

ИЗМЕНЕНИЕ ВЯЗКОСТИ МОТОРНОГО МАСЛА КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ И СВОЙСТВ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА

Валерий Васильевич Остриков¹
Сергей Николаевич Сазонов¹
Дмитрий Николаевич Афоничев²
Вячеслав Геннадиевич Козлов²

¹Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники
и нефтепродуктов в сельском хозяйстве

²Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

В моторном масле при работе двигателей тракторов накапливается значительное количество продуктов окисления, смол, что приводит к увеличению вязкости масла. Проникновение топлива в масло способствует снижению вязкости. В большинстве случаев изменение вязкости масла является следствием высоких нагрузок и неудовлетворительного технического состояния двигателя. Теоретическому описанию процессов изменения вязкости масла в двигателе посвящено большое количество научных работ. При этом часть из них направлена на оценку увеличения вязкости за счет роста загрязненности, часть посвящена анализу и описанию снижения вязкости при разжижении масла топливом из-за неисправностей в топливной системе. В данной работе представлено описание процессов изменения вязкости моторного масла при одновременном накоплении примесей и смешивания масла с дизельным топливом. Для установления зависимостей изменения вязкости масла от присутствующих в нем компонентов составлено уравнение материального баланса работающего масла. Получено выражение для оценки объема дисперсной среды масла. Для определения вязкости дисперсной среды воспользовались известным уравнением Эйнштейна, определяющим коэффициент формы частиц примесей в масле. Рассмотрены граничные условия, когда масло не разбавлено дизельным топливом и когда вместо масла присутствует только дизельное топливо. После математических преобразований получено уравнение изменения вязкости моторного масла с учетом разжижения дизельным топливом и загрязнений. Обобщая результаты теоретического анализа и экспериментальных исследований установили, что изменение вязкости масла в определенной степени характеризует техническое состояние двигателя, а процессы, происходящие в смазочном масле, зависят от качества и свойств моторного масла. При этом очень сложно однозначно определить основополагающие факторы изменения вязкости масла.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: моторное масло, вязкость, примеси, разжижение, окисление, техническое состояние, двигатель.

ENGINE OIL VISCOSITY FLUCTUATIONS AS AN INDICATOR OF TECHNICAL CONDITION OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE AND LUBRICANT PROPERTIES

Valery V. Ostrikov¹
Sergey N. Sazonov¹
Dmitriy N. Afonichev²
Vyacheslav G. Kozlov²

¹All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture

²Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great

A considerable amount of oxidation products and resins accumulates in the engine oil during tractor engines operation, thus increasing engine oil viscosity, whereas fuel penetration into oil reduces the viscosity. In the overwhelming majority of cases engine oil viscosity fluctuations is a consequence of high loads and poor technical condition of the engine. A large number of scientific papers are devoted to the theoretical description of the

processes of oil viscosity fluctuations in the engine: part of them is aimed at assessing the increase in viscosity due to the increase in pollution, whereas the others are devoted to the analysis and description of the decrease in viscosity at oil dilution thinning due to fuel system troubles. The authors present the description of the processes of engine oil viscosity fluctuations at simultaneous accumulation of impurities and oil mixing with diesel fuel; derived an equation of material balance of the operating oil for defining the dependence of engine oil viscosity fluctuations on the composition of oil components; determined an equation for estimating the volume of the dispersed oil medium; for determining the dispersed medium viscosity adapted the widely known Einstein equation specifying oil impurity particles shape coefficient; considered the boundary conditions when the oil was not diluted with diesel fuel and when there was only diesel fuel instead of oil; after certain mathematical transformations derived an equation of engine oil viscosity fluctuations taking into account oil dilution with diesel fuel and the presence of impurities; summarizing the results of theoretical analysis and experimental studies established that engine oil viscosity fluctuations to a certain extent characterized engine technical condition, and the processes occurring in the lubricating oil depended on the quality and properties of the engine oil; placed greater emphasis on the fact that it is very difficult to uniquely determine key aspects of oil viscosity fluctuations.

KEYWORDS: engine oil, viscosity, impurities, dilution, oxidation, technical condition, engine.

Вязкость моторного масла в процессе его работы в двигателе внутреннего сгорания (ДВС) изменяется. Увеличение или уменьшение вязкости является следствием ряда известных причин [1, 5, 9, 10].

Масло под действием высоких температур окисляется в цилиндрах. На темп окисления моторного масла влияет парциальное давление кислорода в газах, прорывающихся в картер. При трении имеют место локальные вспышки в точках контакта микронеровностей. Окисление ускоряется, когда масло находится в распыленном состоянии, соприкасается с горячими газами, проникающими из поршневого пространства, интенсивно окисляется, что увеличивает вязкость масла [11, 12].

Износ цилиндرو-поршневой группы, повышение температуры на деталях могут увеличивать вязкость моторного масла на 5...10%, что ухудшает процесс прокачиваемости и т. д. [7, 8].

Углеводороды, содержащиеся в масле, разлагаются в результате окисления при высокой температуре у верхнего компрессионного кольца на стенке цилиндра, при этом происходит образование легколетучих и тяжелых веществ. Первые сгорают и уходят вместе с выхлопными газами, а вторые возвращаются вместе с маслом в картер и вовлекаются в процесс окисления [4].

Продукты неполного сгорания органической части топлива являются источниками загрязнения масла, а следовательно, и повышения его вязкости. При сгорании топлива неорганические остатки сосредотачиваются в частицах сажи, склонных к агрегации. На количество сажистых частиц, попадающих из рабочего объема цилиндра в масло, влияют такие показатели, как качество смесеобразования, режим работы двигателя и качество применяемого топлива [6].

Дизельное топливо, имеющее утяжеленный фракционный состав, сгорает с образованием большого количества сажистых составляющих.

Большую долю нерастворимого осадка в масле составляют продукты сгорания зольных присадок, присутствующих в моторных маслах, являющихся катализаторами, ускоряющими окисление масла [2].

Качество моторного масла, а именно содержание диспергирующе-стабилизирующих, антиокислительных и вязкостных присадок, играет огромную роль в изменении свойств работающего в двигателе масла.

При высоких нагрузках и температурах происходит активное снижение процентного содержания антиокислительных присадок с образованием в масле практически всех растворенных смол, увеличивающих вязкость масла. При этом также выгорают элементы моюще-диспергирующих присадок, способствующих удержанию мелкодиспергированных частиц во взвешенном состоянии, что провоцирует образование шламов, увеличивающих вязкость масла в картере двигателя [12].

Неисправности в работе топливной системы двигателя ухудшают гидродинамический режим смазки подшипников коленчатого вала, что в конечном результате увеличивает вероятность задиров и интенсифицирует износ поршневых колец из-за снижения вязкости масла.

Чтобы определить зависимость вязкости масла от имеющихся в нем ингредиентов, составим уравнение баланса работающего масла в системе смазки ДВС [3]

$$V_{\text{дс}} = V_{\text{дсс}} + V_{\text{дф}} + V_{\text{до}} - V_{\text{уг}}, \quad (1)$$

где $V_{\text{дс}}$ и $V_{\text{дсс}}$ – объемы соответственно дисперсной и дисперсионной сред, м^3 ;

$V_{\text{дф}}$ – объем дисперсионной фазы, м^3 ;

$V_{\text{до}}$ – количество доливки масла, м^3 ;

$V_{\text{уг}}$ – объем угара масла, м^3 .

В минеральных маслах масляная основа и в некоторых случаях дизельное топливо образуют дисперсионную среду, а поэтому

$$V_{\text{дсс}} = V_{\text{мо}} + V_{\text{т}},$$

где $V_{\text{мо}}$ – объем масляной основы, м^3 ;

$V_{\text{т}}$ – объем дизельного топлива в масле, м^3 .

Объем дисперсной фазы определяется следующими формулами:

$$V_{\text{дф}} = V_{\text{загр}} + V_{\text{прис}} + V_{\text{в}}, \quad (2)$$

$$V_{\text{загр}} = V_{\text{о.н}} + V_{\text{но.н}}, \quad (3)$$

где $V_{\text{загр}}$ – объем загрязняющих примесей, м^3 ;

$V_{\text{прис}}$ – объем присадок, м^3 ;

$V_{\text{в}}$ – объем воды, м^3 ;

$V_{\text{о.н}}$ – объем органических примесей, м^3 ;

$V_{\text{но.н}}$ – объем неорганических примесей, м^3 .

При работе двигателя моторное масло может как «загустаться», так и «разжижаться». Если система питания двигателя исправна, то попадание топлива в моторное масло исключено, а значит $V_{\text{т}} = 0$. Наличие воды в масле $V_{\text{в}}$ не будет превышать нормируемые показатели, когда система охлаждения ДВС функционирует исправно, а масло, долитое для компенсации угара, не обводнено. При неисправной системе охлаждения степень обводненности моторного масла будет повышаться.

Количество доливки масла определяется по формулам:

$$V_{\text{дс.до}} = V_{\text{дсс.до}} + V_{\text{дф.до}}; \quad (4)$$

$$V_{\text{дсс.до}} = V_{\text{мо.до}}; \quad (5)$$

$$V_{\text{дф.до}} = V_{\text{загр.до}} + V_{\text{прис.до}} + V_{\text{в.до}}, \quad (6)$$

где $V_{\text{дс.до}}$ – объем дисперсной среды доливаемого масла, м^3 .

На угар затрачивается количество масла, определяемое зависимостями:

$$V_{\text{дс.уг}} = V_{\text{дсс.уг}} + V_{\text{дф.уг}}, \quad (7)$$

$$V_{\text{дсс.уг}} = V_{\text{мо.уг}} + V_{\text{т.уг}}, \quad (8)$$

$$V_{\text{дф.уг}} = V_{\text{загр.уг}} + V_{\text{прис.уг}} + V_{\text{в.уг}}. \quad (9)$$

Используя уравнение Эйнштейна, можно установить вязкость дисперсной среды

$$v_{\partial c} = v_{\partial cc} \left(1 + \varphi \frac{V_{\partial \phi}}{V_{\partial c}} \right), \quad (10)$$

где $v_{\partial cc}$ – вязкость дисперсионной среды, мм²/с;

φ – коэффициент формы частиц (для асимметричных частиц $\varphi > 2,5$, для сферических частиц $\varphi = 2,5$).

Величина φ определяется по формуле

$$\varphi = \frac{g_{\partial \phi} (1 + \rho_{\partial \phi} M_{\partial \phi})}{\frac{\rho_{\partial \phi}}{\rho_{\partial cc}} - g_{\partial \phi} \left(\frac{\rho_{\partial \phi}}{\rho_{\partial cc}} - 1 \right)}, \quad (11)$$

где $g_{\partial \phi}$ – массовая доля дисперсной фазы;

$\rho_{\partial \phi}$, $\rho_{\partial cc}$ – плотности соответственно дисперсной фазы и дисперсионной среды;

$M_{\partial \phi}$ – маслосодержание дисперсной фазы.

Наличие воды в моторном масле способствует более интенсивному снижению качества последнего при эксплуатации двигателя [3]. Авторами не ставится задача математического моделирования влияния воды на свойства масла, поэтому допускаем, что уровень его обводненности находится в допустимых пределах. Примем, что отсутствует разжижение моторного масла дизельным топливом, тогда вязкость масла определяется зависимостью

$$v_{\partial c} = v_{mo} \left(1 + \varphi \frac{V_{npuc} + V_{zap}}{V_{\partial c}} \right). \quad (12)$$

Экспериментально установлено, что изменение вязкости моторного масла при разжижении его дизельным топливом будет происходить по зависимости, показанной на рисунке 1 [3].

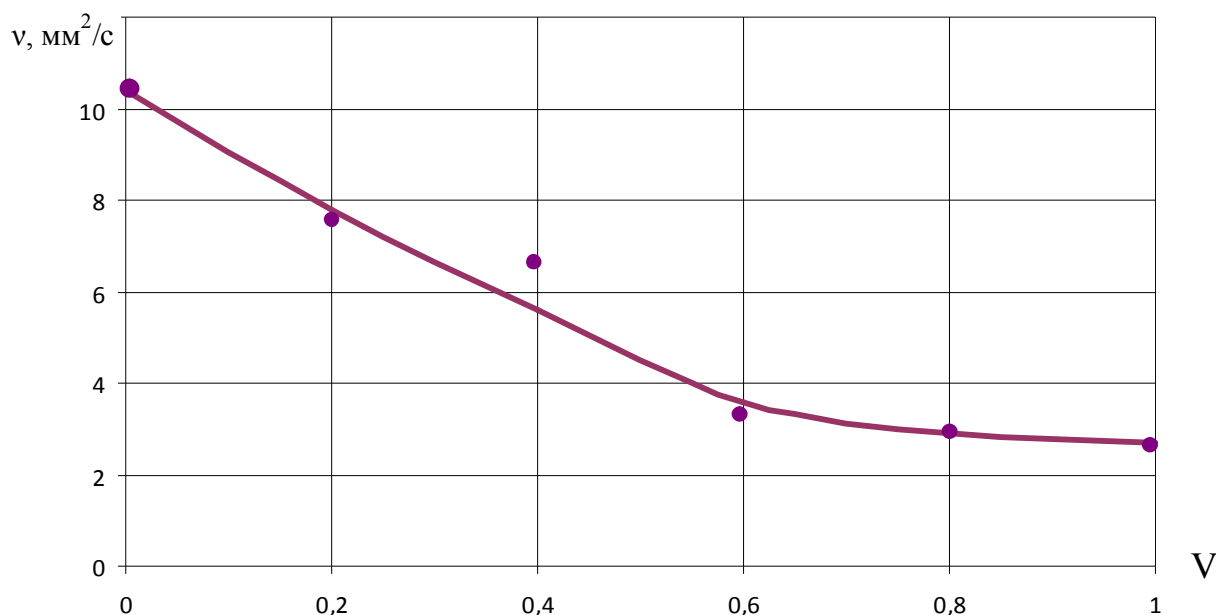


Рис. 1. Зависимость изменения вязкости моторного масла М-10Г_{2к} от концентрации дизельного топлива

Графическая зависимость, приведенная на рисунке 1, аппроксимируется квадратичной функцией вида

$$v = AV^2 + BV + C, \quad (13)$$

где V – доля дизельного топлива в смеси (по массе), $0 \leq V \leq 1$;

A, B, C – постоянные коэффициенты.

Рассмотрим два случая:

- 1) $V = 0$, моторное масло не разбавлено дизельным топливом;
- 2) $V = 1$, дизельное топливо заменяет масло полностью (что на практике не бывает).

При $V = 0$ зависимость (13) упрощается

$$v = C. \quad (14)$$

Обозначим $v_0 = v_m$ (v_m – вязкость масла до разбавления дизельным топливом), тогда $C = v_m$.

При $V = 1$ зависимость (13) примет вид

$$v = A + B + C = A + B + v_m. \quad (15)$$

Обозначим $v_1 = v_{dm}$ (v_{dm} – вязкость дизельного топлива), тогда

$$A = v_{dm} - v_m - B. \quad (16)$$

Коэффициенты уравнения регрессии найдем методом наименьших квадратов

$$\delta = \sum (v_i - AV_i^2 - BV_i - v_m)^2, \quad i = 1, \dots, N. \quad (17)$$

Подставив значение параметра A , определенное зависимостью (16), получим

$$\delta = \sum (v_i - (v_{dm} - v_m - B)V_i^2 - BV_i - v_m)^2. \quad (18)$$

Возьмем частную производную от δ по переменной B

$$\frac{\partial \delta}{\partial B} = 2 \sum (v_i - (v_{dm} - v_m - B)V_i^2 - BV_i - v_m) \cdot \sum (V_i^2 - V_i) = 0. \quad (19)$$

Преобразовав уравнение (19), получим

$$B = \frac{Nv_m - \sum v_i + (v_{dm} - v_m) \cdot \sum V_i^2}{\sum (V_i^2 - V_i)}. \quad (20)$$

$$A = v_{dm} - v_m - \frac{Nv_m - \sum v_i + (v_{dm} - v_m) \cdot \sum V_i^2}{\sum (V_i^2 - V_i)}. \quad (21)$$

Полученные коэффициенты уравнения (13) имеют следующие значения: $A = 7,25$, $B = -14,95$, $C = v_m$.

Приращение вязкости моторного масла при разбавлении дизельным топливом определяется зависимостью

$$\Delta v_i = -(v_0 - v_i). \quad (22)$$

При $V = 0$ $v_0 = C$, тогда выражение (22) после подстановки в него зависимости (13) и преобразования примет вид

$$\Delta v_i = V_i (AV_i + B). \quad (23)$$

Уравнение изменения вязкости моторного масла с учетом разжижения его дизельным топливом, наличием присадок и загрязнений будет иметь вид

$$v_{\partial c} = v_{mo} \left(1 + \frac{\varphi_u V_u}{V_{\partial c}} + \frac{\varphi_{\partial cc} V_{\partial cc}}{V_{\partial c}} + \frac{\varphi_v V_v}{V_{\partial c}} + \frac{\varphi_{an} V_{an}}{V_{\partial c}} + \frac{\varphi_{загр} V_{загр}}{V_{\partial c}} \right) - \Delta v_i, \quad (24)$$

где v_{mo} – вязкость масляной основы, мм²/с;

$\varphi_u, \varphi_{\partial cc}, \varphi_v, \varphi_{an}, \varphi_{загр}$ – коэффициенты формы частиц соответственно присадки-ингибитора окисления, диспергирующе-стабилизирующей присадки, присадки, увеличивающей индекс вязкости, антипенной присадки, загрязняющих примесей;

Δv_i – изменение вязкости моторного масла при разбавлении дизельным топливом, мм²/с;

$V_u, V_{\partial cc}, V_v, V_{an}, V_{загр}$ – количество присадки ингибитора окисления, диспергирующе-стабилизирующей присадки, присадки, увеличивающей индекс вязкости, антипенной присадки, загрязняющих примесей.

Уравнение (24) показывает, что вязкость моторного масла изменяется в зависимости от количества срабатывающихся присадок, загрязняющих примесей, дизельного топлива, причем изменение концентраций примесей может приводить как к повышению, так и снижению вязкости масла.

С целью упрощения расчета вязкости моторного масла введем следующие допущения [3]:

- 1) в товарном масле в начальный момент времени загрязняющие примеси отсутствуют;
- 2) расход диспергирующе-стабилизирующих и антиокислительных присадок влияет на изменение вязкости моторного масла незначительно;
- 3) загрязняющие частицы, поступающие в моторное масло в процессе его работы, имеют шарообразную форму;
- 4) температура масла в циркуляционном контуре не превышает 130°C.

Тогда уравнение (24) примет вид

$$v_{\partial c} = v_{mo} \left(1 + \frac{\varphi_v V_v}{V_{\partial c}} + \frac{\varphi_{загр} V_{загр}}{V_{\partial c}} \right) - \Delta v_i. \quad (25)$$

Полученное уравнение (25) представляет возможность установить значение коэффициента формы частицы для вязкостной присадки (в рассматриваемом нами составе масла присутствует депрессорная присадка в количестве 1%). Учитывая, что загрязняющие примеси и дизельное топливо в товарном масле отсутствуют, то $\frac{\varphi_{загр} V_{загр}}{V_{\partial c}} = 0$

и $\Delta v_i = 0$. С учетом этого уравнение (25) примет вид

$$v_{\partial c} = v_{mo} \left(1 + \frac{\varphi_v V_v}{V_{\partial c}} \right). \quad (26)$$

Преобразовав выражение (26), получим

$$\varphi_v = \left(\frac{v_{\partial c}}{v_{mo}} - 1 \right) \frac{V_{\partial c}}{V_v}. \quad (27)$$

где φ_v и V_v – соответственно коэффициент формы частицы и количество присадки.

По формуле (27) вычислен коэффициент формы частицы: $\varphi_v = 31,25$.

Так как моторное масло с вязкостной присадкой в циркуляционном контуре нагревается не выше 130°C , то термическая деполаризация полимеров полибутадиена или полиметилметакрилата, входящих в присадки ПМА «Д» и КП-20, отсутствует (температура деполимеризации полибутадиена составляет 220°C , а полиметилметакрилата – 300°C), а поэтому падение вязкости масла из-за деполимеризации вязкостной присадки будет происходить незначительно и им можно пренебречь [3]. Тогда характер изменения вязкости с учетом накопления загрязняющих примесей определяется графической зависимостью, показанной на рисунке 2.

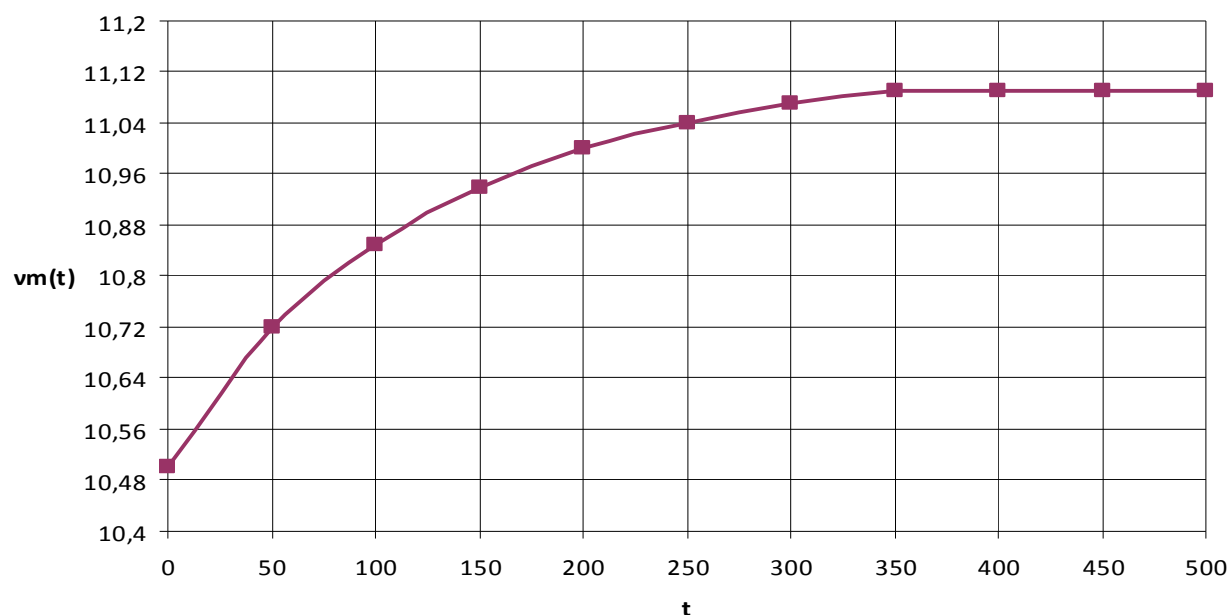


Рис. 2. Характер изменения вязкости работающего моторного масла с учетом накопления загрязняющих примесей

Выводы

Вязкость масла в определенной степени характеризует техническое состояние двигателя внутреннего сгорания, а процессы, происходящие в смазочном масле, во многом зависят от качества используемого масла и присутствия в нем фракций топлива. При этом очень сложно однозначно определить основополагающие факторы изменения вязкости масла. В условиях эксплуатации велика вероятность того, что в технически неисправном двигателе при разжижении масла топливом вязкость начинает понижаться, но присутствующие в работающем масле смолы, сажа увеличивают вязкость масла, доводя ее значение до уровня, соответствующего требованиям эксплуатации. Соответственно, получить объективную информацию возможно, контролируя одновременно изменение вязкости и температуры вспышки масла.

Библиографический список

1. Арабян С.Г. Масла и присадки для тракторных и комбайновых двигателей : справочник / С.Г. Арабян, А.Б. Виппер, И.А. Холомонов. – Москва : Машиностроение, 1984. – 208 с.
2. Балабанов В.И. Триботехнология в техническом сервисе машин. Теория и практика эффективной эксплуатации и ремонта машин / В.И. Балабанов, С.А. Ищенко, В.И. Беклемышев. – Москва : Изумруд, 2005. – 216 с.

3. Белогорский В.В. Повышение эффективности экспресс-методов и средств контроля качества моторных масел : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03 / В.В. Белогорский. – Мичуринск-Наукоград : Мичуринский ГАУ, 2009. – 187 с.
4. Венель С.В. Смазка двигателей внутреннего сгорания / С.В. Венель. – Киев : Машгиз, 1963. – 180 с.
5. Венцель С.М. Применение смазочных масел в двигателях внутреннего сгорания / С.М. Венцель. – Москва : Химия, 1979. – 238 с.
6. Григорьев М.А. Качество моторного масла и надежность двигателей / М.А. Григорьев, Б.М. Бунаков, В.А. Долецкий. – Москва : Издательство стандартов, 1981. – 231 с.
7. Григорьев М.А. Очистка масла в двигателях внутреннего сгорания / М.А. Григорьев. – Москва : Машиностроение, 1983. – 148 с.
8. Гуреев А.А. Химмотология / А.А. Гуреев, И.Г. Фукс, В.Л. Лашхи. – Москва : Химия, 1986. – 368 с.
9. Итинская Н.И. Топлива, масла и технические жидкости : справочник / Н.И. Итинская, Н.А. Кузнецов. – Москва : Агропромиздат, 1989. – 303 с.
10. Теоретическая оценка механохимических процессов на поверхности трения прирабатываемых деталей / В.В. Остриков, С.Н. Сазонов, Д.И. Афанасьев, В.С. Вязинкин, Д.Н. Афоничев // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2018. – Т. 11, № 1(56). – С. 149–154.
11. Топливо, смазочные материалы и технические жидкости : учеб. пособие / В.В. Остриков, А.И. Петрашев, С.Н. Сазонов, В.И. Оробинский, Д.Н. Афоничев, О.И. Поливаев, Е.В. Пухов. – Воронеж : ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2017. – 391 с.
12. Школьников В.М. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости / В.М. Школьников. – Москва : Химия, 1989. – 432 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Валерий Васильевич Остриков – доктор технических наук, зав. лабораторией использования смазочных материалов и отработанных нефтепродуктов ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: viitinlab8@bk.ru.

Сергей Николаевич Сазонов – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории эксплуатационных требований к сельскохозяйственной технике ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: snsazon@mail.ru.

Дмитрий Николаевич Афоничев – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: et@agroeng.vsau.ru.

Вячеслав Геннадиевич Козлов – доктор технических наук, профессор кафедры эксплуатации транспортных и технологических машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: vya-kozlov@yandex.ru.

Дата поступления в редакцию 16.07.2019

Дата принятия к печати 25.08.2019

AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Valery V. Ostrikov, Doctor of Engineering Sciences, Head of the Laboratory of the Use of Lubricants and Waste Oil Products, All-Russian Scientific Research Institute for the Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture, Russia, Tambov, e-mail: viitinlab8@bk.ru.

Sergey N. Sazonov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Chief Scientific Researcher, Laboratory of Operational Requirements for Agricultural Machinery, All-Russian Scientific Research Institute for the Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture, Russia, Tambov, e-mail: snsazon@mail.ru.

Dmitriy N. Afonichev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, tel. 8 (473) 224-39-39 (internal 3320), e-mail: et@agroeng.vsau.ru.

Vyacheslav G. Kozlov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, the Dept. of Transport Vehicles and Production Machines Operation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: vya-kozlov@yandex.ru.

Received July 16, 2019

Accepted August 25, 2019