристиками поля, благодаря разложению вторичного электрического поля на первичное поле и поле поляризации. Предполагается, что диффузия выравнивающей добавки происходит в поле, подобном первичному электрическому полю, а концентрация добавки непосредственно у поверхности электрода постоянна и равна нулю. Вычисляя величину выравнивающей добавки из кривых потенциал-концентрация при постоянной силе тока, было установлено качественное совпадение расчетной выравнивающей способности с экспериментально найденными значениями для хромового электролита. Полученные в ходе исследования зависимости указывают на экспоненциальный характер изменения микропрофиля формируемого гальванического покрытия со временем электролиза как в случае положительного, так и отрицательного выравнивания. Это подтверждается*

множеством экспериментальных данных, касающихся развития шероховатости в случае диффузионных ограничений. Предлагаемый алгоритм изложен достаточно ясно, что позволяет автоматизировать его для производства практических вычислений по численному интегрированию системы дифференциальных уравнений в частных производных с использованием ЭВМ.

Ключевые слова: *численные методы интегрирования, гальванические композиционные покрытия, шероховатость, концентрация включений, параметры микропрофиля.*

MASS TRANSFER DURING GALVANIC DEPOSITION OF COATINGS WITH A LEVELING ADDITIVE

[1]Zhachkin Sergey
[2]Penkov Nikita
[3]Nevstruev Yury
[1]Biryukov Alexander
[2]Vlasov Dmitry

[1] Voronezh State Technical University
[2] MERC AF «AFA»
[3] Aquapascal

Abstract.*The ability to control the roughness of the formed deposits with the provision of the leveling ability of the workpieces is important for obtaining dimensional sealed galvanic coatings when restoring power hydraulic equipment. A model that describes the process of convective diffusion of composite particles into the galvanic matrix of the formed coating is considered. It is established that the presented problem can be described by the classical Laplace equation. However, the analytical solution in the existing formulation isn't integrated in quadratures. The numerical method described by Watson and Edwards was used. It allows to get a connection between the electrical characteristics of the field due to the decomposition of the secondary electric field into the primary field and the polarization field. It is assumed that the diffusion of the leveling additive occurs in a field similar to the primary electric field, and the concentration of the additive directly at the electrode surface is constant and equal to zero. A qualitative agreement between the calculated leveling ability and the experimentally found values for the chromium electrolyte was established when determining the amount of the leveling additive from the potential-concentration curves at a constant current strength. The dependences obtained in the course of the study indicate the exponential nature of the change in the microprofile of the formed galvanic coating with the time of electrolysis, both in the case of positive and negative equalization. This is confirmed by a lot of experimental data concerning the development of roughness in the case of diffusion restrictions. The proposed algorithm is stated quite clearly, which makes it possible to automate it for the production of practical calculations on the numerical integration of a system of differential equations in partial derivatives using a computer.*

Keywords: *numerical methods of integration, galvanic composite coatings, roughness, concentration of inclusions, microprofile parameters.*

Введение. Из-за высокой степени брака деталей систем привода рабочих органов сельскохозяйственной техники очевидна актуальность получения размерных герметичных гальванических покрытий при восстановлении силовой гидравлической аппаратуры. Для получения таких покрытий важна возможность управления шероховатостью формируемых осадков с обеспечением выравнивающей способности обрабатываемых деталей.

Цель исследования. Численный расчет параметров микропрофиля восстанавливаемой поверхности силовой гидравлической аппаратуры сельскохозяйственной техники с использованием теории конвективной диффузии.

Материалы и методы. При определении параметров микропрофиля формируемой поверхности использовались методы численного интегрирования дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка.

Результаты и обсуждение. Известно дифференциальное уравнение, описывающее перенос вещества к электродной поверхности путем конвективной диффузии [1]. В том случае, когда жидкая среда неподвижна, это уравнение превращается в обычное уравнение Лапласа, характеризующее процесс стационарной молекулярной диффузии в виде:

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} = 0 \qquad (1)$$

Выражение, описывающее перенос вещества к электродной поверхности путем конвективной диффузии, является уравнением второго порядка в частных производных и с переменными коэффициентами. Для этого уравнения не может быть дано общего решения, так как компоненты скоростей движения жидкости должны быть заданы заранее и они, как правило, не зависят от распределения концентрации веществ в растворе. Точные решения этого уравнения могут быть получены только в некоторых очень простых геометрических системах. Так, удалось решить это уравнение в задаче переноса вещества к поверхности вращающегося диска [2]. В других геометрических условиях приходится прибегать к приближенному решению этого уравнения.

Шероховатая поверхность рассматривается в виде синусоидального профиля. На исходном профиле (граница с электролитом) первичное поле (рисунок 1а) в экстремальных точках А и В силатока можетбыть представлена в виде уравнений:

$$i_A = k_A i_{cp},\ i_B = k_B i_{cp}; \qquad (2)$$

где k_A и k_B – константы, связанные только с геометрической формой профиля.

Разность токов, очевидно, будет:

$$i_A - i_B = (k_A - k_B) i_{cp} = k \cdot i_{cp}. \qquad (3)$$

В реальном электрическом поле потенциал непостоянен и меняется вдоль профиля. Картина линий тока и характер распределения тока в этом случае будут другими (рисунок 1б). Это поле может быть расчленено на первичное и тангенциальное, существующее за счет разностей потенциалов по длине профиля:

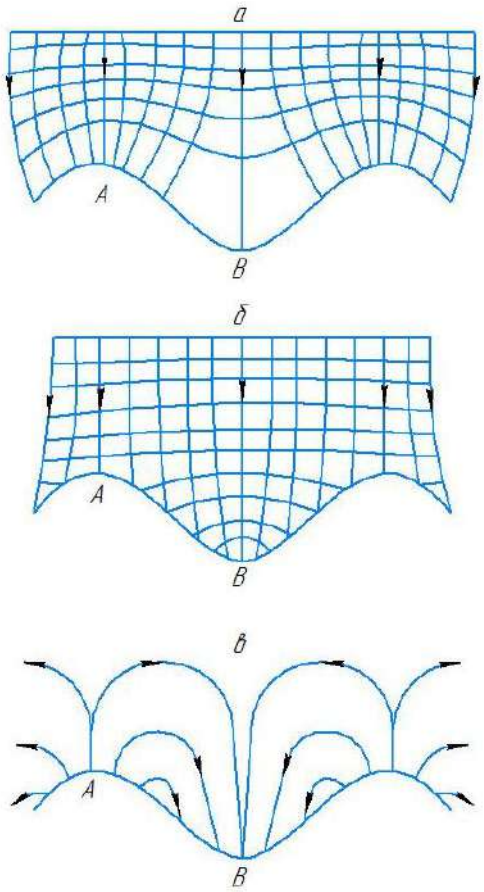
$$i'_A = i_A + i''_A;\ i_{B'} = i_B + i''_B. \qquad (4)$$

Индексы со штрихом и двумя штрихами относятся соответственно к реальному и тангенциальному полям. Так как среднее значение тока в первичном и в реальном полях берется одинаковым, то средний ток в поле поляризации (рис. 1в) должен быть равен нулю. Это означает, что из одних точек (лежащих у выступов) ток течет в одном направлении, а из других (лежащих во впадинах х) — в другом. В простейшем случае можно положить, что плотность тока в экстремальных точках поля (рисунок 1в) будет одинакова по абсолютной величине, но противоположна по знаку:

$$-i'_A = i''_B = i_S. \qquad (5)$$

Силу тангенциального тока можно приближённо выразить по закону Ома соотношением:

$$i_S = -\frac{\Delta\tau}{R}, \qquad (6)$$



а — первичное, б — при выравнивании, в — поле поляризации

Рисунок 1 - Электрические поля на синусоидальном профиле:

где $\Delta\tau$ — разность потенциалов между экстремальными точками, R — величина, пропорциональная омическому сопротивлению раствора. Совершенно очевидно, что R зависит как от геометрии профиля, так и от удельного сопротивления раствора. Разность токов в реальном поле $\Delta i'$ на основании (3)–(6) может быть выражена:

$$\Delta i' = i'_A - i'_B = i_A - i_B - 2i_S. \quad (7)$$

И наконец:

$$\Delta i' = k i_{cp} + \frac{2\Delta V}{R}, \quad (8)$$

откуда

$$\Delta V = -\frac{R}{2}\left(k i_{cp} + \Delta i'\right). \quad 9)$$

Прием, использованный Ватсоном и Эдвардсом взамен точного решения уравнения Лапласа и приводящий к связям между электрическими характеристиками поля, аналогичен ранее описанному приему разложения вторичного электрического поля на первичное поле и поле поляризации [1, 3].

В дальнейшем будем пользоваться аналогией распределения концентрации в поле диффузии и потенциала в электрическом поле, происходящем по одному и тому же дифференциальному закону, выраженному уравнением Лапласа. Диффузия выравнивающей добавки происходит в поле, подобном первичному электрическому полю, полагая, что концентрация добавки непосредственно у поверхности электрода постоянна и равна нулю. В глубину раствора от электродной поверхности простирается диффузионный пограничный слой. Искусственное или естественное перемешивание раствора делают на границе этого слоя концентрацию диффундирующего вещества постоянной подобно тому, как в электрическом поле на некотором расстоянии от шероховатой поверхности потенциал тоже становится постоянным. Таким образом, между диффузионными и электрическими условиями на границе вдали от электрода существует подобие. Аналогия первичного электрического поля и поля диффузии позволяет для потока добавки в экстремальных точках написать:

$$U_B = k_B U_{cp}, \qquad U_A = k_A U_{cp} \tag{10}$$

где k_A и k_B– те же константы, что и в первичном поле. Поскольку концентрация выравнивающей добавки на поверхности электрода равна нулю, то скорость диффузии (U) может быть выражена через объемную концентрацию добавки (C) равенством:

$$U = D\frac{C}{\delta}\cdot \tag{11}$$

На основании (11) можно записать:

$$U_B = D\frac{k_B C}{\delta}, \qquad U_A = D\frac{k_A C}{\delta}. \tag{12}$$

Из последних соотношений видно, что скорость диффузии к точкам А и В микропрофиля тождественна скорости диффузии на плоскую поверхность соответственно из растворов с объемной концентрацией добавки kBC и kAC. Таким образом, для расчета доставки добавки к экстремальным точкам можно использовать «эквивалентные объемные концентрации» между пиком и впадиной, если допустить диффузию на плоскую поверхность. Для разницы в эквивалентных объемных концентрациях между экстремальными точками можно установить, что:

$$\left[\begin{array}{l} \Delta C = \left(k_B - k_A\right)C, \\ \Delta C = kC. \end{array}\right. \tag{13}$$

Поскольку потенциал может считаться непрерывной функцией концентрации добавки и плотности тока [3], то должно иметь место следующее дифференциальное соотношение:

$$dV = \frac{\partial V}{\partial C}dC + \frac{\partial V}{\partial i}di\cdot \tag{14}$$

Переходя от дифференциалов к конечным приращениям, получим:

$$\Delta V = \frac{\partial V}{\partial C}\Delta C + \frac{\partial V}{\partial i}\Delta i\cdot \tag{15}$$

Учтя (9) и (13), из (15) можно записать:

$$\Delta i = \frac{-k\left(C\dfrac{\partial V}{\partial c} + \dfrac{R}{2}i\right)}{\dfrac{\partial V}{\partial i} - \dfrac{R}{2}}\cdot \tag{16}$$

Взяв в качестве критерия выравнивающей способности (ВС) отношение $\Delta i/i$, окончательно будем иметь:

$$BC = \frac{\Delta i}{i} = \frac{k\left(C\frac{\partial V}{\partial C} + \frac{Ri}{2}\right)}{i\left(\frac{\partial V}{\partial i} + \frac{R}{2}\right)}, \quad (17)$$

а если пренебречь сопротивлением электролита, то:

$$BC = \frac{\Delta i}{i} = \frac{kC\partial V/\partial C}{i\,\partial V/\partial i}. \quad (18)$$

Вычисляя величину выравнивающейдобавкиз кривых потенциал-концентрации при постоянной силе тока, былоустановлено качественное совпадение расчетной выравнивающей способности с экспериментально найденными значениями для хромового электролита.

Более точные данные можно получить, если следовать рекомендациям [4] и в качестве исходного выражения в расчете использовать:

$$\frac{dH}{d\tau} = \frac{M}{2\gamma nF}\left[2\left(\frac{\partial i}{\partial \delta}\right)H + \left(\frac{\partial i}{\partial C_i}\right)\Delta C_i\right], \quad (19)$$

в котором H – разница уровней между экстремальными точками профиля (амплитуда шероховатости), τ – время; M, γ и n – молекулярный вес, плотность и валентность осаждаемого металла, δ – толщина диффузионного пограничного слоя, C_i – объемная концентрация органической добавки в осаждаемом металле, ΔC_i – разница в концентрациях добавки между наивысшей и наинизшей точками микропрофиля.

В уравнении (19) будем считать:

$$\frac{dH}{d\tau} = \frac{M}{\gamma nF}(i_B - i_A); \; i_B = nFD\left(\frac{\partial C}{dy}\right)_B; \; i_A = nFD\left(\frac{\partial C}{dy}\right)_A. \quad (20)$$

Выражение, заключенное в квадратных скобках в (19), было получено после разложения в ряде локальных значений плотностей тока, представляемых в виде функции расстояния данной точки поверхности до внешней границы диффузионного слоя и объемной концентрации органической добавки в металле. Отбрасывание членов ряда в высших степенях и замена дифференциалов конечными разностями равносильно допущению о линейном виде зависимости тока от высоты уровня шероховатого профиля и концентрации выравнивающей добавки в осадке. Последующие вычисления касаются определения величиныΔC_i. Будем полагать, что линейное распределение концентрации в диффузионном слое при длине волны профиля много больше толщины диффузионного слоя [3]. Рассматривая одномерную диффузию, можно записать:

$$\frac{\partial i}{\partial \delta} = \frac{i_{cp}}{\delta}. \quad (21)$$

В другом месте для синусоидального профиля на основании двухмерной диффузии легко видеть, что:

$$\frac{\partial i}{\partial \delta} = \frac{2\pi i}{a} cth\frac{2\delta\pi}{a}. \quad (22)$$

Производная в данном случае определялась из уравнения поляризационной кривой после предположения, что при малых концентрациях выравнивающей добавки существует линейная зависимость свободного члена в уравнении от C_i, а именно:

$$\eta = a + bC_i + b\ln i. \quad (23)$$

Для производной из (23) имеем:

$$\frac{\partial i}{\partial C_i} = -\frac{\beta i}{b}. \tag{24}$$

Разность концентраций органических включений между наивысшими и наинизшими точками профиля ΔC_i определялась из равенства:

$$\Delta C_i = \frac{f_B - f_A}{V} = \frac{(f_B - f_A)\gamma nF}{iM}, \tag{25}$$

где f_B и f_A – диффузионные потоки к экстремальным точкам профиля, V – объем металла, осаждающийся в единицу времени. Далее с учетом двухмерной диффузии и допущения, это концентрация добавки у поверхности металла равна нулю, было найдено:

$$f_B - f_A = \frac{4\pi D_i C_i H}{a\delta} cth\frac{2\delta\pi}{a}, \tag{26}$$

откуда следует на основании (25):

$$\Delta C_i = \frac{4\pi\gamma nFD_i C_i H}{a\delta} cth\frac{2\delta\pi}{a}. \tag{27}$$

После подстановки (22), (23) и (27) в (19) и интегрирования получаем уравнение:

$$\ln\frac{H_0}{H_\tau} = -\frac{2\pi M}{\gamma nFa} cth\left(\frac{2\delta\pi}{a}\right)\left[i - \left(\frac{\beta\gamma nFD_i C_i}{b\delta M}\right)\right]\tau. \tag{28}$$

Если член перед τ в (28) обозначить через k, то:

$$\ln\frac{H_0}{H_\tau} = -k\tau,\ H_\tau = H_0 e^{-k\tau}; \tag{29}$$

что указывает на экспоненциальный характер изменения микропрофиля со временем электролиза как в случае положительного, так и отрицательного выравнивания. Этот результат хорошо подтверждается многими экспериментальными данными, касающимися развития шероховатости в случае диффузионных ограничений.

Выводы. Предложенный метод определения параметров микропрофиля позволяет, зная характеристики изношенной детали и пользуясь предложенным алгоритмом проведения расчетов процесса диффузии композиционных частиц в формируемое покрытие, выбрать такие параметры процесса гальванического осаждения, которые бы обеспечили получение восстановленного изделия с заранее заданными физико-механическими показателями.

Список литературы

1. Ваграмян А.Т., Соловьева З.А. «Методы исследования электроосаждения металлов». – М.: Изд. 2-е, АН СССР, 1960. – 448 с.
2. Горбунова К.М., Никифорова А.А. «Физико-химические основы процесса химического никелирования». – М.: Изд. АН СССР, 1960.
3. Каданер Л.И. «Равномерность гальванических покрытий». – Харьков: Изд-во ХГУ, 1961.
4. Шлугер М.А. Ускорение и усовершенствование хромирования деталей машин. – М.: Машгиз, 1961. – 140 с.
5. Евсеев Д.Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке / Д.Г. Евсеев – Саратов, 1975. – 216 с.
6. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н.Н. Малинин – М., 1975. –400 с.
7. Бурова И. Г. Аппроксимация вещественными и комплексными минимальными сплайнами. Учебное пособие / И.Г. Бурова. – М.: Издательство СПбГУ, 2018. – 144 с.
8. Жачкин, С.Ю. Аналитическая оценка свойств дисперсно-упрочненных гальванических композитных многослойных покрытий / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков, А.И. Краснов, К.А. Манаенков // Мичуринск: Вестник МичГАУ, 2015. – № 1. – С. 142–150.

9. Zhachkin,S.Yu. Wear-resistance of composite galvanic chrome coatings /S.Yu. Zhachkin, N.A. Penkov, M.N. Krasnova// Engineering Studies. – 2017. – Vol. 9, is. 3(2). – P. 529–536.
10. Жачкин С.Ю. Холодное гальваноконтактное восстановление деталей // Воронеж: ВГТУ, 2002. – 138 с.
11. Жачкин С.Ю. Нанесение размерных композитных хромовых покрытий методом гальваноконтактного осаждения / С.Ю. Жачкин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – № 7. – С. 44–48.

References

1. Vagramyan A.T., Solov'eva Z.A. «Metody issledovaniya elektroosazhdeniya metallov». – M.: Izd. 2-e, AN SSSR, 1960. – 448 s.

2. Gorbunova K.M., Nikiforova A.A. «Fiziko-himicheskie osnovy processa himicheskogo nikelirovaniya». – M.: Izd. AN SSSR, 1960.

3. Kadaner L.I. «Ravnomernost' gal'vanicheskih pokrytij». – Har'kov: Izd-vo HGU, 1961.

4. SHluger M.A. Uskorenie i usovershenstvovanie hromirovaniya detalej mashin. – M.: Mashgiz, 1961. – 140 s.

5. Evseev D.G. Formirovanie svojstv poverhnostnyh sloev pri abrazivnoj obrabotke / D.G. Evseev – Saratov, 1975. – 216 s.

6. Malinin N.N. Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti / N.N. Malinin – M., 1975. –400 s.

7. Burova I. G. Approksimaciya veshchestvennymi i kompleksnymi minimal'nymi splajnami. Uchebnoe posobie / I.G. Burova. – M.: Izdatel'stvo SPbGU, 2018. – 144 c.

8. ZHachkin, S.YU. Analiticheskaya ocenka svojstv dispersno-uprochnennyh gal'vanicheskih kompozitnyh mnogoslojnyh pokrytij / S.YU. ZHachkin, N.A. Pen'kov, A.I. Krasnov, K.A. Manaenkov // Michurinsk: Vestnik MichGAU, 2015. – № 1. – S. 142–150.

9. Zhachkin,S.Yu. Wear-resistance of composite galvanic chrome coatings /S.Yu. Zhachkin, N.A. Penkov, M.N. Krasnova// Engineering Studies. – 2017. – Vol. 9, is. 3(2). – P. 529–536.

10.ZHachkin S.YU. Holodnoe gal'vanokontaktnoe vosstanovlenie detalej // Voronezh: VGTU, 2002. – 138 s.

11.ZHachkin S.YU. Nanesenie razmernyh kompozitnyh hromovyh pokrytij metodom gal'vanokontaktnogo osazhdeniya / S.YU. ZHachkin // Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya. – 2006. – № 7. – S. 44–48.

Сведения об авторах:
Принадлежность к организации

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

Пеньков Никита Алексеевич –кандидат технических наук, начальник лаборатории ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Россия, г. Воронеж, e-mail: myth_np_nikit@mail.ru.

Невструев Юрий Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер ООО «Аквапаскаль», Россия, г. Воронеж, e-mail: serg24012@mail.ru.

Бирюков Александр Вячеславович – аспирант кафедры АОМП ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Россия, г. Воронеж, e-mail: snikishin24@bk.ru.

ВласовДмитрий Александрович – инструктор практического обучения ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Россия, г. Воронеж, e-mail: myth7np7nikit@gmail.com.

Affiliation

Zhachkin Sergey Yurievich – doctor of technical sciences, professor, Professor of the department of Voronezh State Technical University, Russia, Voronezh, e-mail: zhach@list.ru.

Penkov Nikita Alekseevich – candidate of technical sciences, head of laboratory MERC AF «AFA», Russia, Voronezh, e-mail: myth_np_nikit@mail.ru.

Nevstruev Yury Alekseevich – candidate of technical sciences, docent, lead engineer Aquapascal, Russia, Voronezh, e-mail: serg24012@mail.ru.

Biryukov Alexander Vyacheslavovich – postgraduate student of the department of AEEP of Voronezh State Technical University, Russia, Voronezh, e-mail: snikishin24@bk.ru.

Vlasov Dmitry Alexandrovich – practical training instructor MERC AF «AFA», Russia, Voronezh, e-mail: myth7np7nikit@gmail.com.

Поступила в редакцию (Received): 17.03.2022 Принята к публикации (Accepted): 21.04.2022

УДК 621.899
DOI: 10.35887/2305-2538-2022-2-142-147

ОЧИСТКА СИСТЕМЫ СМАЗКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ТРАКТОРОВ

[1]Кошелев Александр Викторович

[1]ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»

Реферат. *В результате анализа состояния вопроса повышения эффективности использования техники и продления сроков ее службы в предприятиях АПК определено, что отказ от операции промывки системы смазки после замены отработавшего свой срок моторного масла приводит к снижению эксплуатационных характеристик дизельных двигателей тракторов, снижается срок службы свежего заправленного масла. В ходе моделирования процесса промывки масляных каналов установлено, что товарное масло М-10Г$_2$ не в полной мере обеспечивает удаление загрязнений из системы по сравнению со специальными промывочными маслами. Так, в результате предварительных экспериментальных исследований установлено, что при давлении 4 кг/см^2 содержание нерастворимого осадка в масле М-10Г$_2$ снижается на 0,1-0,2%. По мере повышения давления до 8 кг/см^2 эти показатели улучшаются. Одной из задач повышения эффективности промывки системы смазки является снижение затрат на выполнение данной операции. В связи с этим принято решение по использованию отработавшего свой срок моторного масла в качестве промывочного масла. В лабораторных условиях рассмотрена возможность удаления из отработанного масла загрязнения. Для этих целей в нагретое масло вносились коагулянты и проводилась операция по очистке масла в лабораторной центрифуге. После чего проводилась оценка моющих свойств масла М-10Г$_2$, промывочного масла марки «Волга» и очищенного отработанного масла, позволявшая установить достаточно высокие моющие свойства товарного масла и очищенного отработанного моторного масла. Рассмотрена возможность очистки системы смазки отработанным моторным маслом без его слива в картере двигателя. Установлено, что внесение в картер двигателя 2% масс раствора карбамида в гидроксиде аммония позволяет укрупнить частицы загрязнения с последующим их удалением встроенной в систему смазки центрифугой. Толщина слоя осадка на стенках центрифуги за 30 минут работы двигателя на масле с добавками составляла 20 мм, в то время как за период наработки 200 часов равнялось 15 мм. Цвет масла в единицах ЦНТ изменился с 7 до 3,5.*

Ключевые слова: *система смазки, загрязнения, промывка, очистка масла без слива из картера двигателя, толщина слоя осадка.*