

Научная статья

УДК 665.32

doi: 10.55170/1997-3225-2024-9-4-55-64

**ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО РАЗМЕРА ЧАСТИЦ ЗАГУЩАЮЩЕЙ ДОБАВКИ
ДЛЯ РАСТИТЕЛЬНОГО СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ РАПСОВОГО МАСЛА****Олег Станиславович Володько¹, Александр Павлович Быченин^{2✉}, Василий Алексеевич Едуков³**^{1,2}Самарский государственный аграрный университет, Самара, Россия³Самарский государственный технический университет, Самара, Россия¹volodko-75@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8478-1358>²bap63@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8896-7547>³tgvt@samgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9208-4410>

Резюме. Цель исследований – теоретически обосновать рациональный размер частиц загущающей добавки (Литол-24) к растительному смазочному материалу (PCM) на основе рапсового масла при формировании смазочной композиции, предназначенной для использования в агрегатах тракторных механических трансмиссий. Существует актуальная научная проблема повышения физико-химических и трибологических свойств PCM, в частности, увеличения его вязкости. Добиться этого эффекта возможно применением специальных загущающих добавок, например, Литол-24. В статье приведен анализ процессов осаждения частиц загущающей добавки в гравитационном поле и при работе агрегатов тракторной трансмиссии. Предложены теоретические зависимости для определения рационального размера частиц загущающей добавки в статическом режиме из условия длительного (до 6 месяцев) хранения сельскохозяйственной техники, а также в динамическом режиме из условия витания частицы в объеме PCM. Проанализировано влияние конструктивных особенностей агрегатов трансмиссии распространенных в сельскохозяйственном производстве моделей тракторов на процесс осаждения частиц загущающей добавки в статическом и динамическом режиме, даны рекомендации по определению размера частиц с учетом этого параметра. С учетом ограничивающих факторов расчетным методом определен рациональный размер частиц загущающей добавки, исключающий их быстрое осаждение как при хранении, так и в процессе выполнения транспортных и полевых работ. Рациональным признан размер частиц добавки в диапазоне $1,08 \cdot 10^{-6} \dots 1,2 \cdot 10^{-6}$ м.

Ключевые слова: растительный смазочный материал, загущающая добавка, режим, статический, динамический, осаждение, витание, размер.

Для цитирования: Володько О. С., Быченин А. П., Едуков В. А. Обоснование рационального размера частиц загущающей добавки Литол-24 для растительного смазочного материала на основе рапсового масла // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. Т. 9, № 4. С. 55-64. doi: 10.55170/1997-3225-2024-9-4-55-64

Original article

**JUSTIFICATION OF RATIONAL PARTICLE SIZE OF THICKENING ADDITIVE FOR
VEGETABLE LUBRICANT BASED ON RAPESEED OIL****Oleg S. Volodko¹, Alexander P. Bychenin^{2✉}, Vasily A. Edukov³**^{1,2}Samara State Agrarian University, Samara, Russia³Samara State Technical University, Samara, Russia¹volodko-75@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8478-1358>²bap63@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8896-7547>³tgvt@samgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9208-4410>

Abstracts. The aim of the research is to theoretically substantiate the rational particle size of the thickening additive (Litol-24) to the vegetable lubricant based on rapeseed oil when forming a lubricant composition intended for use in tractor mechanical transmission units. There is an urgent scientific problem of increasing the physicochemical and tribological properties of plant lubricant, in particular, increasing its viscosity. This effect can be achieved by using special thickening additives, for example, Litol-24. The article provides an analysis of the processes of precipitation of thickening additive particles in the gravitational field and during the operation of tractor transmission units. Theoretical dependences for determination of rational particle size of thickening additive in static mode from the condition of long-term (up to 6 months) storage of agricultural machinery, as well as in dynamic mode from the condition of particle hovering in the volume of RSM are offered. The influence of design features of transmission units of tractor models widespread in agricultural production on the process of thickening additive particles deposition in static and dynamic mode is analyzed, recommendations on determination of particle size taking into account this parameter are given. Taking into account the limiting factors, the rational particle size of the thickening additive was determined by the calculation method, excluding their rapid deposition both during storage and during transportation and field work. The particle size of the additive in the range of $1.08 \cdot 10^{-6} \dots 1.2 \cdot 10^{-6}$ m was recognized as rational.

Keywords: vegetable lubricant, thickening additive, mode, static, dynamic, precipitation, swirling, size.

For citation: Volodko, O. S., Bychenin, A. P. & Edukov, V. A. (2024). Justification of rational particle size of thickening additive for Vegetable lubricant based on rapeseed oil. *Izvestiia Samarskoi gosudarstvennoi selskokhoziaistvennoi akademii (Bulletin Samara State Agricultural Academy)*, 9, 4. 55-64. doi: 10.55170/1997-3225-2024-9-4-55-64 (in Russ).

В настоящее время не теряет актуальности проблема экономии топливо-смазочных материалов (ТСМ) нефтяного происхождения, в том числе путем их частичной замены на альтернативные ТСМ [1-5], а также снижения вредного воздействия ТСМ на окружающую среду при утечках из смазочных и гидравлических систем [6-8]. В отличие от ТСМ нефтяного происхождения, смазочные композиции на основе растительного сырья (рапсового масла) обладают полной биоразлагаемостью за короткое время [9]. Однако такие смазочные композиции требуют применения пакетов присадок различного действия – загущающих, антиокислительных, противоизносных, противозадирных – так как физико-химические и трибологические свойства растительных масел не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к смазочным маслам. Одним из ключевых свойств смазочного материала, в том числе и альтернативного, является кинематическая вязкость. У рапсового масла она недостаточная, следовательно, при его использовании в качестве основы смазочной композиции необходимо повысить вязкостные свойства, например, легированием частицами загущающей добавки (Литол-24) [10, 11].

Цель исследований: теоретически обосновать рациональный размер частиц загущающей добавки к растительному смазочному материалу (PCM) при формировании смазочной композиции для использования в тракторных механических трансмиссиях.

Задачи исследований: проанализировать процесс осаждения частиц загущающей добавки в гравитационном поле PCM в статическом режиме; проанализировать движение частиц загущающей добавки в объеме PCM в динамическом режиме при работе агрегатов трансмиссии; проанализировать движение частиц загущающей добавки в PCM с учетом конструктивных особенностей агрегатов трансмиссии распространенных в сельском хозяйстве моделей тракторов; определить рациональный размер частиц загущающей добавки в составе PCM при формировании смазочной композиции для использования в тракторных механических трансмиссиях.

Материал и методы исследований. Для решения первой задачи был проведен теоретический анализ процесса осаждения частиц загущающей добавки в гравитационном поле PCM в статическом режиме. Растительный смазочный материал на основе рапсового масла предполагает наличие в составе растворенной загущающей добавки, в качестве которой использован Литол-24. Так как плотность частиц добавки больше, чем плотность растительного смазочного материала, то возможно их осаждение – естественный процесс, который имеет место как при функционировании трансмиссии энергетического средства при выполнении транспортных и полевых работ (динамический режим), так и при достаточно длительном его хранении в межсезонье (статический режим). Рассмотрим процесс осаждения частиц под действием гравитационных сил в состоянии покоя PCM с учетом следующих ограничений: частица имеет шарообразную форму с некоторым радиусом r_i ; осаждение происходит с некоторой средней скоростью U_{oc} ; на частицу действуют сила тяжести, Архимедова сила и сила Стокса (рис. 1).

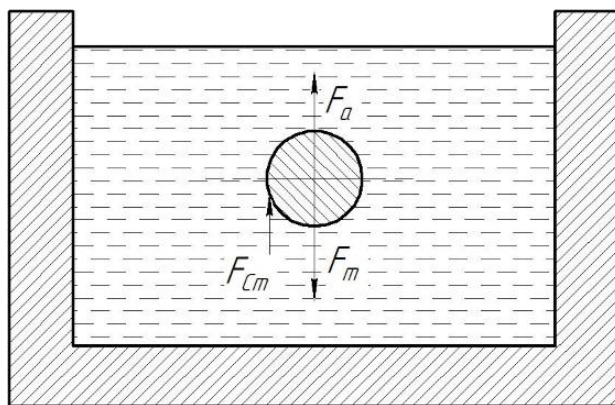


Рис. 1. Силы, действующие на частицу загущающей добавки в состоянии покоя:

F_m – сила тяжести, Н; F_a – выталкивающая сила, действующая со стороны PCM на частицу (Архимедова сила), Н;
 F_{cm} – сила сопротивления осаждению частицы (сила Стокса), Н

Условие осаждения частицы, принятой в качестве анализируемого элемента, в объеме РСМ выражается неравенством [10]:

$$F_m > F_a + F_{Cm} \quad (1)$$

При этом

$$F_a = V_q' g \rho_m; F_{Cm} = 6\pi r_q U_{oc} \mu, \quad (2)$$

где m_q – масса анализируемого элемента, кг;

g – гравитационная постоянная, м/с²;

V_q' – объем анализируемого элемента, м³;

U_{oc} – скорость осаждения анализируемого элемента в применяемой среде, м/с;

μ – коэффициент динамической вязкости применяемой среды, кг/(м·с²).

$$m_q = V_q' \rho_q = \frac{4}{3} \pi r_q^3 \rho_q, \text{ кг}; \quad (3)$$

$$\mu = \nu_m \cdot \rho_m \cdot 10^{-6}, \text{ кг/(м·с}^2\text{)}, \quad (4)$$

где ρ_q, ρ_m – плотности анализируемого элемента и применяемой среды, кг/м³;

ν_m – кинематическая вязкость применяемой среды, мм²/с.

С учетом зависимостей (2), (3) и (4) выражение (1) приобретает следующий вид:

$$\frac{4}{3} \pi r_q^3 \rho_q g > \frac{4}{3} \pi r_q^3 g \rho_m + 6\pi r_q U_{oc} \mu. \quad (5)$$

Из выражения (5) выводим граничное условие для скорости осаждения:

$$U_{oc} < \frac{2r_q^2 g (\rho_q - \rho_m)}{9\nu_m \rho_m}. \quad (6)$$

Очевидно, что на скорость осаждения частиц также влияет их долевое содержание в РСМ (N_q), т.е.

$$U_{oc} < \frac{2r_q^2 g (\rho_q - \rho_m) N_q}{9\nu_m \rho_m}. \quad (7)$$

Из выражения (7) находим рациональный радиус частицы r_q при осаждении:

$$r_q^{oc} < 3 \sqrt{\frac{\nu_m U_{oc} \rho_m}{2g N_q (\rho_q - \rho_m)}}. \quad (8)$$

Время осаждения частицы с рациональным радиусом r_q можно определить по выражению:

$$\tau_{oc} = \frac{H_m}{U_{oc}}, \quad (9)$$

где H_m – высота слоя масла, м.

Подставив неравенство (7) в выражение (9), получим:

$$\tau_{oc} < \frac{9H_m \nu_m \rho_m}{2r_q^2 g N_q (\rho_q - \rho_m)} \quad (10)$$

Неравенство (10) справедливо для условия теплового равновесия РСМ с окружающей средой, т. е. когда температура РСМ и окружающей среды равны. Это возможно, например, при длительном хранении РСМ с поддерживаемой одинаковой температурой в течение всего времени.

Таким образом, факторами, влияющими на скорость осаждения частиц добавки Литол-24, являются температура при хранении, которая соответствует температуре отапливаемого помещения, то есть не достигает рабочих значений, и теплообменные свойства добавки и РСМ. При условии отсутствия теплообмена РСМ с окружающей средой скорость и время осаждения частиц определяется по формулам (7) и (10) (условие длительного хранения) [10].

Для решения второй задачи проанализировано движение частиц загущающей добавки в объеме РСМ в динамическом режиме при работе агрегатов трансмиссии. В процессе работы агрегатов трансмиссии на частицу, находящуюся в РСМ, действуют силы, по своим величинам большие, чем при хранении. В связи с этим перемещение слоев РСМ и движение частиц загущающей присадки (Литол-24) характеризуется большей интенсивностью. Рассмотрим процесс осаждения частиц загущающей присадки при работе РСМ в смазочной системе агрегатов трансмиссии (например, в коробке передач). Примем следующие ограничения (рис. 2): в начале процесса частицы равномерно распределены по всему объему РСМ; при вращении зубчатых колес происходит перемещение слоев РСМ с образованием в объеме коробки передач девяти характерных зон [10, 11].

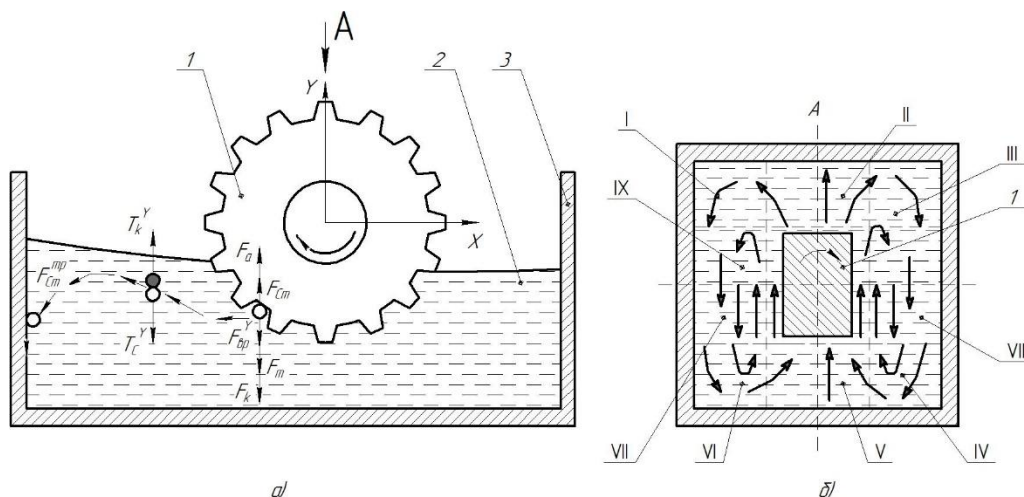


Рис. 2. Схема перемещений РСМ в объеме коробки передач:

а) силы, действующие на частицу в процессе работы; б) схема зон движения РСМ;
1 – шестерня, 2 – РСМ; 3 – корпус редуктора, I-IX – характерные зоны движения РСМ

Анализ принципиальной схемы (рис. 2) показывает, что в зонах I, III, IV и VI существует вероятность накопления загущающей добавки в углах корпусных деталей трансмиссии. Для зоны II характерен повышенный уровень РСМ в связи с его перемещением внутри корпусной детали под воздействием вращающейся шестерни 1. В зоне V уровень РСМ ниже, чем в зоне II, так как из этой области осуществляется забор РСМ шестерней. Для зон VII и VIII характерно вихревое движение РСМ вследствие воздействия на него шестерни, а также заданной конфигурацией корпусной детали траектории. В зоне IX осуществляется захват и направление РСМ зубьями шестерни для смазывания других элементов коробки передач.

Допустим, что вращающимся зубчатым колесом из зоны V забирается некоторый объем РСМ dV_5 и подается в зону II. Тогда при прохождении зон VII и VIII возникают завихрения, где скапливаются объемы РСМ dV_7 и dV_8 ($dV_7 = dV_8$), т. е.

$$dV_2 = dV_5 - \left(\frac{dV_7 + dV_8}{2} \right) - dV_9 \quad (11)$$

Далее РСМ отражается от стенки коробки передач, меняет направление и ударяется в углы коробки передач в зонах I и III, т. е.

$$dV_3 = dV_1 = \frac{dV_2}{2}. \quad (12)$$

Затем РСМ завихряется в зонах VII и VIII и движется в зоны IV и VI, т. е.

$$dV_4 = dV_6 = dV_3 - \frac{dV_7}{2}. \quad (13)$$

Перемещаясь далее, РСМ подвергается воздействию шестерни и попадает сначала в зону V, а затем в зону II:

$$dV_5' = dV_6 + dV_4 = dV_5 - 2dV_7 - dV_9. \quad (14)$$

Из приведенных выше соотношений следует, что при функционировании коробки передач объемы РСМ в различных зонах изменяются со временем. На частицу в общем случае будут действовать объемные и поверхностные силы, представленные на схеме (рис. 3).

Ввиду малости значений сил F_K , F_{mp}^{cm} , T_K и T_C по сравнению с другими силами, ими можно пренебречь. Равнодействующая сил инерции $F_{\Sigma u}$ определяется такими параметрами, как скорость движения энергетического средства, его вибрации при выполнении технологической операции, характеристик опорной поверхности и т.д. Поэтому данный показатель имеет случайный характер и может быть приравнен к нулю для упрощения методики расчета.

Условие витания анализируемого элемента в РСМ при функционировании агрегата трансмиссии на примере коробки передач примет следующий вид [11]:

$$F_a + F_{Cm} - F_m - F_{ep} = 0. \quad (15)$$

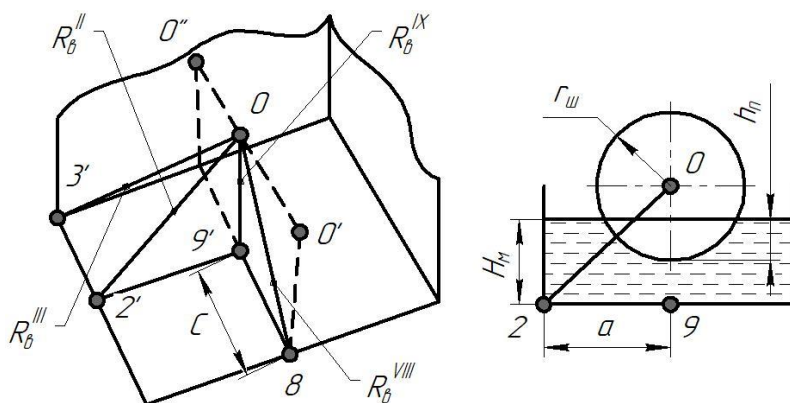


Рис. 3. Схема определения конструктивных размеров коробки передач, влияющих на процесс осаждения загущающих частиц в РСМ:

О – центр вращения шестерни; а, с – конструктивные размеры коробки передач; h_n – глубина погружения шестерни в РСМ; H_m – высота слоя РСМ в коробке передач; $O'O''$ – ось вращения вала шестерни; F_m – сила тяжести, Н; F_{ep} – центробежная сила инерции, направленная от оси вращения, Н; F_K – Кориолисова сила, Н; $F_{\Sigma u}$ – равнодействующая от действия сил инерции (в том числе включает силу от вибрации трактора при работе двигателя), Н; F_a – выталкивающая сила (Архимедова), Н; F_{Cm} – сила сопротивления движению частиц в масле, Н; F_{mp}^{cm} – сила трения о металлические стенки коробки передач, Н; T_K и T_C – силы трения качения и скольжения о твердые частицы осаждения (например, абразивные примеси), Н

Составляющие уравнения определяются следующими зависимостями:

$$F_a = \frac{4}{3} \pi r_q^3 \rho_m; F_{Cm} = C_x \rho_m \frac{v_m^2}{2} S_q; F_m = \frac{4}{3} \pi r_q^3 \rho_q g; F_{ep} = m_q \cdot a_{ep} = m_q \cdot \frac{v_{ep}^2}{2} = \frac{4}{3} \pi r_q^3 \rho_q \omega^2 R_g, \quad (16)$$

где C_x – безразмерный эмпирический коэффициент сопротивления (зависит от числа Рейнольдса);

v_m – скорость движения растительного смазочного материала, м/с;

S_q – характерная площадь частицы (для шара $S_q = \pi r_q^2$), м²;

a_{ep} – ускорение вращения частицы, м/с²;

v_{ep} – скорость вращения частицы, м/с;

ω – угловая скорость вращения зубчатого колеса, с⁻¹;

R_g – радиус вращения для частиц, м.

Скорость движения масла определится из уравнения:

$$v_m = U_{oc} \frac{\omega^2 r_q}{g}. \quad (17)$$

Подставив уравнения (16) и (17) в уравнение (15), получим:

$$\frac{4}{3} \pi r_q^3 g \rho_m + C_x \rho_m \frac{v_m^2}{2} \pi r_q^2 - \frac{4}{3} \pi r_q^3 \rho_q g - \frac{4}{3} \pi r_q^3 \rho_q \omega^2 R_g = 0. \quad (18)$$

Путем математических преобразований получим:

$$v_m = 2 \sqrt{\frac{2 r_q (g \cdot \Delta \rho + \omega^2 \rho_q R_g)}{3 C_x \rho_m}}; \quad (19)$$

$$r_q = \frac{8 g^2 (g \cdot \Delta \rho + \omega^2 \rho_q R_g)}{3 C_x \rho_m U_{oc}^2 \omega^4}, \quad (20)$$

где $\Delta \rho = \rho_q - \rho_m$ – разность плотностей материала частицы добавки и растительного смазочного материала, кг/м³.

Если подставить формулу (7) в уравнение (20), получим:

$$r_q < \sqrt[5]{\frac{54 v_m^2 \rho_m (g \cdot \Delta \rho + \omega^2 \rho_q R_g)}{C_x \omega^4 N_q^2 \Delta \rho^2}}. \quad (21)$$

Коэффициент C_x в свою очередь зависит от числа Рейнольдса Re :

$$C_x = \frac{d}{Re^m}, \quad (22)$$

где d и m – величины, определяемые опытным путем.

При функционировании энергетического средства в агрегатах трансмиссии от вращающихся шестерен возникает турбулентный режим движения РСМ, характеризующийся значениями числа Рейнольдса в пределах 1000...200000 (таблица 1).

Таблица 1

Зависимость числа Рейнольдса от режима движения масла

Число Рейнольдса Re	Значения величин		Режим движения масла
	d	m	
0...1	24	1	ламинарный
1...50	25	3/4	ламинарный
50...1000	4	3/10	переходный
1000...200000	0,45	0	турбулентный

С учетом данных таблицы 1 запишем:

$$C_x = \frac{0,45}{Re^0} = 0,45. \quad (23)$$

Подставив значение (23) в выражение (21), получим:

$$r_q < 3 \cdot \sqrt[5]{\frac{15\nu_m^2 \rho_m (g \cdot \Delta\rho + \omega^2 \rho_q R_g)}{4\omega^4 N_q^2 \Delta\rho^2}}. \quad (24)$$

По результатам теоретического анализа можно заключить, что $\nu_m = f_1(r_q, \rho_q, \rho_m, \omega, R_g)$, $r_q = f_2(\nu_m, \omega, \rho_q, \rho_m, R_g, N_q)$, т.е. ν_m и r_q , определяются главным образом физико-химическими свойствами анализируемых элементов и среды в виде РСМ, а также рабочими режимами и конструктивными особенностями агрегатов трансмиссии энергетического средства.

Анализ рисунка 3 позволяет заключить, что линейный размер анализируемого элемента (радиус частиц r_q) стремится к максимальным значениям в точках 2', 3', 8' и 9', расположенных в характерных зонах II, III, VIII и IX.

Для этих зон соответственно имеем:

$$R_g^{IX} = H_m + r_{uu} - h_n = b, \quad r_q^{IX} < 3 \cdot \sqrt[5]{\frac{15\nu_m^2 \rho_m (g \cdot \Delta\rho + \omega^2 \rho_q b)}{4\omega^4 N_q^2 \Delta\rho^2}}; \quad (25)$$

$$R_g^{VIII} = \sqrt{b^2 + c^2}, \quad r_q^{VIII} < 3 \cdot \sqrt[5]{\frac{15\nu_m^2 \rho_m (g \cdot \Delta\rho + \omega^2 \rho_q \sqrt{b^2 + c^2})}{4\omega^4 N_q^2 \Delta\rho^2}}; \quad (26)$$

$$R_g^{II} = \sqrt{b^2 + a^2}, \quad r_q^{II} < 3 \cdot \sqrt[5]{\frac{15\nu_m^2 \rho_m (g \cdot \Delta\rho + \omega^2 \rho_q \sqrt{b^2 + a^2})}{4\omega^4 N_q^2 \Delta\rho^2}}; \quad (27)$$

$$R_g^{III} = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}, \quad r_q^{III} < 3 \cdot \sqrt[5]{\frac{15\nu_m^2 \rho_m (g \cdot \Delta\rho + \omega^2 \rho_q \sqrt{a^2 + b^2 + c^2})}{4\omega^4 N_q^2 \Delta\rho^2}}. \quad (28)$$

При сравнении значений радиусов частиц r_q для разных зон, видно, что $r_q^{IX} < r_q^{VIII}$, $r_q^{VIII} < r_q^{III}$, $r_q^{II} < r_q^{III}$, $r_q^{IX} < r_q^{II}$. Таким образом, во время функционирования агрегатов трансмиссии на частицу загущающей присадки, находящуюся в движении, с увеличением расстояния турбулентные слои РСМ оказывают большее воздействие. В частности, при комплексном воздействии на РСМ нескольких шестерен одновременно. Как следствие, размер анализируемых элементов в состоянии витания также увеличивается.

Таким образом, для того, чтобы частица в масле во время работы находилась в процессе витания, необходимо, чтобы ее размер был $r_q^{eum} \leq r_q^{IX}$, т.е.:

$$r_q^{eum} < 3 \cdot \sqrt[5]{\frac{15 \nu_m^2 \rho_m (g \cdot \Delta \rho + \omega^2 \rho_q b)}{4 \omega^4 N_q^2 \Delta \rho^2}}. \quad (29)$$

В наиболее распространенных марках сельскохозяйственных тракторов агрегаты трансмиссии (коробка передач, задний мост) оборудованы объединенными масляными емкостями в виде ванн. Соответственно, угловая скорость зубчатых зацеплений главных передач меньше, чем зубчатых зацеплений коробок передач. Таким образом, из-за конструкции коробки передач и задних мостов, размер частиц добавки Литол-24, находящихся в процессе витания, следует определять для условий коробки передач по выражению (29) [10].

Для решения третьей задачи был проведен анализ процесса движения частиц загущающей добавки в РСМ в статическом и динамическом режимах с учетом конструктивных особенностей агрегатов трансмиссии распространенных в сельском хозяйстве моделей тракторов. Сельскохозяйственные тракторы длительное время могут находиться на хранении (3...6 месяцев в осенне-зимний период) при колебании температуры в пределах +20...-20 °C и ниже. В условиях минусовых температур изменяются физические свойства РСМ, такие как кинематическая вязкость и плотность, результатом чего является увеличение длительности процесса осаждения элементов загущающей присадки (зависимость 9). В связи с этим при выявлении оптимального размера исследуемых частиц загущающей присадки в случае длительного хранения техники r_q^{oc} возникает необходимость учета температуры окружающей среды +20 °C, а также длительность пребывания техники на хранении. Рассчитаем линейные характеристики частиц загущающей присадки (формула 10) для статического режима в режиме хранения РСМ, а также определим эти же параметры для частиц загущающей присадки в динамическом режиме при работе механической коробки передач распространенных моделей тракторов в зависимости от их конструктивных особенностей.

В рамках решения четвертой задачи по результатам теоретических исследований предлагается считать рациональным размером частиц добавок к РСМ, удовлетворяющим конструктивным особенностям коробок передач распространенных тракторов и условию хранения РСМ в течение 6 месяцев при температуре окружающего воздуха +20 °C, $r_q^{pac} = r_q^{eum} (1,08...1,2) \cdot 10^{-6}$ м.

Результаты исследований. При условии отсутствия теплообмена РСМ с окружающей средой скорость и время осаждения частиц определяется по формулам (7) и (10) (условие длительного хранения). Из-за конструкции коробки передач и задних мостов размер частиц добавки Литол-24, находящихся в процессе витания, следует определять для условий коробки передач по выражению (29). Результаты расчета линейных характеристик частиц загущающей присадки для статического режима в режиме хранения РСМ представлены в таблице 2. Результаты расчета этих же параметров для частиц загущающей присадки в динамическом режиме при работе механической коробки передач распространенных моделей тракторов в зависимости от их конструктивных особенностей представлены в таблице 3 [10].

Таблица 2

Размер частиц добавок при условии хранения растительного смазочного материала

Значения показателей	Марка трактора			
	ДТ-75	Т-402-01	BELARUS 80.1/82.3	ЛТЗ-60
Высота слоя масла, $H_m, \cdot 10^{-3}$ м	110	110	120	100
Отношение объема масла к площади масляной ванны, $10^{-4} \text{ м}^3 / \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$	9,9/9	7,5/6,8	14,4/12	6/6
Размер неосевших частиц, $r_q^{oc}, \cdot 10^{-6}$ м, менее	2,96	2,96	3,09	2,82

Таблица 3

Размер частиц добавок при условии работы растительного смазочного материала

Значения показателей	Марка трактора			
	ДТ-75	T-402-01	BELARUS 80.1/82.3	ЛТЗ-60
Конструктивный размер b , 10^{-3} м	139	126	144	104
Угловая скорость вращения, ω , c^{-1}	184,1	179	235,1	187,3
Размер частиц, $r_{q^{sum}}$, $\cdot 10^{-6}$ м, менее	1,179	1,171	1,079	1,109

В идентичных условиях в процессе хранения со временем частицы, не осевшие полностью на дно корпуса агрегата трансмиссии в течение полугода, увеличиваются в размерах. Наряду с этим в РСМ во взвешенном состоянии останутся лишь частицы загущающей присадки, уступающие в размерах осевшим на дно (таблица 2). Из представленных данных видно, что РСМ в тракторах с большей высотой слоя H_m обладает после хранения лучшими триботехническими свойствами, чем в тракторах с меньшей высотой слоя H_m .

Из таблицы 3 видно, что на размер частиц, подвергающихся динамическому воздействию с переходом в режим витания, наиболее значительно влияет угловая скорость пары шестерен. Заданный конструктивно линейный параметр b при этом оказывает крайне незначительное влияние. Объяснить это явление можно тем, что на витающую в толще РСМ частицу загущающей присадки сильнее влияют силы, возникающие при вращении зубчатых пар (параметр ω), чем гравитационное поле (параметр b).

Анализ таблиц 2 и 3 показывает, что $r_{q^{oc}} > r_{q^{sum}}$. Линейный параметр неосевших частиц загущающей присадки $r_{q^{oc}}$ изменяется в широком диапазоне, коррелируя с моделью энергетического средства, и не удовлетворяет условию работы РСМ. В то же время линейный параметр витающих частиц загущающей присадки $r_{q^{sum}}$ удовлетворяет сразу двум условиям: работы РСМ в агрегатах трансмиссии энергетических средств сельскохозяйственного назначения и хранения этих же энергетических средств. Следовательно, рациональный линейный параметр частиц загущающей присадки можно обосновать, исходя из выражения (24). Рациональный размер частиц добавок к РСМ $r_{q^{pac}} = r_{q^{sum}} (1,08...1,2) \cdot 10^{-6}$ м.

Заключение. Таким образом, можно заключить, что при формировании РСМ на основе рапсового масла для увеличения вязкости в состав смазочной композиции рационально ввести добавку Литол-24. Так как Литол-24 имеет плотность больше, чем плотность растительного смазочного материала, то происходит его осаждение с течением времени. Теоретически определенный размер частиц добавки должен удовлетворять не только условию хранения РСМ (до 6 месяцев включительно), но и условию его работы в агрегатах трансмиссии, когда на частицу действуют большие по значению силы, чем гравитационное поле. В результате экспериментальных исследований триботехнических свойств растительного смазочного материала необходимо экспериментально подтвердить полученный аналитическими расчетами рациональный размер частиц добавки, равный $r_{q^{pac}} = (1,08...1,2) \cdot 10^{-6}$ м. Триботехнические свойства РСМ можно в дальнейшем улучшить путем обработки ультразвуковым и комплексным излучением (лазерным, инфракрасным излучением и магнитным полем) за счет усиления метаболических реакций в РСМ и увеличения эффекта от их совместного использования.

Список источников

1. Болдашев Г. И., Быченин А. П., Володько О. С. Использование альтернативных топливно-смазочных материалов в автотракторной технике : монография. Кинель : РИО СГСХА, 2017. 169 с.
2. Бухвалов А. С., Быченин А. П., Володько О. С. Повышение ресурса ходовой системы гусеничных машин : монография. Кинель : РИО Самарского ГАУ, 2021. – 157 с.
3. Приказчиков М. С. Повышение ресурса гидроподжимных муфт коробок передач с гидроуправлением улучшением режима трения фрикционных дисков : дисс. ... канд. техн. наук. Пенза, 2013. 197 с.
4. Уханов А. П., Володько О. С., Быченин А. П., Ерзамаев М. П. Показатели физико-химических, теплотворных, трибологических свойств масла крамбе абиссинской и дизельного смесового топлива // Нива Поволжья. 2018. №2(47). С. 141-148.
5. Володько О. С., Быченин А. П., Родкин И. С. Сравнительная оценка физико-химических и трибологических свойств минерального и рапсового масла // Самара Агровектор. 2024. №2. С. 5-11.
6. Ефимов В. В. Обеспечение эксплуатационной надежности гидросистем сельскохозяйственной техники при альтернативном использовании рапсового масла в качестве рабочей жидкости : дисс. ... канд. техн. наук. Саранск, 2000. 218 с.
7. Сергатенко С. Н., Федорова И. Л., Игнатова Т. Д. Влияние нефтяного загрязнения на активность почвенных ферментов классов оксидоредуктаз и гидролаз // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. №3(59). С. 83-88.

8. Едуков Д. А. Снижение скорости изнашивания зубчатых передач тракторных трансмиссий применением магнитогидродинамической обработки растительно-минерального смазочного материала : дисс. ... канд. техн. наук. Пенза, 2009. 252 с.
9. Жорник В. И., Ивахник А. В., Запольский А. В. Современные тенденции в создании экологически безопасных биоразлагаемых смазочных материалов // Актуальные вопросы машиноведения. 2023. Т. 12. С. 313-319.
10. Едуков В. А. Снижение энергетических затрат в тракторных трансмиссиях путем использования легированного рапсового масла : дисс. ... канд. техн. наук. Пенза, 2003. 224 с.
11. Ленивец Г. А., Едуков В. А. Теоретическое определение оптимальных размеров частиц добавок, находящихся в процессе витания в масле // Современные технологии, средства механизации и техническое обслуживание в АПК : сборник научных трудов Поволжской межвузовской конференции. 2003. С. 135-139.

References

1. Boldashev, G. I., Bychenin, A. P. & Volodko, O. S. (2017) Use of alternative fuel and lubricants in automotive equipment. Kinel : RIO SSAA (in Russ).
2. Bukhvalov, A. S., Bychenin, A. P. & Volodko, O. S. (2021) Increasing the resource of the running system of tracked vehicles. Kinel: RIO SSAU (in Russ).
3. Prikazchikov, M. S. (2013) Increasing the resource of hydraulic clutches of gearboxes with hydro-control improving the friction mode of friction discs. *Candidate's thesis*. Penza. 197 p. (in Russ).
4. Ukhanov, A. P., Volodko, O. S., Bychenin, A. P. & Yezamaev, M. P. (2018) Indicators of physicochemical, calorific, tribological properties of crambe oil of Abyssinian and diesel mixed fuel. *Niva Volga region (Niva Povolzh'ya)*, 2(47), 141-148 (in Russ).
5. Volodko, O. S., Bychenin, A. P. & Rodkin, I. S. (2024) Comparative assessment of the physicochemical and tribological properties of mineral and rapeseed oil. *Samara Argovector (Samara Argovektor)*, 2, 5-11 (in Russ).
6. Efimov, V. V. (2000) Ensuring the operational reliability of hydraulic systems of agricultural machinery with the alternative use of rapeseed oil as a working fluid. *Candidate's thesis*. Saransk. 218 p. (in Russ).
7. Sergatenko, S. N., Fedorova, I. L. & Ignatova, T. D. (2022) Influence of oil pollution on the activity of soil enzymes of classes of oxidoreductases and hydrolases. *Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy (Vestnik Ul'yanovskoj gosudarstvennoj sel'skhozajstvennoj akademii)*, 3(59), 83-88 (in Russ).
8. Edukov, D. A. (2009) Reduction of wear rate of gear transmissions of tractor transmissions using magnetohydrodynamic treatment of vegetable-mineral lubricant. *Candidate's thesis*. Penza. 252 p. (in Russ).
9. Zhornik, V. I., Ivakhnik, A. V. & Zapol'sky, A. V. (2023) Modern trends in the creation of environmentally friendly biodegradable lubricants. *Current issues of mechanical engineering (Aktual'nye voprosy mashinovedeniya)*, 12, 313-319 (in Russ).
10. Edukov, V. A. (2003) Reducing energy costs in tractor transmissions by using doped rapeseed oil. *Candidate's thesis*. Penza. 224 p. (in Russ).
11. Lenivtsev, G. A. & Edukov, V. A. (2003) Theoretical determination of the optimal particle size of additives in the process of floating in oil. *Sovremennye tekhnologii, sredstva mekhanizacii i tekhnicheskoe obsluzhivanie v APK : sbornik nauchnyh trudov Povolzhskoj mezhvuzovskoj konferencii* (Modern technologies, mechanization tools and maintenance in the agro-industrial complex: a collection of scientific works of the Volga Intercollegiate Conference), 135-139 (in Russ).

Информация об авторах:

О. С. Володько – кандидат технических наук;
А. П. Быченин – кандидат технических наук;
В. А. Едуков – кандидат технических наук.

Information about the authors:

O. S. Volodko – Candidate of Technical Sciences;
A. P. Bychenin – Candidate of Technical Sciences;
V. A. Edukov – Candidate of Technical Sciences.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 1.09.2024; одобрена после рецензирования 19.09.2024; принята к публикации 16.10.2024.
The article was submitted 1.09.2024; approved after reviewing 19.09.2024; accepted for publication 16.10.2024.