

УДК 669.018.95

А.В. ЗАПОЛЬСКИЙ

специалист по внедрению новых технологий¹
E-mail: zapolskyandrew@gmail.com

В.И. ЖОРНИК, д-р техн. наук, проф.

начальник отделения технологий машиностроения и металлургии – заведующий лабораторией наноструктурных и сверхтвердых материалов НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование»²

E-mail: zhornik@inmash.bas-net.by

¹ООО «Евразия Лубрикантс», г. Заславль, Республика Беларусь²Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 02.02.2023.

ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫЙ ЖИДКИЙ СМАЗОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ПИЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ДИСПЕРСИОННОЙ СРЕДЫ

На примере создания композиционного жидкого смазочного материала с улучшенными свойствами показана реализация синергетического эффекта при использовании комбинированной дисперсионной среды, получаемой путем смешивания растительного и минерального масел. Разработан смазочный материал для пильных цепей и способ его получения, в котором к рапсовому маслу добавлено высокоочищенное минеральное масло III группы марки HC-4 в количестве 20,0...25,0 масс.%, а в качестве многофункциональной присадки использован комплекс сульфоната кальция с карбонатом кальция в количестве 1,5...2,0 масс.%. Разработанный смазочный материал имеет следующие характеристики: вязкость кинематическая при 40 °С — 61...63 мм²/с; температура застывания составляет –29 °С; температура вспышки — 242...246 °С; нагрузка сваривания — 2764 Н; показатель износа — 0,39...0,41 мм; массовая доля свободных органических кислот — 1,3...4,7 мг КОН/г; степень биоразлагаемости — 88...89 %; гарантийный срок хранения в открытой таре — 12 месяцев.

Ключевые слова: жидкий смазочный материал, пильная цепь, растительные и минеральные масла, комбинированная дисперсионная среда, физико-химические свойства, седиментационная устойчивость, биоразлагаемость

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-1-62-63-71>

Введение. Защита окружающей среды от загрязнения производственными отходами относится к числу проблем, которым в последнее время уделяется все большее внимания. Смазочные материалы, изготавливаемые главным образом на основе минеральных масел, содержащих сильнейшие канцерогены, являются одним из источников такого загрязнения [1–4]. Особенно остро эта проблема стоит в лесозаготовительной отрасли, поскольку масло для смазывания пильных цепей (бензопилы, кусторезы, харвестеры) непосредственно в процессе применения попадает в почву. Поэтому использование экологически безопасных биоразлагаемых смазочных материалов для узлов лесозаготовительной техники является актуальной задачей.

Анализ состава и свойств различных смазочных композиций показывает, что основным способом повышения функциональных свойств биоразлагаемых смазочных материалов для пильных

цепей является введение в состав растительных масел специальных присадок различной природы. Необходимыми требованиями к подобным присадкам, наряду с их основными функциональными качествами (адгезионность, депрессорность, противоизносность), являются их хорошее сродство с дисперсионной средой, биоразлагаемость и доступность к применению [5–9].

Растительные масла состоят главным образом из триглицеридов жирных кислот, и их химическая активность обусловлена в большей степени содержащимися в них ненасыщенными жирными кислотами. В молекулярном строении полиненасыщенных кислот присутствуют двух- и трехкратные двойные связи, и это придает растительным маслам функции природных поверхностно-активных веществ, что является причиной относительно легкой окисляемости и низкой термической и гидролитической стойкости растительных масел. Окисление растительных масел, интенсифици-

руется при повышении температуры, протекает через присоединение молекул кислорода по месту двойных связей с образованием циклической перекиси и повышением кислотного числа масла [10–12].

Целью данной работы является разработка компонентного состава и способа получения экологически безопасного биоразлагаемого масла для пильных цепей, характеризующегося высокими и стабильными при длительном хранении функциональными свойствами с биоразлагаемостью на уровне не ниже 80 % (в соответствии с нормативом OECD 301 В «Оценка способности органических соединений к биологическому разложению в водной среде. Метод анализа выделившегося диоксида углерода»).

Материалы и методы исследования. Негативное влияние низкой термической и химической стойкости растительных масел на функциональные свойства смазочных композиций для пильных цепей предложено нивелировать за счет частичной замены растительного масла минеральным с образованием комбинированной дисперсионной среды, используя при этом минеральное масло III группы по классификации API гидрокрекинговой очистки. Гидрогенизация и гидрокрекинг при производстве высокоочищенных масел, соответствующих III группе, оказывают существенное влияние на химическую структуру молекул веществ, входящих в минеральные масла. При этом происходит как стабилизация отдельных молекул вследствие удаления гетероатомов (сера, кислород, азот), так и превращение ароматических соединений в насыщенные нафтеновые или парафиновые углеводороды вследствие их глубокой гидрогенизации. В дополнение к гидрогенизации гидрокрекинг разрушает или крекирует крупные молекулы на более мелкие. При этом из мелких фрагментов могут вновь образовываться крупные молекулы с более упорядоченной и однородной структурой [13]. Таким образом, главным результатом гидрокрекинга является изомеризация парафинов, при этом наряду с насыщением ароматических соединений происходит размыкание нафтеновых колец. Все эти процессы приводят к практически полному удалению из базового масла канцерогенных и патогенных веществ, которые могут подавлять рост количества микроорганизмов, размножающихся в процессе биоразложения смазочного материала.

На основании данных, приведенных в [14], можно сделать вывод о том, что базовые масла III группы имеют одинаковое усредненное значение качества с маслами растительного происхождения. При разработке биоразлагаемого смазочного материала крайне важны токсикологические показатели его компонентов, которые у минеральных масел III группы по классификации API лучше, чем у нафтеновых минеральных масел, вхо-

дящих в I группу. Уступая растительным маслам по степени биоразлагаемости, минеральные масла III группы превосходят их по термической стойкости и характеризуются более низкой окисляемостью [10], что призвано способствовать повышению сохраняемости функциональных свойств смазочных материалов при длительном хранении и применении смазочных композиций, создаваемых на основе комбинированной дисперсионной среды, при обеспечении требуемого уровня их биоразлагаемости.

В качестве компонентов комбинированной дисперсионной среды использовались рапсовое масло (ГОСТ 31759-2012) производства ООО «РАПС» и минеральное масло III группы по классификации API марки HC-4 (ТУ ВУ 300042199.037-2015) производства ОАО «НАФТАН».

Для повышения трибологических параметров смазочной композиции применяют функциональные присадки. Поскольку большинство традиционных противоизносных присадок представляют собой сложные химические соединения на основе цинка, свинца, фосфора и серы, то такие соединения, как правило, канцерогенны и не допустимы в смазочных материалах, к которым предъявляются особые требования по экологической безопасности. В качестве многофункциональной присадки предложено использовать комплекс сульфата и карбоната кальция (условное обозначение $\text{Ca}(\text{RArSO}_3)_2 \cdot m\text{CaCO}_3$), который в дисперсионной среде структурно представляет собой отдельные микромицеллы, состоящие из индивидуального наноразмерного ядра в составе карбоната кальция и стабилизирующей оболочки из амфифильных жидкокристаллических полимеров. Эти микромицеллы образуют макромицеллярную пространственную структуру. Благодаря амфифильной полимерной оболочке обеспечивается средство с растительным маслом, которое значительно более полярно, чем минеральное масло. Благодаря этому подобные соединения обеспечивают хороший загущающий эффект в растительных маслах и высокую стабильность свойств. При тщательном диспергировании комплекса сульфата и карбоната кальция $\text{Ca}(\text{RArSO}_3)_2 \cdot m\text{CaCO}_3$ в среде базовой основы происходит разрушение его трехмерной структуры и распадение на отдельные активированные ассоциаты микромицелл. Данные мицеллы обладают хорошей седиментационной стабильностью в растительном масле, а также характеризуются отличными противоизносными качествами, свойственными свершщелочным сульфатам кальция, обеспечивают стойкость к воде. Сульфат кальция обладает хорошей смачивающей способностью, эффективно тормозит развитие электрохимических процессов коррозии металлов [7]. В данном случае в качестве вещества, содержащего комплекс сульфата и карбоната кальция, использовалась биоразлагаемая комплекс-

ная сульфонат кальциевая смазка OIMOL KSC BIO (ТУ ВУ 190410065.023-2021) производства ОДО «Спецсмазки».

Биоразлагаемость смазочных материалов определялась по методике 28-дневного теста, соответствующей [15]; устойчивость к окислению оценивалась по изменению кислотного числа смеси масел в соответствии с ГОСТ Р 52110-2003; температура вспышки определялась согласно ГОСТ 4333-2014; определение реологических характеристик осуществлялось по следующим параметрам: плотность при 15 °С — по ГОСТ 3900-85; кинематическая вязкость при 40 и 100 °С — по ГОСТ 33-2016; температура застывания — по ГОСТ 20287-91; температура вспышки — по ГОСТ 6356-75. Трибологические характеристики (нагрузка сваривания, показатель износа) определялись на четырехшариковой машине трения (ЧМТ) по ГОСТ 9490-75.

Результаты исследования и их обсуждение.
Отработка компонентного состава смазочной композиции. При отработке компонентного состава дисперсионной среды масла для пильных цепей принимались во внимание результаты исследования влияния содержания минерального масла III группы (в данном случае масло марки HC-4) в композиции с растительным маслом (в данном случае рапсовое масло) на биоразлагаемость смазочной композиции и устойчивость к окислению и термическую стойкость, представленные в таблице 1.

Их анализ показал, что содержание минерального масла III группы в составе смазочной композиции должно находиться в пределах 20,0...25,0 масс.%. Введение большего его количества приводит к снижению биоразлагаемости смазочной композиции ниже 80 %, что недопустимо, а содержание меньшего количества этого масла снижает термическую стойкость смазочной композиции, а также повышает ее окисляемость. В частности, при содержании в смазочной композиции высокоочищенного минерального масла III группы в количестве менее 20 масс.% окисляемость смазочной композиции превышает

допустимый уровень (не более 6,0 мг КОН/г для нерафинированного рапсового масла), а при его содержании более 25 масс.% биоразлагаемость смеси растительного и минерального масел находится на уровне ниже допустимого (не менее 80 %) [16], при этом также начинает резко падать температура вспышки растительно-минеральной масляной смеси.

Оптимальное содержание добавки в виде комплекса сульфоната и карбоната кальция $\text{Ca}(\text{RArSO}_3)_2 \cdot m\text{CaCO}_3$ в смазочном материале для пильных цепей устанавливалось на основе исследования зависимости противоизносных свойств смазочной композиции от концентрации в ней комплекса $\text{Ca}(\text{RArSO}_3)_2 \cdot m\text{CaCO}_3$, который вводился в смазочную композицию в составе смазки OIMOL KSC BIO. Результаты этих испытаний приведены в таблице 2.

Анализ данных таблицы 2 свидетельствует о том, что введение в базовую основу смазочной композиции комплекса сульфоната и карбоната кальция $\text{Ca}(\text{RArSO}_3)_2 \cdot m\text{CaCO}_3$ в количестве 1,5...2,0 масс.% позволяет добиться минимального значения показателя износа $D_{и} = 0,39...41$ мм. Содержание этой добавки в количестве менее 1,5 масс.% не обеспечивает высоких противоизносных показателей смеси масел, очевидно, ввиду отсутствия сплошности масляной пленки в зоне трибоконтакта из-за недостаточной ее толщины, а при содержании добавки более 2 масс.%, вероятно, начинает сказываться ее влияние на вязкостные свойства смеси масел за счет загущающих качеств ассоциатов микромицелл комплекса сульфоната и карбоната кальция $\text{Ca}(\text{RArSO}_3)_2 \cdot m\text{CaCO}_3$. Применение комплекса сульфоната и карбоната кальция в количестве 1,5...2,0 масс.% не оказывает заметного влияния на степень биоразлагаемости смазочной композиции.

Отработка режимов получения смазочной композиции. Эффективность процесса смешивания жидких компонентов определяется их вязкостью и режимом смешивания, который может быть охарактеризован энергетическими параметрами, включающими интенсивность механического воздействия (энергонапряженность процесса I (Вт/кг) — отношение мощности под-

Таблица 1 — Влияние содержания минерального компонента смазочной композиции на ее свойства
Table 1 — Effect of the mineral component content of the lubricant composition on its properties

Содержание масла HC-4, масс.%	Биоразлагаемость, %	Кислотное число, мг КОН/г	Температура вспышки, °С
15,0	89	7,23	246
17,5	88	6,48	242
20,0	86	5,79	238
22,5	84	4,42	235
25,0	80	3,51	231
27,5	77	3,09	220

Таблица 2 — Противоизносные характеристики смазочной композиции
Table 2 — Anti-wear characteristics of the lubricant composition

Содержание добавки $\text{Ca}(\text{RArSO}_3)_2 \cdot m\text{CaCO}_3$, масс.%	Показатель износа $D_{и}$, мм
0,5	0,52
1,0	0,47
1,5	0,41
2,0	0,39
2,5	0,44
3,0	0,46

веденной механической энергии к суммарной массе смешиваемых компонентов) и дозу введенной механической энергии D (кДж/кг), равную отношению количества введенной механической энергии к общей массе смеси или рассчитываемую как произведение энергонапряженности процесса смешивания на его продолжительность.

Вязкость (внутреннее трение) жидкости как свойство создавать сопротивление внешним силам перемещения влияет и на продолжительность процесса смешивания, и на его энергоемкость. Вязкостные характеристики масел, в свою очередь, в значительной степени зависят от температуры, с повышением которой их вязкость снижается. Поэтому для интенсификации процесса смешивания целесообразно повышать температуру смешиваемой композиции для снижения показателей вязкости компонентов, характеризующих сопротивляемость жидкости силе, заставляющей ее течь. Согласно имеющейся многочисленной технической информации, в частности [17], вязкость наиболее широко применяемых в смазочных композициях растительных масел (рапсовое, подсолнечное) достигает минимальных значений при нагреве до температуры 100...105 °С, и дальнейший подъем температуры практически не сказывается на ее изменении. Однако при нагреве масел выше 115...120 °С резко активизируются процессы деструкции растительных масел, повышается их испаряемость. Под воздействием высоких температур ускоряются процессы окисления растительных масел, которые протекают через присоединение в ненасыщенных веществах растительных масел молекулы кислорода по месту двойных связей с образованием циклической перекиси и повышением кислотного числа масла [10]. Исходя из этого, наиболее рационально осуществлять процесс смешивания компонентов смазочной композиции следует при ее нагреве до температур в диапазоне 105...115 °С [18].

Помимо вязкости на интенсивность смешивания, не касаясь химической природы взаимодействия смешиваемых компонентов, влияют также характер течения жидкости и продолжительность смешивания. Известно, что для обеспечения более интенсивного перемешивания различных слоев жидкости следует обеспечивать турбулентный характер ее течения, с другой стороны, переход течения жидкости из ламинарного в турбулентный режим вызывает возрастание вязкости жидкости (рисунок 1), что требует увеличения энергозатрат на реализацию процесса смешивания компонентов.

С целью определения оптимальных диапазонов значений энергонапряженности процесса смешивания компонентов смазочной композиции (что определяет режим течения жидкости: ламинарный или турбулентный) и дозы введенной механической энергии смешивания (что обуславливает энергоэффективность процесса смешива-

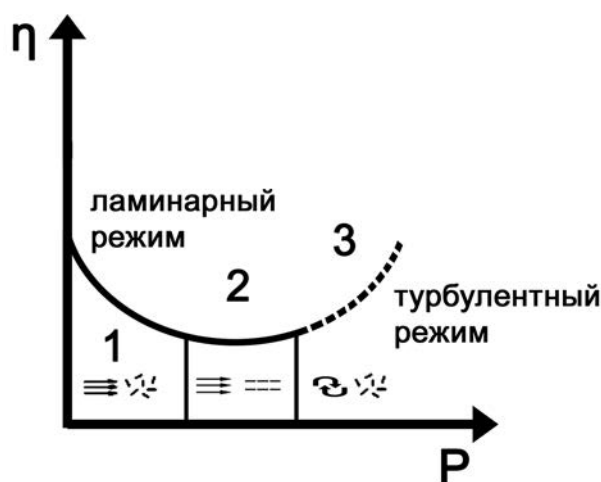


Рисунок 1 — Зависимость вязкости жидкости от режима ее движения [19]: I — снижение вязкости жидкости при ламинарном движении, обусловленное упорядочением первоначально хаотично расположенных молекул вдоль слоев жидкости при повышении давления; II — достижение минимального уровня вязкости жидкости при завершении ориентации молекул; III — возрастание вязкости, связанное с разориентированием молекул при переходе к турбулентному режиму движения жидкости

Figure 1 — Dependence of the liquid viscosity on the mode of its movement [19]: I — decrease in the liquid viscosity during laminar motion, due to the ordering of initially randomly arranged molecules along the layers of the liquid with increasing pressure; II — reaching a minimum level of liquid viscosity at the end of the orientation of molecules; III — increase in viscosity associated with the disorientation of molecules during the transition to turbulent liquid flow mode

ния) был проведен цикл исследований, в котором критерием физической эффективности процесса смешивания компонентов смазочной композиции, включающей растительное масло, минеральное масло и комплекс сульфоната и карбоната кальция, представленный в виде мазеобразной субстанции, являлась седиментационная устойчивость образующейся при смешивании смазочной композиции. При этом седиментационная устойчивость смазочной композиции оценивалась по количеству образующегося осадка при хранении образцов смазочной композиции (состав композиции: рапсовое масло — 75,5 масс.%; высокоочищенное минеральное масло III группы марки HC-4 — 22,5 масс.%; комплекс сульфоната и карбоната кальция (в перечете на дисперсную фазу комплексной сульфонат кальциевой смазки OIMOL KSC BIO — 2,0 масс.%) в неподвижном состоянии в течение 12 месяцев. Энергетическая эффективность процесса смешивания определялась по минимальной дозе введенной механической энергии, обеспечивающей практическое отсутствие осадка в образцах смазочной композиции после их хранения в течение 12 месяцев. В качестве предельно допустимого предела образующегося осадка был выбран порог на уровне 10 % от общего содержания присадки в смазочной композиции, т. е. 0,2 масс.%. Отделение осадка от маточного раствора для исследования его структурно-фазового состояния и измерения его массы осуществлялось с помощью метода декантации.

Седиментационная устойчивость дисперсных систем определяется способностью системы противодействовать оседанию частиц под влиянием силы тяжести или всплывать под действием выталкивающей силы со стороны жидкости. Дисперсная система считается седиментационно устойчивой, если ее дисперсные частицы не оседают, система не разделяется на фазы, т. е. находится в стабильном диффузионно-седиментационном равновесии. Существует резкое различие в отношении устойчивости между двумя классами коллоидов: лиофильными и лиофобными. Леофильные коллоиды обладают высоким сродством к дисперсионной среде, они самопроизвольно диспергируются и образуют термодинамически устойчивые коллоидные растворы. У лиофобных коллоидов степень сродства к растворителю намного меньше, их дисперсии термодинамически неустойчивы и характеризуются высокими значениями поверхностного натяжения на межфазной границе. Седиментационная устойчивость, в первую очередь, зависит от размеров частиц дисперсной фазы. Если размер их менее 1000 нм, то система обычно обладает высокой седиментационной устойчивостью. В случае более крупных частиц система неустойчива, т. е. со временем расслаивается, частицы дисперсной фазы либо всплывают, либо образуют осадок [20].

Агрегативная устойчивость определяется способностью дисперсной системы противодействовать слипанию частиц, т. е. сохранять неизменными размеры частиц дисперсной фазы. Однако из-за стремления систем «избавиться» от свободной энергии (в данном случае — от поверхностной энергии) частицы дисперсной фазы склонны к укрупнению путем их слияния или перекристаллизации. Если размеры частиц дисперсной фазы постоянны, не изменяются во времени, то коллоидно-дисперсные системы бесконечно долго могут сохранять седиментационную устойчивость. Укрупнение частиц в дисперсной системе (потеря агрегативной устойчивости) приводит к нарушению седиментационной устойчивости и выпадению осадка.

Исследование образовавшегося в смазочной композиции осадка методами рентгенофазового анализа и ИК-спектроскопии показали, что он состоит в основном из соединений кальция различного химического состава и структурного строения, т. е. образование осадка при хранении разработанной смазочной композиции обусловлено наличием в ней многофункциональной присадки в виде комплекса сульфоната и карбоната кальция. Образование в некоторых образцах значительного количества этого осадка обусловлено, вероятнее всего, недостаточной степенью диспергирования макромицеллярной структуры присадки при смешивании компонентов смазочной композиции до образования отдельных микромицелл

с индивидуальным ядром из нанокальцита и неполным освобождением связей их амфифильных оболочек, призванных обеспечить физико-химическое взаимодействие микромицелл присадки с полярными молекулами базового масла. В связи с этим в таких случаях при смешивании компонентов смазочной композиции формируется коллоидная система с недостаточной седиментационной устойчивостью.

Степень диспергирования многофункциональной присадки $\text{Ca}(\text{RARSO}_3)_2 \cdot m\text{CaCO}_3$ и, следовательно, уровень седиментационной устойчивости коллоидной системы зависят от дозы введенной механической энергии при смешивании и диспергировании компонентов, а также от энергонапряженности (т. е. интенсивности) этого процесса. Уровень седиментационной устойчивости смазочной композиции при концентрации присадки в диапазоне $C_{\text{фн}} = 1,0 \dots 2,5$ масс.% и различной дозе введенной механической энергии в пределах $D = 2,0 \dots 5,5$ кДж/кг при $I = 0,50 \dots 2,00$ Вт/кг оценивался по количеству образовавшегося в образцах осадка $G_{\text{ос}}$ (масс.%). В частности, на рисунке 2 представлена зависимость массы осадка $G_{\text{ос}}$ (в масс.%) при различной концентрации многофункциональной присадки $C_{\text{фн}}$ (масс.%) и различной дозе введенной механической энергии D (кДж/кг) для случая энергонапряженности $I = 1,25$ Вт/кг, а в таблице 3 приведены аналогичные данные для различной энергонапряженности из диапазона $I = 0,50 \dots 2,00$ Вт/кг при $C_{\text{фн}} = 2,0$ масс.%.

При энергонапряженности смешивания ниже $I = 1,0$ Вт/кг реализуется ламинарный (слоистый) режим течения компонентов, при котором слои жидкости движутся параллельно, скользят относи-

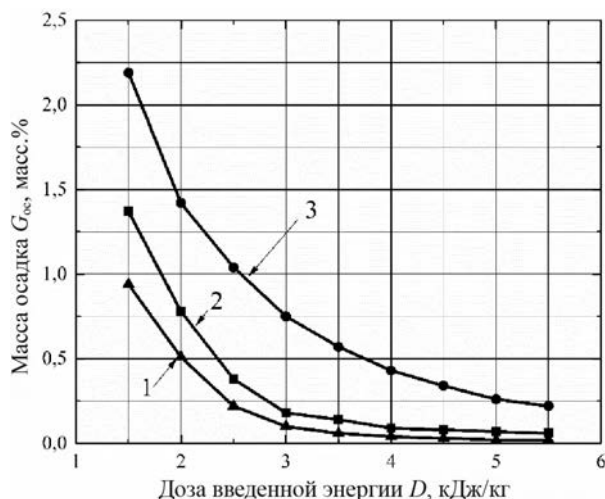


Рисунок 2 — Зависимость седиментационной устойчивости смазочной композиции $G_{\text{ос}}$ от дозы введенной механической энергии D при энергонапряженности процесса смешивания $I = 1,25$ Вт/кг и различной концентрации функциональной присадки $C_{\text{фн}}$: 1 — 1,0 масс.%; 2 — 2,0 масс.%; 3 — 2,5 масс.%

Figure 2 — Dependence of the sedimentation stability of the lubricant composition $G_{\text{ос}}$ on the dose of the introduced mechanical energy D at the energy intensity of the mixing process $I = 1.25$ W/kg and different concentrations of the functional additive $C_{\text{фн}}$: 1 — 1.0 wt.%; 2 — 2.0 wt.%; 3 — 2.5 wt.%

Таблица 3 — Зависимость массовой доли осадка в смазочной композиции от энергетических параметров смешивания
Table 3 — Dependence of the sediment mass fraction in the lubricant composition on the energy parameters of mixing

Доза введенной механической энергии D , Дж/кг	Массовая доля осадка, масс.%						
	Энергонапряженность I , Вт/кг						
	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00
2000	1,82	1,33	0,90	0,78	0,55	0,91	1,04
2500	1,71	1,12	0,52	0,38	0,35	0,61	0,77
3000	1,66	0,85	0,20	0,18	0,16	0,57	0,64
3500	1,59	0,63	0,16	0,14	0,10	0,49	0,55
4000	1,43	0,49	0,12	0,09	0,07	0,31	0,38
4500	1,20	0,37	0,09	0,08	0,06	0,18	0,25
5000	0,97	0,24	0,08	0,07	0,05	0,17	0,20
5500	0,61	0,13	0,07	0,06	0,04	0,13	0,15

тельно друг друга, практически не перемешиваясь между собой, что снижает уровень динамического воздействия на макромицеллярную структуру присадки и степень ее диспергирования, не обеспечивая при этом должного уровня седиментационной устойчивости образующейся композиции. При увеличении значений энергонапряженности смешивания более $I = 1,0$ Вт/кг возникает турбулентный (вихревой) режим течения жидкости, скорости частиц жидкости в каждой точке хаотично меняются с образованием вихрей и перемешиванием слоев, что интенсифицирует процесс разрушения макромицеллярной структуры присадки до микро- и наноуровня индивидуальных мицелл, обуславливая образование более однородных и устойчивых коллоидных систем при практически отсутствии осадка (его масса составляет менее 0,2 масс.%).

Однако при значениях энергонапряженности смешивания компонентов $I > 1,5$ Вт/кг масса осадка начинает увеличиваться, что, по всей ви-

димости, обусловлено ухудшением перемешивания компонентов в связи с возрастанием вязкости жидкости при таких параметрах процесса, несмотря на сохранение турбулентного режима движения жидкости. При этом также было установлено, что в диапазоне значений энергонапряженности смешивания $I = 1,0 \dots 1,5$ Вт/кг минимальный уровень дозы введенной механической энергии, при котором масса осадка не превышает установленного порогового значения 0,2 масс.%, соответствует $D = 3000$ Дж/кг (3 кДж/кг), а при значениях $D > 4500$ Дж/кг (4,5 кДж/кг) масса осадка практически не изменяется.

На основании анализа полученных данных можно сделать вывод, что разработанная смазочная композиция, состоящая из смеси растительного масла, высокоочищенного минерального масла III группы и многофункциональной присадки в виде комплекса сульфоната и карбоната кальция, характеризуется заданным уровнем седиментационной устойчивости ($G_{oc} \leq 0,2$ масс.%) при кон-

Таблица 4 — Характеристика стабильности свойств смазочных материалов
Table 4 — Characteristics of the stability of the lubricant properties

Смазочный материал	Кинематическая вязкость при 40 °С, мм ² /с	Массовая доля свободных органических кислот, мг КОН / г	Температура застывания, °С	Показатель износа, мм	Нагрузка сваривания, Н	Коррозионное воздействие на металлы
Смазочный материал [21] (свежеприготовленный)	62	3,5	-26	0,49	2195	выдерживает
Смазочный материал [21] (через 12 мес. хранения)	89	14,2	-26	0,64	1960	не выдерживает
Разработанный смазочный материал (свежеприготовленный)	61	1,3	-29	0,39	2764	выдерживает
Разработанный смазочный материал (через 12 мес. хранения)	63	4,7	-29	0,41	2764	выдерживает

центрации присадки $C_{\text{фп}} = 1,5 \dots 2,0$ масс.% и дозе введенной механической энергии $D = 3,0 \dots 4,5$ кВт/кг при энергонапряженности процесса смешивания $I = 1,0 \dots 1,5$ Вт/кг.

Для установления способности к сохранению свойств полученного биоразлагаемого смазочного материала при хранении в сопоставлении со смазочным материалом [21], выбранным в качестве аналога, были определены их параметры на следующий день после изготовления и по прошествии 12 месяцев. В течение этого срока образцы смазочных материалов хранились в открытой таре при температуре 20–25 °С под воздействием солнечных лучей. Результаты проведенных испытаний представлены в таблице 4.

В ходе испытаний установлено, что разработанный биоразлагаемый смазочный материал по сравнению с известным аналогом обладает существенно лучшими характеристиками по стабильности химического состава и свойств при хранении, трибологическим характеристикам и степени коррозионного воздействия на металлы.

Заключение. В работе на примере создания композиционного жидкого смазочного материала с улучшенными свойствами показана реализация синергетического эффекта при использовании комбинированной дисперсионной среды, получаемой путем смешивания растительного и минерального масел. Разработан смазочный материал для пильных цепей и способ его получения, в котором к растительному маслу (в данном случае рапсовому) добавлено высокоочищенное минеральное масло III группы (в данном случае марки HC-4) в количестве 20,0...25,0 масс.%, а в качестве многофункциональной присадки использован комплекс сульфоната и карбоната кальция в количестве 1,5...2,0 масс.% (в данном случае в составе биоразлагаемой комплексной сульфонат кальциевой смазки OIMOL KSC BIO). При этом процесс смешивания компонентов смазочной композиции осуществляется при следующих технологических параметрах: температура смешивания компонентов — 105...115 °С; энергонапряженность процесса смешивания — 1,0...1,5 Вт/кг; доза введенной механической энергии при смешивании — 3,0...4,5 кДж/кг. Разработанный смазочный материал имеет следующие характеристики: вязкость кинематическая при 40 °С — 61...63 мм²/с, температура застывания составляет –29 °С, температура вспышки — 242...246 °С, нагрузка сваривания — 2764 Н, показатель износа — 0,39...0,41 мм, массовая доля свободных органических кислот — 1,3...4,7 мг КОН/г, степень биоразлагаемости — 88...89 % при гарантийном сроке хранения в открытой таре — 12 месяцев.

Результаты проведенных исследований положены в основу разработанного технологического процесса изготовления всесезонного масла для цепей бензопил, которое выпускается в промыш-

ленных объемах под торговой маркой FAVORIT ECO CS BIO предприятием ООО «Евразия Лубрикантс» (г. Заславль) и поставляется белорусским природоохранным предприятиям, лесным хозяйствам и другим потребителям.

Список литературы

1. Стрельцов, В.В. Тенденции использования биологических смазочных материалов / В.В. Стрельцов, С.В. Стребков // Вестн. ФГОУ ВПО МГАУ. — 2009. — № 2(33). — С. 66–69.
2. Евдокимов, А.Ю. Смазочные материалы в техносфере и биосфере: экологический аспект / А.Ю. Евдокимов, И.Г. Фукс, И.А. Любинин. — Киев: Атика-Н, 2012. — 292 с.
3. Деревяго, И.П. Концепция «зеленой экономики» и возможности ее реализации в условиях Республики Беларусь / И.П. Деревяго // Белорусский экономический журнал. — 2017. — № 1(78). — С. 24–37.
4. Запольский, А.В. Биоразлагаемые смазочные материалы — важнейший продукт смазочной индустрии будущего / А.В. Запольский // Новая экономика. — 2018. — № 1. — С. 226–229.
5. Gnanasekaran, D. Vegetable oil based bio-lubricants and transformer fluids. Applications in power plants / D. Gnanasekaran, V.P. Chavidi. — Singapore: Springer, 2018. — 155 p.
6. Фукс, И.Г. Растительные масла и животные жиры – сырье для приготовления товарных смазочных материалов / И.Г. Фукс [и др.] // Химия и технология топлив и масел. — 1992. — № 4. — С. 34–39.
7. Рудник, Л.Р. Присадки к смазочным материалам: свойства и применение / Л.Р. Рудник; пер. с англ. под ред. А.М. Данилова. — 2-е изд. — СПб.: Профессия, 2013. — 927 с.
8. Fessenbecker, A. Additives for environmentally acceptable lubricants / A. Fessenbecker, I. Roehrs, R. Pegnoglou // NLGI Spokesman. — 1996. — No. 6(60). — Pp. 9–25.
9. Development of the component composition of the biodegradable liquid lubricant for saw chains / V.I. Zhornik [et al.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2021. — № 3(56). — С. 70–82.
10. О’Брайен, Р. Жиры и масла. Производство, состав и свойства, применение / Р. О’Брайен; пер. с англ. В.Д. Широкова [и др.]. — СПб.: Профессия, 2007. — 751 с.
11. Облещикова, И.Р. Исследование рапсового масла в качестве основы альтернативных смазочных материалов: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.07 / И.Р. Облещикова. — М., 2004. — 109 с.
12. Девянин, С.Н. Растительные масла и топлива на их основе для дизельных двигателей / С.Н. Девянин, В.А. Марков, В.Г. Семенов. — М.: ФГОУ ВПО МГАУ, 2007. — 339 с.
13. Манг, Т. Смазки. Производство, применение, свойства: справ. / Т. Манг, У. Дрезель. — СПб.: Профессия, 2010. — 956 с.
14. Lingg, G. Unconventional base oils for liquid and semi-solid lubricants / G. Lingg // Proc. of the 14th International Colloquium Tribology. — 2004. — Vol. 1. — Pp. 1–4.
15. Стандартный метод испытаний для определения аэробно-водного биохимического разложения смазок или их компонентов в закрытом респирометре: ГОСТ 32552-2015. — Введ. 01.09.2017. — Минск: Евразийский совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2017. — 16 с.
16. Испытание образцов смазочных материалов на биоразлагаемость / В.Н. Леонтьев [и др.] // Технология органических веществ: материалы 85-й науч.-техн. конф. проф.-препод. состава, науч. сотр. и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 1–13 февр. 2021 г. — Минск: БГТУ, 2021. — С. 349–351.
17. Менумеров, Э.Р. Влияние антиоксидантных присадок на вязкостно-температурные свойства СОТС растительной природы [Электронный ресурс] / Э.Р. Менумеров. — Режим доступа: http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/18242/1/RITS_2011_80_Menumеров_Vliyanie.pdf. — Дата доступа: 09.01.2023.
18. Жорник, В.И. Экологически безопасные смазочные материалы на основе смеси растительного и минерального масел / В.И. Жорник, А.В. Ивахник, А.В. Запольский // Вестн.

- Витебского гос. технологич. ун-та. — 2022. — № 1(42). — С. 99–114.
19. Растворы ВМС [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://en.ppt-online.org/164524>. — Дата доступа: 03.01.2023.
20. Громаков, Н.С. Дисперсные системы и их свойства: учеб. пособие / Н.С. Громаков. — Казань: Изд-во Казанского гос. арх.-стр. ун-та, 2015. — 91 с.
21. Biodegradable lubricant composition: pat. JP2009292943A / Tahei Okada. — Publ. date: 17.12.2007.

ZAPOLSKY Andrey V.

Specialist in the Introduction of New Technologies¹

E-mail: zapolskyandrew@gmail.com

ZHORNIK Viktor I., D. Sc. in Eng., Prof.

Head of the Department of Technologies of Mechanical Engineering and Metallurgy — Head of the Laboratory of Nanostructured and Superhard Materials of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment”²

E-mail: zhornik@inmash.bas-net.by

¹LLC “Eurasia Lubricants”, Zaslavl, Republic of Belarus

²Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 02 February 2023.

ENVIRONMENTALLY SAFE LIQUID LUBRICANT FOR THE SAW CHAINS BASED ON THE COMBINED DISPERSION MEDIUM

The realization of the synergistic effect is shown on the example of creating of the composite liquid lubricant with improved properties using the combined dispersion medium obtained by mixing of the vegetable and mineral oils. The lubricant for the saw chains and the method of its production are developed. The highly purified mineral oil of group III of the NS-4 brand is added to the rapeseed oil in the amount of 20.0...25.0 wt.%, and the complex of the calcium sulfonate with calcium carbonate in the amount of 1.5...2.0 wt.% is used as a multifunctional additive in the manufacture of this lubricant. The developed lubricant has the following characteristics: kinematic viscosity at 40 °C — 61...63 mm²/s; solidification temperature is –29 °C; flash point — 242...246 °C; welding load — 2,764 N; wear index — 0.39...0.41 mm; mass fraction of free organic acids — 1.3...4.7 mg KOH/g; degree of biodegradability — 88–89 %; warranty period of storage in an open container — 12 months.

Keywords: liquid lubricant, saw chain, vegetable and mineral oils, combined dispersion medium, physicochemical properties, sedimentation stability, biodegradability

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-1-62-63-71>

References

1. Streltsov V.V., Strebkov S.V. Tendentsii ispolzovaniya biologicheskikh smazochnykh materialov [Trends in the use of biological lubricants]. *Vestnik FGOU VPO MGAU*, 2009, no. 2(33), pp. 66–69 (in Russ.).
2. Evdokimov A. Yu., Fuks I.G., Lyubinin I.A. *Smazochnye materialy v tekhnosfere i biosfere: ekologicheskiy aspekt* [Lubricants in the technosphere and biosphere: ecological aspect]. Kiev, Atika-N Publ., 2012. 292 p. (in Russ.).
3. Derevyago I.P. Kontseptsiya «zelenoy ekonomiki» i vozmozhnosti ee realizatsii v usloviyakh Respubliki Belarus [“Green economy” concept and possibilities of its implementation in the context of the Republic of Belarus]. *Belarusian economic journal*, 2017, no. 1(78), pp. 24–37 (in Russ.).
4. Zapolsky A.V. Biorazlagaemye smazochnye materialy – vazhnyy produkt smazochnoy industrii budushchego [Biodegradable lubricants are the most important product of the future lubricant industry]. *Novaya ekonomika*, 2018, no. 1, pp. 226–229 (in Russ.).
5. Gnanasekaran D., Chavidi V.P. *Vegetable oil based bio-lubricants and transformer fluids. Applications in power plants*. Singapore, Springer, 2018. 155 p.
6. Fuks I.G., Evzhdokimov A.Yu., Dzhamalov A.A., Luksa A. Rastitelnye masla i zhivotnye zhiry – syre dlya prigotovleniya tovarnykh smazochnykh materialov [Vegetable oils and animal fats – raw materials for the preparation of commercial lubricants]. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel*, 1992, no. 4, pp. 34–39 (in Russ.).
7. Rudnick L.R. *Lubricant additives: chemistry and applications*. Boca Raton, Taylor & Francis Group, 2009. 790 p.
8. Fessenbecker A., Roehrs I., Pagnoglou R. Additives for environmentally acceptable lubricants. *NLGI Spokesman*, 1996, no. 6(60), pp. 9–25.
9. Zhornik V.I., Zapolsky A.V., Ivakhnik A.V., Parnitsky A.M. Development of the component composition of the biodegradable liquid lubricant for saw chains. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2021, no. 3(56), pp. 70–82.
10. O’Brien R.D. Fats and oils. *Formulating and processing for applications*. Boca Raton, CRC Press LLC, 2003. 616 p.
11. Oblashchikova I.R. *Issledovanie rapsovogo masla v kachestve osnovy alternativnykh smazochnykh materialov*. Diss. kand. tekhn. nauk [Study of rapeseed oil as the basis of alternative lubricants. Ph. D. Thesis]. Moscow, 2004. 109 p. (in Russ.).
12. Devyanin S.N., Markov V.A., Semenov V.G. *Rastitelnye masla i topliva na ikh osnove dlya dizelnykh dvigateley* [Vegetable oils

- and fuels based on them for diesel engines]. Moscow, FGOU VPO MGAU Publ., 2007. 339 p. (in Russ.).
13. Mang T., Dresel W. *Lubricants and Lubrication*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007. 850 p.
 14. Lingg G. Unconventional base oils for liquid and semi-solid lubricants. *Proc. 14th International Colloquium Tribology*. Es-slingen, 2004, vol. 1, pp. 1–4.
 15. State Standard 32552-2015. *Standartnyy metod ispytaniy dlya opredeleniya aerobno-vodnogo biokhimicheskogo razlozheniya smazok ili ikh komponentov v zakrytom respirometre* [Standard test method for determining the aerobic-aqueous biochemical decomposition of lubricants or their components in a closed respirometer]. Minsk, Evraziyskiy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii Publ., 2017. 16 p. (in Russ.).
 16. Leontev V.N., et al. Ispytanie obraztsov smazochnykh materialov na biorazlagaemost [Testing of lubricant samples for biodegradability]. *Materialy 85 nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiem) "Tekhnologiya organicheskikh veshchestv"* [Proc. 85th scientific and technical conference of faculty, researchers and post-graduates (with international participation) "Technology of organic substances"]. Minsk, 2021, pp. 349–351 (in Russ.).
 17. Menumerov Je.R. *Vliyaniye antioksidantnykh prisadok na vyazkostno-temperaturnyye svoystva SOTS rastitel'noy prirody* [Influence of antioxidant additives on viscosity-temperature properties of the vegetative nature lubricant-cooling agent]. Available at: http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/Kh-PI-Press/18242/1/RITS_2011_80_Menumerov_Vliyaniye.pdf (accessed 09 January 2023) (in Russ.).
 18. Zhornik V.I., Ivakhnik A.V., Zapolsky A.V. Ekologicheski bezopasnye smazochnye materialy na osnove smesi rastitel'nogo i mineral'nogo masel [Environmentally friendly lubricants based on the mixture of the vegetable and mineral oils]. *Vestnik of Vitebsk State Technological University*, 2022, no. 1(42), pp. 99–114 (in Russ.).
 19. *Rastvory VMS* [Solutions of high-molecular weight compounds]. Available at: <https://en.ppt-online.org/164524> (accessed 03 January 2023) (in Russ.).
 20. Gromakov N.S. *Dispersnyye sistemy i ikh svoystva* [Dispersed systems and their properties]. Kazan, Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta Publ., 2015. 91 p. (in Russ.).
 21. Okada T. *Biodegradable lubricant composition*. Patent JP, no. JP2009292943A, 2007.