

УДК 669.018.95

**ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА
БИОРАЗЛАГАЕМЫХ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОК**

*д-р техн. наук, проф. В.И. ЖОРНИК, А.В. ЗАПОЛЬСКИЙ, канд. техн. наук А.В. ИВАХНИК
(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск),
канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН
(Полоцкий государственный университет)*

Показано, что биоразлагаемые пластичные смазочные материалы (БПСМ) целесообразно создавать на базе смеси растительных и минеральных масел (смешанная дисперсионная среда) с выбором определенного соотношения между их содержанием, а также с использованием одинарных или гетерогенных дисперсных фаз, исходя из заданного уровня работоспособности смазки (реологических и трибологических свойств) и требуемой скоротечности процесса биодеструкции продукта. При этом технологический цикл получения смазки должен обеспечивать минимальное воздействие высоких температур и воды на растительный компонент дисперсионной среды. С целью реализации этого подхода применен способ получения биоразлагаемых мыльных пластичных смазок, в котором щелочной компонент вводится в реакционную массу не в виде традиционно используемого водного раствора, а в составе масляной суспензии. Данный технологический прием проиллюстрирован на примере технологий получения БПСМ на кальциевом (смазка СОЛИДОЛ БИО), литий-кальциевом (смазка OIMOL LC BIO) и комплексном сульфат кальциевом (смазка OIMOL KSC BIO) загустителях. Реологические и трибологические свойства разработанных БПСМ находятся на уровне их аналогов, изготовленных на базе минерального масла, при биоразлагаемости БПСМ примерно в 5,5 раза выше. Разработано и изготовлено технологическое оборудование лабораторного (мощность 10 кг/цикл) и промышленного (мощность 200 и 2500 кг/цикл) типа. Отличительной особенностью данного оборудования является наличие в нем подсоединенного к циркуляционному контуру по системе байпас диспергирующего контура с гидродинамическим диспергатором, реализующим эффект кавитации с возможностью диспергирования компонентов реакционной массы до наноразмерного уровня. Организован промышленный выпуск БПСМ на загустителях различного вида (кальциевый, литий-кальциевый, комплексный сульфат кальциевый, комплексный литиевый) в соответствии с разработанными технологиями.

Ключевые слова: биоразлагаемый пластичный смазочный материал, смешанная дисперсионная среда, гетерогенная дисперсная фаза, технология, оборудование, реологические и трибологические свойства.

Введение. Глобальные тенденции развития «зеленой» экономики предусматривают усиление роли возобновляемой энергетики, чистого транспорта, органического сельского хозяйства, «зеленого» строительства, повышение эффективности использования сырья и энергии, увеличение степени переработки отходов, охрану и восстановление естественных экосистем [1]. В этой связи наряду с ветряной, солнечной и водородной энергетикой, информационными технологиями и электротранспортом использование биоразлагаемых материалов в различных сферах (в частности, одноразовая упаковка, биосмазки) является важной составляющей «зеленой» экономики [2].

Неуклонный рост парка машин и механизмов, естественно, требует увеличения объемов и расширения ассортимента смазочных материалов для их эффективного обслуживания. В Республике Беларусь ежегодное потребление смазочных материалов, изготавливаемых как внутри страны, так и ввозимых из-за ее пределов, составляет порядка 13–15 тыс. т, из них примерно 90% приходится на жидкие смазочные материалы (моторные, трансмиссионные, гидравлические и др. масла), остальное составляют пластичные смазки и пасты различного функционального назначения (антифрикционные, противопригарные, консервационные и др.).

Смазочные материалы в подавляющем большинстве изготавливаются на основе нефтепродуктов, которые содержат сильнейшие канцерогены с высокой биологической активностью, приводящей к возникновению ряда заболеваний живых организмов. Минеральные (нефтяные) масла трудно поддаются биоразложению под воздействием содержащихся в окружающей среде микроорганизмов. При этом естественная система разложения оказывается перегруженной из-за значительных объемов накопления этих продуктов в результате непредвиденных или технологически обусловленных их утечек (например, смазывание пары рельс–колесо или пильных цепей; двухтактные ДВС). В странах Европейского союза ежегодно около 30–40% из приблизительно 5 млн т отработанных смазочных материалов попадают в окружающую среду (в странах СНГ ситуация в этом плане складывается не проще) [2].

Созданию и применению так называемых «зеленых» смазочных материалов в настоящее время уделяется все большее внимание, что объясняется как минимум двумя причинами. Одна из них обусловлена необходимостью защиты окружающей среды, поскольку смазочные материалы, изготавливаемые в настоящее время, как указывалось выше, в своем большинстве на основе минеральных масел, попадая на стадиях изготовления, транспортировки, хранения, применения и утилизации в окружающую среду, создают биотоксикологические угрозы для человека и всех живых организмов. Вторая причина связана с поисками источников дешевого возобновляемого сырья для смазочных материалов как альтернативы постепенно иссякаемым запасам нефти.

Одним из перспективных вариантов решения этой проблемы является использование сырья растительного происхождения. В ряде стран разработаны нормативные документы и рекомендации поощрительного и принудительного характера, направленные на более широкое применение растительных масел в рецептурах смазочных материалов, в частности рапсового масла и продуктов его переэтерификации [3–6].

Применение биоразлагаемых смазочных материалов в транспорте и другой технике в последние годы начинает расширяться. С экологической точки зрения применение данных продуктов особенно оправдано там, где необходима их быстрая разлагаемость, например, в сельском, лесном и водном хозяйствах, гидравлических системах мобильных машин, в строительной промышленности [2; 7]. Особенно актуально применение биоразлагаемых смазочных материалов в тех случаях, когда существует неизбежность или велика вероятность их попадания в почву, водоемы, атмосферу, в т.ч. в лесном хозяйстве (малоразмерное оборудование (бензопилы, кусторезы) и оборудование для заготовки леса (харвестеры, форвардеры и др.)), в сельском хозяйстве (почвообрабатывающая и уборочная техника), на транспорте (двухтактные двигатели внутреннего сгорания) и др.

Пластичные смазочные материалы (ПСМ) занимают промежуточное положение между твердыми смазочными материалами и маслами. Условно их можно рассматривать как двухкомпонентные системы, состоящие из масла (дисперсионной среды) и загустителя (дисперсной фазы). В качестве дисперсионной среды (ДС), на долю которой приходится 75–95% объема смазки, используются различные смазочные жидкости, и чаще всего (около 97% смазок) это нефтяные масла малой и средней вязкости. В смазках для экстремальных и специфических условий работы используют синтетические масла (полисилоксаны, полигликоли, сложные эфиры, перфтор- и перхлоруглероды и др.). Растительные масла состоят, главным образом, из триглицеридов жирных кислот. Их химические свойства обусловлены в большей степени содержащимися в них ненасыщенными жирными кислотами, т.к. последние наиболее реакционноспособны. Структурные особенности триглицеридов жирных кислот, безусловно, оказывают существенное влияние на трибологические свойства растительных масел. Так, наличие в составе растительных масел полиненасыщенных кислот с присутствием в их молекулярном строении двух- и трехкратных двойных связей придает им функции природных ПАВ, что благоприятно сказывается на образовании граничных слоев с низким сопротивлением сдвигу и повышении износостойкости твердых тел [8–10]. Однако следует иметь в виду такие существенные недостатки растительных масел, как их легкая окисляемость на воздухе и склонность к полимеризации с течением времени, обусловленные, в частности, наличием ненасыщенных связей в структуре триглицеридной молекулы. Поэтому применение смазочных материалов, содержащих в своем составе дисперсионную среду полностью в виде растительного масла (или смеси различных растительных масел), целесообразно только в случаях относительно кратковременного периода их использования (проточное смазывание, частая замена смазочного материала) и при условии хранения в герметичных емкостях без доступа воздуха.

В ПСМ дисперсная фаза (5–25 об.%) образует трехмерный структурный каркас, в ячейках которого удерживается масло. По типу дисперсной фазы ПСМ принято подразделять на четыре основные группы: мыльные (простые, комплексные) – смазки, загустителями которых являются мыла – соли высших жирных кислот (более 80% ассортимента смазок); смазки на углеводородных загустителях (парафин, церезин, петролатум и др.); смазки на высокодисперсных неорганических загустителях (силикогель, сажа, графит, бентонит и т.д.); смазки на полимерных загустителях (полимочевинные, фторопластовые и др.).

Разные типы и комбинации загустителя и базового масла, вместе с дополнительными модификаторами структуры и присадками, придают смазкам их окончательные свойства. Смазки на одном типе загустителя относятся к группе простых смазок (литиевая, кальциевая, полимочевинная, бентонитовая и т.п.). Более высокий уровень реологических и трибологических свойств удается получить при использовании комбинированных дисперсных фаз: или комплексный загуститель (комплексная соль одного аниона высокомолекулярной органической и низкомолекулярной неорганической кислот, например, 12-гидроксистеарат лития + борат (или терефталат) лития), или гетерогенный загуститель (либо сочетание различных солей (например, натриевой и кальциевой) одной и той же карбоновой кислоты, или комбинация загустителей различного типа (например, мыло и высокодисперсные неорганические частицы (литиевая соль 12-гидроксистеариновой кислоты + наночастицы углерода))¹ [11].

С учетом сказанного, представляется целесообразным создавать биоразлагаемые пластичные смазочные материалы (БПСМ) на базе смеси растительных и минеральных масел с выбором определенного соотношения между их содержанием, а также с использованием одинарных или гетерогенных дисперсных фаз, исходя из требуемого уровня работоспособности (реологических и трибологических свойств), и желаемой скоротечности процесса биодеструкции продукта при его утилизации или попадании (случайном либо технологически обусловленном) в окружающую среду. Это позволит обеспечить сохранение структурного состояния и высокий уровень потребительских свойств смазочного материала в течение определенного промежутка времени с учетом специфики смазывания узлов трения, а также длительности хранения и использования смазочного материала.

¹ Ивахник, А.В. Пластичные смазочные материалы на основе бинарной дисперсной фазы повышенной нагрузочной способности : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.09 / А.В. Ивахник. – Минск, 2014. – 190 л.

Целью данной работы являлась разработка технологий и оборудования для производства биоразлагаемых пластичных смазок со смешанной дисперсионной средой (смесь растительного и минерального масел) и одинарной (кальциевой) или гетерогенной (литий-кальциевой, сульфонат кальциевой) дисперсионной фазой.

Методика исследований. Для отработки технологий получения пластичных смазок со смешанной дисперсионной средой использовались масло минеральное I группы по стандарту API (American Petroleum Institute) марки И-40А (ГОСТ 20799-88), масло высокоочищенное III группы по стандарту API марки HC-4 (ТУ ВУ 300042199.037-2015) пр-ва ОАО «НАФТАН» и масло рапсовое (ГОСТ 31759-2012) пр-ва ООО «РАПС». Для синтеза одинарного кальциевого загустителя использовались кислота 12-гидрооксистеариновая (ТУ 38 101 721) и гидроокись кальция (ГОСТ 9262-77), а для гетерогенного литий-кальциевого загустителя – дополнительно моногидрат лития гидроокиси (ГОСТ 8595-83). Для синтеза пластичной смазки, загущенной гетерогенным сульфонат кальциевым комплексом, использовались кислота 12-гидрооксистеариновая (ТУ 38 101 721), кислота уксусная (ГОСТ Р 55982-2014), гидроокись кальция (ГОСТ 9262-77), высокощелочной сульфонат кальция в виде присадки ССК-400D (ТУ ВУ 390401182.022-2011). Для улучшения функциональных свойств применялись следующие присадки: депрессорная присадка К-110 (ТУ 0257-037-40065452-03), адгезионная присадка Petrolad 484 BD (пр-ва компании «BRB»), многофункциональная присадка ДФ-11 (ТУ 0257-005-00044434-99).

Качество пластичных смазок оценивалось по показателю пенетрации (ГОСТ 5346-78), температуре каплепадения (ГОСТ 32322-2013), коллоидной стабильности (ГОСТ 7142-74), массовой доле механических примесей (ГОСТ 1036-75), содержанию воды (ГОСТ 1547-84) и трибологическим характеристикам, определяемым на четырехшариковой машине трения (ЧМТ) по ГОСТ 9490-75. Исползованный в работе метод оценки биоразлагаемости смазочных материалов основан на изучении динамики превращений жирных кислот и определении степени их деструкции в течение 28 суток. При этом жирные кислоты переводились в их метиловые эфиры, и биоразлагаемость определялась исходя из содержания в образцах метиловых эфиров жирных кислот, установленного методом газожидкостной хроматографии (ГЖХ-анализа) с использованием газового хроматографа Agilent 7820A GC (Agilent Technologies, США).

Отработка компонентного состава и режимов получения БПСМ. Основным объективным критерием, по которому смазочный материал относят к категории биологически безопасных материалов, в соответствии с нормативом OECD 301 В «Оценка способности органических соединений к биологическому разложению в водной среде. Метод анализа выделившегося диоксида углерода», является степень биоразлагаемости не менее 80%. Однако базовые масла III группы по стандарту API имеют меньшую скорость биоразложения относительно растительных масел, что препятствует возможности полной замены ими растительных масел в производстве биоразлагаемых пластичных смазок, и требуется установление оптимального соотношения в дисперсионной среде биоразлагаемой пластичной смазки растительного масла и масла III группы. Растительные масла более чувствительны, чем минеральные, к воздействию воды и высокой температуры, поэтому рациональная структура технологического процесса получения пластичной смазки с использованием растительного масла должна разрабатываться с учетом химического состава растительного масла и влияния на него контакта с водой и термического воздействия.

Известно, что пластичные смазки должны иметь слабощелочную реакцию. Массовая доля свободной щелочи в пересчете на NaOH, как правило, составляет 0,7–1,2%, а массовая доля свободных органических кислот – не более 1,5 мг КОН на 1 г смазки, что необходимо для придания пластичной смазке антикоррозионных свойств и повышения стойкости при хранении, т.к. в процессе хранения происходит некоторое окисление базовых масел с образованием кислотных продуктов². При применении в качестве дисперсионной среды растительных масел этот показатель становится наиболее актуальным, что обусловлено разнообразием состава растительных масел, содержащих различные изомеры жирных кислот, циклические кислоты, оксикислоты (насыщенные и ненасыщенные). В процессе хранения жиры в растительных маслах нередко подвергаются глубоким изменениям, особенно в присутствии воды, что объясняется значительным количеством в них непредельных соединений, в частности, эфиров ненасыщенных жирных кислот, которые весьма неустойчивы, и при контакте с водой происходит расщепление (гидролиз) эфирных связей с накоплением свободных жирных кислот. Под воздействием высоких температур резко 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 [12]. В связи с этой особенностью в технологических процессах следует минимизировать воздействие воды и температуры на растительные масла, что особенно важно в процессах производства пластичных смазок.

Для решения поставленной задачи предложен вариант построения технологических процессов получения пластичных смазок с применением растительных масел, исключая длительный воздействие высоких температур и воды на растительные масла³ [13]. Как правило, при производстве мыльных пластичных смазок щелочи вводятся

² Манг, Т. Смазки. Производство, применение, свойства : справ. : [пер. 2-го англ. изд.] / Т. Манг, У. Дрезель; под ред. В.М. Школьниковой. – СПб. : Профессия, 2010. – 994 с.

³ Биоразлагаемая пластичная смазка и способ ее получения : решение о выдаче патента Респ. Беларусь от 12.11.2021 по заявке № а20200310 от 06.11.2020 / В.И. Жорник, А.В. Запольский, А.В. Ивахник, В.П. Ивахник.

в реакционную массу в виде водных растворов, что позволяет отсоединить, например, молекулу воды из состава моногидрата гидроксида лития или перевести гидроксид кальция в активное реакционно-способное состояние. Также применение водных растворов позволяет улучшить равномерность распределения щелочи в реакционном объеме, так как по мере их ввода реакционная масса становится более вязкой, а следовательно, замедляются процессы диспергирования реакционных компонентов и снижается скорость протекания реакции нейтрализации. В предложенном технологическом подходе, в частности, моногидрат гидроксида лития и/или гидроксид кальция вводятся в базовое масло III группы не в виде водных растворов, а в виде предварительно подготовленной дегидратированной масляной суспензии после введения и расплавления в базовом минеральном масле 12-гидроксистеариновой кислоты. Это позволяет практически полностью исключить участие химически несвязанной воды в технологическом процессе получения пластичной смазки и ее негативное влияние на растительное масло⁴.

Кальциевый загуститель. При производстве синтетического солидола проходят следующие технологические операции: загрузка части (30–50%) минерального масла (в частности, масла И-40А); его нагрев до температуры 60–65 °С; добавление жирных кислот фракции С 20 и выше с кислотным числом 100–125 мг КОН/г продукта; разогрев массы до температуры 85–90 °С; добавление водной суспензии гидроксида кальция со значительным количеством воды; медленный нагрев реакционной массы до температуры 98–100 °С для проведения реакции кислот с гидроксидом кальция с образованием кальциевых мыл; удаление воды (при этом очень важно удалить воду не полностью, а до ее остаточного содержания в количестве 2–4 масс.%, в противном случае происходит разрушения структуры пластичной смазки и ее разжижение); отключение нагрева и добавление оставшейся части минерального масла. Синтетический солидол имеет волокнистое строение одинарной дисперсной фазы (рисунок 1, а) и характеризуется достаточно хорошей коллоидной стабильностью и водостойкостью, высокими защитными свойствами. Недостатками Солидола С являются узкий диапазон рабочих температур (–30...+65 °С) и низкая механическая стабильность. При разрушении его волокнистой дисперсной фазы вначале сильно снижается предел прочности, что может привести к вытеканию смазки из узла трения; во время отдыха после деформирования Солидол С тиксотропно упрочняется, и при чрезмерном уплотнении волокон (рисунок 1, б) его эксплуатационные свойства ухудшаются.

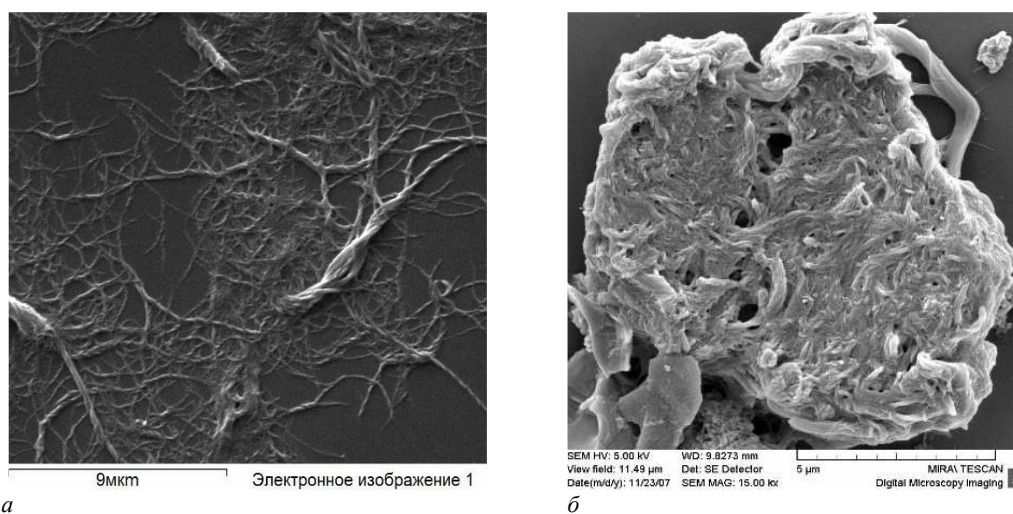


Рисунок 1. – Дисперсная фаза Солидола С в исходном состоянии (а) и после длительного нагружения в узле трения (б)

Технологический процесс получения биоразлагаемой смазки СОЛИДОЛ БИО короче, т.к. гидроксид кальция применяется не в виде водного раствора, а в виде масляной суспензии. В данном случае основные технологические операции следующие: загрузка части (45–50 масс.%) минерального масла (в частности, масла НС-4); его нагрев до температуры 80–82 °С; добавление жирных кислот (наиболее эффективно применение 12-гидроксистеариновой кислоты); их расплавление и добавление масляной суспензии гидроксида кальция; нейтрализация кислот при интенсивном диспергировании реакционной массы; нагрев реакционной массы до температуры 135–137 °С с параллельным удалением связанной воды; отключение нагрева и добавление растительного масла.

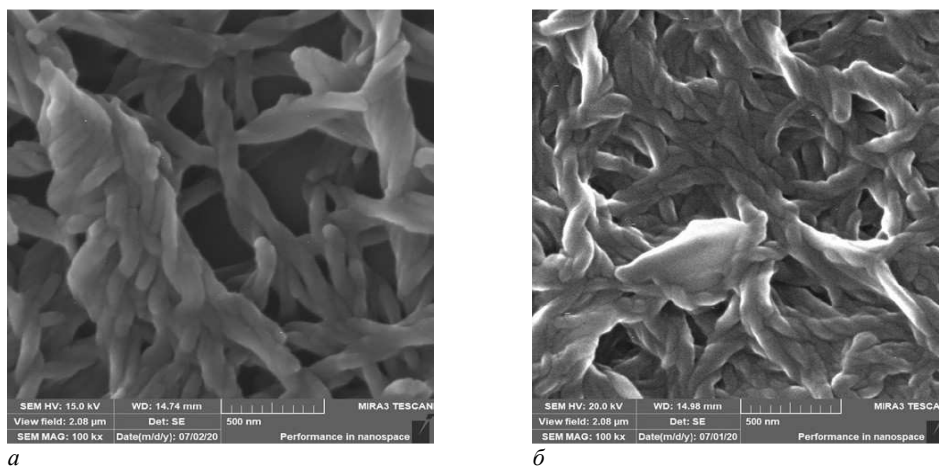
Несмотря на то, что в данном случае имеет место нагрев реакционной массы до более высоких температур, суммарные затраты энергии значительно меньше в связи со уменьшением общей длительности технологического процесса.

⁴ Биоразлагаемая пластичная смазка и способ ее получения : реш. о выдаче патента РФ от 12.11.2021 по 3-ке № а20200310 от 06.11.2020 / МПК С 10М 101/02, С 10М 117/04, С 10М 177/00 / В.И. Жорник, А.В. Запольский, А.В. Ивахник, В.П. Ивахник.

Литий-кальциевый загуститель. В разработанном варианте получения биоразлагаемой литий-кальциевой пластичной смазки⁵ после введения в базовое масло III группы и расплавления в нем 12-гидроксистеариновой кислоты добавляются предварительно подготовленные масляные суспензии моногидрата гидроксида лития и гидроксида кальция, и затем осуществляется нагрев реакционной массы до температуры 110–115 °С при постоянном диспергировании порошкообразных компонентов в гидродинамическом диспергаторе до наноразмерного уровня и интенсивном перемешивании реакционной массы с целью активации протекания реакции нейтрализации. Подобное воздействие способствует отсоединению молекулы воды в моногидрате гидроксида лития и удалению сорбированной воды гидроксида кальция. Щелочи переходят в активное состояние, способствующее повышению их реакционной способности. При этом они максимально равномерно распределяются по объему реакционной массы, обеспечивая стабильность протекания реакции нейтрализации. Нагрев до более низких температур (менее 110 °С) не позволяет гарантированно удалить воду, а применение более высоких температур (более 115 °С) энергетически нецелесообразно, и при этом чрезвычайно бурное кипение выделяющейся связанной воды может приводить к значительному расширению реакционной массы и ее выбросу из реактора.

Следует отметить, что в этом случае химические реакции, сопровождающие формирование дисперсной фазы, протекают в среде масла III группы, в нем же проходит и термомеханическая обработка реакционной массы с достижением расплава при температуре 175–180 °С (данное масло отличается высокой стойкостью к окислению при повышенных температурах), а растительное масло добавляется только на стадии охлаждения. Данный вариант технологического процесса получения биоразлагаемой пластичной смазки позволяет исключить длительное высокотемпературное воздействие на растительные масла и снизить вероятность деградации их свойств на стадии получения пластичного смазочного материала.

Изучение изображений дисперсной фазы образцов пластичных смазок, полученных с помощью сканирующей электронной микроскопии, показало, что на микроуровне структура дисперсной фазы пластичной смазки, полученной по варианту технологии⁵, характеризуется более равномерным распределением волокон загустителя по объему материала (рисунок 2, а), чем у пластичной смазки, полученной по технологической схеме⁶, при реализации которой используется водная суспензия щелочей и формирование загустителя изначально протекает в ограниченном объеме, обусловленном объемом, непосредственно занимаемом реакционными компонентами (12-оксистеариновая кислота и водная суспензия смеси щелочей), без участия дисперсионной среды. Последнее осложняет структурообразование пространственного каркаса загустителя, он формируется в виде чрезмерно загущенной массы, что в дальнейшем вызывает затрудненное диспергирование загустителя в дисперсионной среде, неоднородное его распределение по объему пластичного смазочного материала (рисунок 2, б). При этом в структуре смазки, полученной по технологической схеме⁶, видны остатки непрореагировавших, плохо диспергированных исходных компонентов дисперсной фазы, что свидетельствует о незавершенности процесса формирования ДФ в данном случае.



а – вариант⁵; б – вариант⁶

Рисунок 2. – Микроструктура дисперсной фазы пластичных смазок, полученных по различным технологическим схемам

⁵ Биоразлагаемая пластичная смазка и способ ее получения : решение о выдаче патента Респ. Беларусь от 12.11.2021 по заявке № а20200310 от 06.11.2020 / В.И. Жорник, А.В. Запольский, А.В. Ивахник, В.П. Ивахник.

⁶ Экологически чистый смазочный материал и способ его производства : пат. РФ № 2551679 / В.И. Колесников, М.В. Бойко, Д.Ю. Марченко, К.С. Лебединский. – Опубл. 27.05.2015.

Волокна дисперсной фазы смазки, полученной по варианту⁷, имеют большую длину (порядка 3–5 мкм), а их диаметр составляет 0,15–0,2 мкм. Они имеют более выраженную спиралеобразную морфологию, что также должно способствовать повышенной механической и коллоидной стабильности пластичного смазочного материала.

Комплексный сульфат кальциевый загуститель. Дисперсная фаза комплексной сульфат кальциевой смазки может быть образована при взаимодействии 12-гидроксистеариновой, уксусной и сульфоновой кислот с гидроксидом кальция. При этом могут реализовываться технологические схемы с использованием, например, предварительного осернения растительного масла, либо с применением компонентов, содержащих сульфат кальция. В данном случае технология производства сульфат кальциевой смазки основана на введении в базовое масло сверхщелочного сульфата кальция с общим щелочным числом TBN (total base number) = 150–500 мг КОН/г. Сверхщелочной сульфат, смешанный с базовым маслом, обрабатывается кислотой, чтобы дестабилизировать его мицеллярную структуру. Затем вводятся промоторы и вода, и реакционная масса нагревается до температуры гелеобразования (80–90 °С). В реакционной смеси при этом аморфный карбонат кальция превращается в кальцит (кристаллическая модификация карбоната кальция). При более высоких температурах реакция конверсии способствует образованию фатерита, нежелательной кристаллической формы карбоната кальция, ухудшающей свойства сульфат кальциевой смазки⁸. В сульфат кальциевой смазке дисперсная фаза на микроуровне формируется не в виде волокон, как в других мыльных ПСМ, а представляет собой совокупность отдельных частиц нанокальцита в стабилизирующей оболочке из амфифильных жидкокристаллических полимеров, которые за счет сил межмолекулярного взаимодействия между собой образуют подвижный пространственный каркас (рисунок 3), который обеспечивает этой смазке высокий уровень тиксотропности. Благодаря отсутствию в ДФ волокон, которые могли бы безвозвратно разрушиться при механическом воздействии на ПСМ, при снятии нагрузки межмолекулярные связи между отдельными элементами структурного каркаса этой смазки снова восстанавливаются, в то время как в смазках с волокнистой дисперсной фазой наблюдается разрушение как дисперсионной (связи между волокнами), так и кристаллизационной (связи внутри волокон) структуры ДФ. В результате подобной деградации волокнистой дисперсной фазы теряется ее загущающая способность, ухудшается маслоудержание, снижаются тиксотропные свойства пластичной смазки.

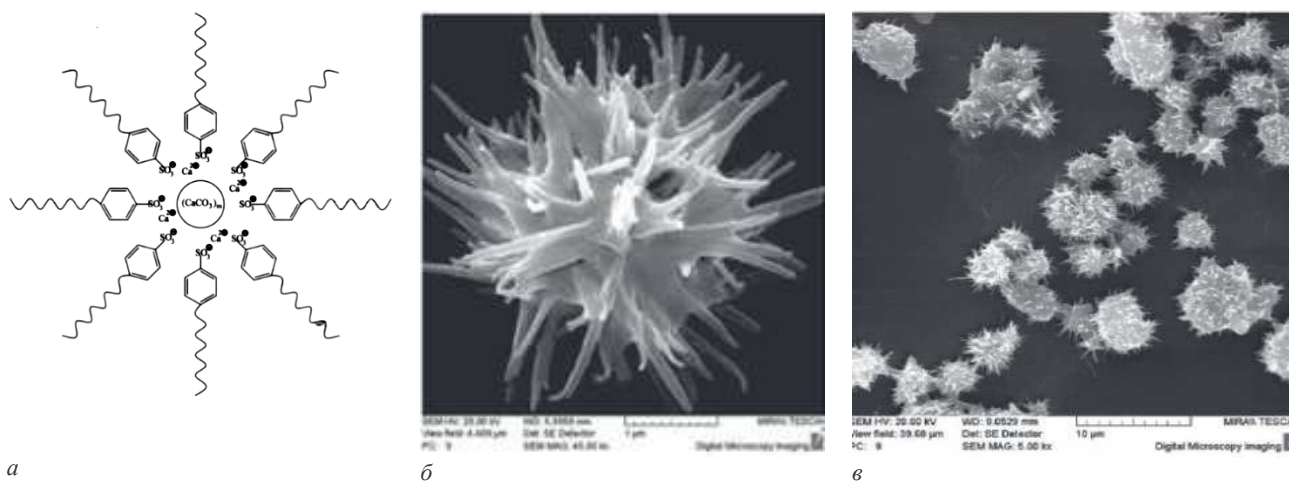


Рисунок 3. – Структура молекулы сверхщелочного сульфата кальция⁸ (а), единственный элемент (б) и пространственное строение ДФ (в) комплексной сульфат кальциевой смазки

Многочисленные мицеллы, образующиеся благодаря амфифильности оболочки, позволяют лучше удерживать масло в структуре ПСМ, что улучшает коллоидную стабильность сульфат кальциевой смазки, при этом не снижая заметно ее смазывающей способности. Водостойкость сульфат кальциевой смазки также взаимосвязана с этой особенностью структуры. В отличие, например, от литиевых смазок, в которых литиевые мыла под воздействием воды начинают вымываться (вода разрушает взаимосвязь волокон)⁸, сульфатные

⁷ Биоразлагаемая пластичная смазка и способ ее получения : решение о выдаче патента Респ. Беларусь от 12.11.2021 по заявке № а20200310 от 06.11.2020 / В.И. Жорник, А.В. Запольский, А.В. Ивахник, В.П. Ивахник.

⁸ Ивахник, А.В. Пластичные смазочные материалы на основе бинарной дисперсной фазы повышенной нагрузочной способности : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.09 / А.В. Ивахник. – Минск, 2014. – 190 л.

смазки за счет амфифильности не размываются водой, а «впитываая» ее в себя (до 10 об.%), уплотняют узел трения и при этом не теряют смазочной способности. Антикоррозионные свойства кальцита в определенной степени нивелируют воздействие воды на металл, а молекулы кальцита «схватываются» с металлом, обеспечивая куда более сильное удержание смазки на поверхности трения по сравнению с загустителями других типов. Частицы кальцита при температурном воздействии (вплоть до 250 °С) не разрушаются, поэтому смазка имеет очень высокие показатели температуры каплепадения и, соответственно, рабочих температур.

Преимуществом технологических процессов получения БПСМ со смешанной дисперсионной средой, реализуемых по схеме⁹, является резкое снижение негативного влияния воды на растительное масло, сокращение общей продолжительности варки и, соответственно, уменьшение энергозатрат.

В таблице 1 приведены сравнительные данные пластичных смазок, изготовленных с применением дисперсионной среды из смеси минерального и растительного масел при гетерогенных загустителях (смазка OIMOL CL BIO на литий-кальциевом и смазка OIMOL KSC BIO на комплексном сульфат кальциевом загустителе) в сравнении с биоразлагаемой смазкой СОЛИДОЛ БИО и синтетическим солидолом (Солидол С), содержащими различные виды одинарного кальциевого загустителя.

Анализируя данные, приведенные в таблице 1, можно сделать следующие выводы. Введение растительных масел для пластичных смазок с гетерогенной дисперсной фазой практически не оказывает влияния на их температуру каплепадения, которая остается на уровне выше 200 °С (для сравнения температура каплепадения комплексной сульфат кальциевой смазки OIMOL KSC WR 2 с чисто минеральной дисперсионной средой (масло И-40А) соответствует 230 °С [14]). При этом у смазки СОЛИДОЛ БИО температура каплепадения выше на 30 °С температуры каплепадения смазки Солидол С в связи с тем, что дисперсная фаза смазки СОЛИДОЛ БИО имеет другую природу, свойственную безводным кальциевым смазкам, по сравнению с гидратированной кальциевой смазкой Солидол С. С этим также связано и отсутствие содержания воды в смазке СОЛИДОЛ БИО в отличие от Солидола С, где ее содержание составляет 2–3 масс.%, и она технически необходима для структурообразующих целей.

Таблица 1. – Сравнительная характеристика пластичных смазок, полученных с использованием различных дисперсионных сред и загустителей

Наименование показателя	Пластичные смазки			
	Солидол С	СОЛИДОЛ БИО	OIMOL CL BIO	OIMOL KSC BIO
Тип загустителя	кальциевый гидратированный	кальциевый безводный	литий-кальциевый	сульфат кальциевый комплекс
Температура каплепадения, °С	85	115	205	225
Пенетрация, 10 ⁻¹ мм	290	265	280	265
Коллоидная стабильность, %	8	8	5	4
Критическая нагрузка, Н	980	1098	1098	2520
Нагрузка сваривания, Н	1620	1960	1960	6200
Показатель износа, мм	0,63	0,61	0,50	0,41
Содержание воды, %	2–3	отсут.	отсут.	отсут.
Биоразлагаемость, %	15	80	83	81

Более высокая нагрузочная способность (критическая нагрузка 2520 Н, нагрузка сваривания 6200 Н), повышенная термическая стойкость (температура каплепадения 225 °С), улучшенная коллоидная стабильность (3%) пластичной смазки с комплексным сульфат кальциевым загустителем обусловлены специфичным строением ее гетерогенной дисперсной фазы, представляющей собой совокупность частиц термически стойкого нанокальцита в стабилизирующей оболочке из амфифильных жидкокристаллических полимеров. Биоразлагаемость БПСМ с гетерогенной и одинарной дисперсной фазой находится на уровне 80–83%, что, например, в 5,5 раза выше биоразлагаемости смазки Солидол С.

Разработка оборудования для получения пластичных смазок. Для проведения цикла исследований по отработке компонентных составов и режимов получения биоразлагаемых ПСМ, а также организации их промышленного выпуска было разработано и изготовлено два варианта технологического оборудования: лабораторное и промышленное. Оборудование для производства ПСМ должно обеспечивать завершение реакционных процессов в течение минимально возможного промежутка времени с получением однородного продукта. Как правило, на практике реакторы для синтеза ПСМ отличаются многообразием конструкции и обычно приспособлены под конкретную номенклатуру и объем производства. В то же время на основе анализа имеющихся данных выработаны основные требования, которым должен удовлетворять лабораторный реактор для получения ПСМ⁹:

⁹ Биоразлагаемая пластичная смазка и способ ее получения : решение о выдаче патента Респ. Беларусь от 12.11.2021 по заявке № а20200310 от 06.11.2020 / В.И. Жорник, А.В. Запольский, А.В. Ивахник, В.П. Ивахник.

соотношение диаметра реактора к его высоте – 2 : 3;

форма дна реактора – округлое с конической вставкой перед горловиной насоса;

вид нагревателя – электрический трехсекционный (две секции на стенках реактора, одна на днище);

тип мешалки – лопастная;

тип насоса – шестеренный;

тип диспергатора – гидродинамический проточный;

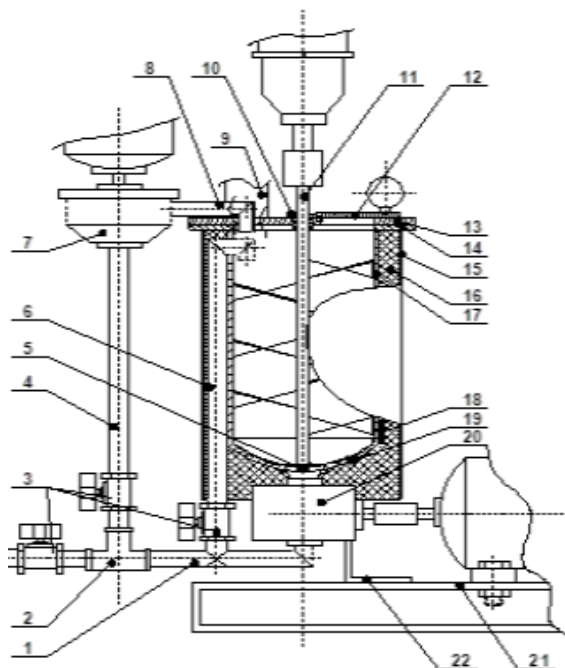
схема соединения диспергирующего и циркуляционного контуров – байпас;

тип фильтра – проточный сетчатый;

способ управления режимом синтеза – посредством цифрового измерителя-регулятора с подключением к компьютеру;

вид вентиляции – местная и общая.

Лабораторное оборудование отвечает всем требованиям к технологическому оборудованию для производства ПСМ и полностью моделирует промышленные установки. На рисунке 4 представлена схема и общий вид лабораторной установки УПСМ-10, предназначенной для отработки компонентного состава и технологических режимов получения БПСМ.



a



б

- 1 – разводная трубка; 2 – тройник; 3 – вентиль; 4 – контур диспергирования; 5 – опорный узел, 6 – контур циркуляции; 7 – диспергатор; 8 – трубка, 9 – местный отсос; 10 – сальник; 11 – мешалка; 12 – крышка реактора; 13 – верхняя пластина; 14 – нижняя пластина; 15 – кожух; 16 – теплоизоляция; 17 – стенка котла; 18 – нагреватель; 19 – термopара; 20 – шестеренный насос; 21 – станина установки; 22 – опора насоса

Рисунок 4. – Схема (*a*) и общий вид (без защитного кожуха) (*б*) лабораторной установки УПСМ-10

Реактор установки УПСМ-10 снабжен мешалкой, смонтированной на опорном подшипнике, установленном на днище, и подшипнике, расположенном в крышке реактора. Опорный подшипник находится в крестовине, размещенной над горловиной шестеренного насоса НШ-25. Сложно-профильная мешалка приводится в движение червячным мотор-редуктором через быстроразъемную муфту. Лопасты мешалки обеспечивают нагнетание реакционной массы к насосу, что предотвращает его завоздушивание. Реактор снабжен хомутовыми миканитовыми электронагревателями, укрытыми теплоизоляцией и защитным кожухом. Для циркуляции и выгрузки продукта реактор снабжен циркуляционным контуром, образованным шестеренным насосом, набором трубок и вентилялей. На крышке имеется патрубок для местного отсоса паров. Для диспергирования компонентов реакционной массы имеется подключенный к циркуляционному контуру по системе байпас диспергирующий контур с размещенным в нем проточным диспергатором типа НДЛ 000РЭ1, в котором реализуется эффект кавитации с возможностью диспергирования компонентов реакционной массы до наноразмерного уровня. Для контроля и регулирования температуры реактор обеспечен двумя термopарами, установленными на стенке котла и в горловине насоса. Управление температурно-временными параметрами процесса синтеза ПСМ осуществляется с помощью прибора регулирования температуры типа OWEN TRM-251. Техническая характеристика установки УПСМ-10 приведена в таблице 2.

Таблица 2. – Техническая характеристика лабораторной установки УПСМ-10

Наименования показателя	Значение
Объем реактора, л	10
Скорость вращения мешалки, об/мин	60
Привод мешалки, кВт	0,75
Тип насоса	НШ-25
Параметры привод насоса	1500 об/мин, 0,75 кВт
Мощность нагревателя, кВт	1,2
Максимальная температура в реакторе, °С	250
Точность регулирования температуры	1 – 2 °С
Диспергатор	НДЛ 000РЭ1, 3000 об/мин, 2 кВт

С целью организации промышленного производства на предприятии ООО «Евразия Лубрикантс» организован и введен в эксплуатацию участок по выпуску пластичных смазочных материалов мощностью до 3000 т/год, в т.ч. биоразлагаемых до 100 т/год. Участок площадью 300 м² оснащен системами электропитания мощностью 800 кВт, водоснабжения и приточно-вытяжной вентиляции. На участке смонтирована промышленная установка, включающая 5 реакторов-смесителей РС 2200-04/18, объединенных единой эстакадой, а также имеется технологический модуль для подготовки модифицированных компонентов гетерогенной дисперсной фазы РС 200-01/18 (рисунок 5).



а



б

Рисунок 5. – Технологический модуль РС 200-01/18 для подготовки компонентов (а) и участок по производству биоразлагаемых смазочных материалов на базе реактора-смесителя РС 2200-04/18 (б)

Технические характеристики технологического модуля РС 200-01/18 и реактора-смесителя РС 2200-04/18 приведены в таблице 3.

Для дозирования сыпучих сырьевых компонентов обустроено специальное помещение, имеются также три фасовочные линии готовой продукции. Участок предназначен для промышленного производства широкого спектра пластичных смазочных материалов с использованием дисперсионных сред растительного и минерального происхождения на различных типах загустителя (литиевый, кальциевый, литиево-кальциевый, сульфонат кальциевый и др.), в том числе биоразлагаемых пластичных смазок OIMOL CL BIO (ТУ BY 190410065.021-2020) по технологическому процессу № 01101.00021 «Изготовление биоразлагаемой пластичной смазки OIMOL CL BIO» и OIMOL KSC BIO (ТУ BY 190410065.023-2021) по технологическому процессу № 01101.00023 «Изготовление биоразлагаемой пластичной смазки OIMOL KSC BIO».

На предприятии ОДО «Спецсмазки» организован и введен в эксплуатацию участок по производству биоразлагаемых пластичных смазочных материалов мощностью до 50 т/год, оснащенный необходимым комплексом технологического оборудования. Участок предназначен для малотоннажного производства биоразлагаемых пластичных смазочных материалов, в т.ч. пластичных смазок OIMOL CL BIO, OIMOL KSC BIO, СОЛИДОЛ БИО (ТУ BY 190410065.022-2020) по технологическому процессу № 01101.00022 «Изготовление биоразлагаемой пластичной смазки СОЛИДОЛ БИО» и ИТМОЛ-150 БИО (ТУ BY 190410065.024-2022) по технологическому процессу № 01101.00024 «Изготовление биоразлагаемой пластичной смазки ИТМОЛ-150 БИО».

Таблица 3. – Технические характеристики реактора-смесителя РС 2200-04/18 и технологического модуля РС 200-01/18

Наименование показателя	Вид оборудования	
	модуль РС 200-01/18	реактор РС 2200-04/18
Объем реакционной камеры, л	200	2500
Электрическая мощность приводов, кВт	1,5	7,5
Вид нагревательной системы	ТЭН	керамические
Мощность системы нагрева, кВт	10	120
Система управления параметрами синтеза:	регулятор температуры; уровень диспергирования	регулятор температуры; уровень диспергирования; технологический цикл
Точность регулирования температуры, °С	±0,5	±1,0
Система диспергирования компонентов	проточный диспергатор	проточный диспергатор
Вид фильтрующей системы	сетчатый фильтр	сетчатый фильтр
Масса, кг	240	1400
Габариты, ВхШхД, м	1,8x1,5x1,0	3,5x1,75x2,0

Выпускаемые биоразлагаемые пластичные смазки предназначены для применения в узлах трения лесозаготовительной и сельскохозяйственной техники, карьерного и железнодорожного транспорта, технологического оборудования машиностроительного производства и перерабатывающей промышленности, а также в других отраслях при наличии повышенных требований к уровню реологических и трибологических свойств продукта и его экологической безопасности.

Заключение. Показано, что биоразлагаемые пластичные смазочные материалы целесообразно создавать на базе смеси растительных и минеральных масел (смешанная дисперсионная среда) с выбором определенного соотношения между их содержанием, а также с использованием одинарных и гетерогенных дисперсных фаз, исходя из заданного уровня работоспособности (реологических и трибологических свойств) и требуемой скорости процесса биодеструкции продукта при его утилизации или попадании (случайном либо технологически обусловленном) в окружающую среду. При этом технологический цикл получения пластичной смазки должен обеспечивать минимальное воздействие высоких температур и воды на растительный компонент дисперсионной среды. С целью реализации этого подхода применен способ получения биоразлагаемых мыльных пластичных смазок, в котором щелочной компонент вводится в реакционную массу не в виде традиционно используемого водного раствора, а в составе масляной суспензии. При этом синтез дисперсной фазы протекает в минеральном компоненте дисперсионной среды, а растительное масло добавляется только на стадии охлаждения реакционной массы.

Данный способ проиллюстрирован на примере технологий получения биоразлагаемых пластичных смазочных материалов на кальциевом (смазка СОЛИДОЛ БИО), литий-кальциевом (смазка OIMOL LC BIO) и комплексном сульфат кальциевом (смазка OIMOL KSC BIO) загустителях. В частности, в технологическом процессе получения смазки OIMOL LC BIO в качестве дисперсионной среды используется смесь рапсового масла и минерального масла III группы по стандарту API, а моногидрат гидроксида лития и гидроксид кальция вводятся в базовое масло III группы в виде масляной суспензии и нейтрализуются 12-гидроксистеариновой кислотой с образованием гетерогенной дисперсной фазы, состоящей из стеарата лития и стеарата кальция. Рапсовое масло вводится в реакционную массу на завершающей стадии процесса после формирования гетерогенной дисперсной фазы и удаления имевшейся в связанном виде в моногидрат гидроксида лития воды, подвергаясь только кратковременно высокотемпературному воздействию.

Более высокая нагрузочная способность (критическая нагрузка 2520 Н, нагрузка сваривания 6200 Н), повышенная термическая стойкость (температура каплепадения 225 °С), улучшенная коллоидная стабильность (3%) пластичной смазки на комплексном сульфат кальциевом загустителе OIMOL KSC BIO (по сравнению со смазками с волокнистой кальциевой (смазка СОЛИДОЛ БИО) и литий-кальциевой (смазка OIMOL LC BIO) дисперсной фазой) обусловлены специфичным строением ее гетерогенной дисперсной фазы, представляющей собой совокупность частиц термически стойкого нанокальцита в стабилизирующей оболочке из амфифильных жидкокристаллических полимеров. Биоразлагаемость разработанных БПСМ находится на уровне 80–83%, что, например, в 5,5 раза выше биоразлагаемости смазки Солидол С.

Для отработки компонентного состава и режимов получения, а также серийного выпуска пластичных смазок разработано и изготовлено технологическое оборудование лабораторного (мощность 10 кг/цикл) и промышленного (мощность 200 и 2500 кг/цикл) типа. Отличительной особенностью данного оборудования является наличие в нем подсоединенного к циркуляционному контуру по системе байпас диспергирующего контура с гидродинамическим диспергатором, реализующим эффект кавитации с возможностью диспергирования компонентов реакционной массы до наноразмерного уровня.

Промышленный выпуск биоразлагаемых пластичных смазок на загустителях различного вида (литий-кальциевая смазка OIMOL CL BIO – ТУ ВУ 190410065.021-2020, кальциевая смазка СОЛИДОЛ БИО –

ТУ ВУ 190410065.022-2020, комплексная сульфат кальциевая смазка OIMOL KSC BIO – ТУ ВУ 190410065.023-2021, комплексная литиевая смазка ИТМОЛ 150 БИО – ТУ ВУ 190410065.024-2022) организован на предприятиях ООО «Евразия Лубрикантс» (мощность участка до 100 т/год и ОДО «Спецсмазки» (мощность участка до 50 т/год). Выпускаемые биоразлагаемые пластичные смазки предназначены для применения в узлах трения лесозаготовительной и сельскохозяйственной техники, в карьерном и железнодорожном транспорте, в технологическом оборудовании в машиностроении и перерабатывающей промышленности и в других отраслях при условии повышенных требований к уровню реологических и трибологических свойств и показателей экологической безопасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Деревяго, И.П. Концепция «зеленой экономики» и возможности ее реализации в условиях Республики Беларусь / И.П. Деревяго // Белорус. экон. журн. – 2017. – № 1. – С. 24–37.
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. Fessenbecker, A. Additives for environmentally acceptable lubricant / A. Fessenbecker, I. Roehrs, R. Pegnoglou // NLGI Spokesman : Journal of the National Lubricating Grease Institute. – 1996. – No. 6(60). – P. 9–25.
4. Rhee, I. 21st century military biodegradable greases / I. Rhee // NLGI Spokesman: Journal of the National Lubricating Grease Institute. – 2000. – No. 1(64). – P. 8–17.
5. Состояние и перспективы развития производства биоразлагаемых пластичных смазок (обзор) / О.П. Паренаго [и др.] // Нефтехимия. – 2017. – № 6. – С. 766–768.
6. Запольский, А.В. Биоразлагаемые смазочные материалы – важнейший продукт смазочной индустрии будущего / А.В. Запольский // Новая экономика. – 2018. – № 1. – С. 226–229.
7. Dhorali, G. Vegetable Oil based Bio-lubricants and Transformer Fluids. Applications in Power Plants / G. Dhorali, P.C. Venkata. – East, Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2018. – 152 p.
8. Kato, N. Lubrication life of biodegradable greases with rapeseed oil base / N. Kato // Lubr. Eng. – 1999. – No. 8(55). – P. 19–25.
9. Gnanasekaran, D. Vegetable Oil based Biolubricants and Transformer Fluids: Applications in Power Plants / D. Gnanasekaran, V.P. Chavadi. – Springer Nature Pte. Ltd., 2018. – 155 p.
10. Трибологические особенности экологически чистых смазочных композиций на основе рапсового масла / С.Ф. Ермаков [и др.] // Трение и износ. – 2019. – Т. 40, № 2. – С. 245–252.
11. Ищук, Ю.Л. Состав структура и свойства пластичных смазок / Ю.Л. Ищук. – Киев : Наук. думка, 1996. – 510 с.
12. О'Брайен, Р.Д. Жиры и масла. Производство, состав и свойства, применение / Р.Д. О'Брайен. – СПб. : Профессия, 2007. – 751 с.
13. Жорник, В.И. Биоразлагаемые пластичные смазки общетехнического назначения / В.И. Жорник, А.В. Запольский, А.В. Ивахник // Актуальные вопросы машиноведения : сб. науч. тр. / ОИМ НАН Беларуси. – 2021. – Вып. 10. – С. 295–301.
14. Жорник, В.И. Структура и свойства комплексной сульфат кальциевой смазки / В.И. Жорник, А.В. Ивахник, В.П. Ивахник, А.В. Запольский // Механика машин, механизмов, материалов. – 2018. – № 1(42). – С. 44–50.

REFERENCE

1. Derevyago, I.P. (2017). Konceptsiya «zelenoj ekonomiki» i vozmozhnosti ee realizacii v usloviyah Respubliki Belarus' [Concept of «green economy» and the possibilities of its implementation in the conditions of the Republic of Belarus]. *Belorusskij ekonomicheskij zhurnal [Belarusian Economic Journal]*, 1, 24–37. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Evdokimov, A.Yu., Fuks, I.G., & Lyubinini, I.A. (2012). *Smazochnye materialy v tekhnosfere i biosfere: ekologicheskij aspekt [Lubricants in the technosphere and biosphere: environmental aspect]*. Kiev: Atika-N. (in Russ.).
3. Fessenbecker, A., Roehrs, I., & Pegnoglou, R. (1996). Additives for environmentally acceptable lubricant. *NLGI Spokesman*, 6(60), 9–25. (In Engl.).
4. Rhee, I. (2000). 21st century military biodegradable greases. *NLGI Spokesman*, 1(64), 8–17. (In Engl.).
5. Parenago, O.P., Safieva, R.Z., Antonov, S.V., & Stenina, N.D. (2017). Sostoyanie i perspektivy razvitiya proizvodstva biorazlagaemyh plastichnyh smazok (obzor) [State and prospects for the development of the production of biodegradable plastic lubricants (review)]. *Neftekhimiya [Petrochemistry]*, 6, 766–768. (in Russ.).
6. Zapol'skij, A.V. (2018). Biorazlagaemye smazochnye materialy – vazhnejshij produkt smazochnoj industrii budushchego [Biodegradable lubricants are the key to the lubricant industry of the future]. *Novaya ekonomika [New Economy]*, 1, 226–229. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Dhorali, G., & Venkata, P.C. (2018). *Vegetable Oil based Bio-lubricants and Transformer Fluids. Applications in Power Plants*. East, Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd. (In Engl.).
8. Kato, N. (1999). Lubrication life of biodegradable greases with rapeseed oil base. *Lubrication Engineering*, 8(55), 19–25. (In Engl.).
9. Gnanasekaran, D., & Chavadi, V.P. (2018). *Vegetable Oil based Biolubricants and Transformer Fluids: Applications in Power Plants*. Springer Nature Pte. Ltd. (In Engl.).
10. Ermakov, S.F., Chmyhova, T.G., Timoshenko, A.V., & Shershnev, E.B. (2019). Tribologicheskie osobennosti ekologicheski chistyh smazochnyh kompozicij na osnove rapsovogo masla [Tribological features of environmentally friendly lubricating compositions based on rapeseed oil]. *Trenie i iznos [Friction and wear]*, Vol. 40, 2, 245–252. (In Russ., abstr. in Engl.).
11. Ishchuk, Yu.L. (1996). *Sostav struktura i svojstva plastichnyh smazok [Composition structure and properties of greases]*. Kiev: Navukovaya dumka. (in Russ.).
12. O'Brien, R.D. (2007). *Zhiry i masla. Proizvodstvo, sostav i svojstva, primeneniye [Fats and oils. Production, composition and properties, application]*. Saint-Petersburg: Professiya. (in Russ.).

13. Zhornik, V.I., Zapol'skij, A.V., & Ivahnik, A.V. (2021). Biorazlagaemye plastichnye smazki obshchetekhnicheskogo naznacheniya [Biodegradable greases of general technical purpose]. *Aktual'nye voprosy mashinovedeniya [Actual issues of machine science]*, 10, 295–301. (In Russ., abstr. in Engl.).
14. Zhornik, V.I., Ivahnik, A.V., Ivahnik, V.P., & Zapol'skij, A.V. (2018). Struktura i svoystva kompleksnoj sul'fonat kal'cievoj smazki [Structure and properties of complex calcium sulfonate lubricant]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov, materialov [Mechanics of machines, mechanisms, materials]*, 1(42), 44–50. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 11.12.2022

TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT FOR PRODUCTION BIODEGRADABLE GREASES

V. ZHORNIK, A. ZAPOLSKY, A. IVAKHNIK, A. DUDAN

It is shown that it is advisable to create the biodegradable greases (the BG) on the basis of the mixture of the vegetable and mineral oils (the mixed dispersion medium) with the choice of the certain ratio between their content, as well as using the single or heterogeneous dispersed phases, based on a given level of the performance of the BG (the rheological and tribological properties) and the required transience of the biodegradation process of the product. At the same time the technological cycle of the obtaining of the greases should ensure the minimal influence of the high temperature and water on the vegetable component of the dispersion medium. For the purpose of the implement of this approach the producing method of the biodegradable soap greases has been applied, in which the alkaline component is introduced into the reaction mass not in the form of the traditionally used aqueous solution, but as the part of the oil suspension. This technological technique is illustrated by the example of the producing technologies of the BG on the calcium (the grease СОЛИДОЛ БИО), lithium-calcium (the grease OIMOL LC BIO) and complex calcium sulfonate (the grease OIMOL KSC BIO) thickeners. The rheological and tribological properties of the developed BG are at the level of their analogues made on the basis of mineral oil with the biodegradability of BG approximately 5.5 times higher. The technological equipment of laboratory (capacity 10 kg/cycle) and industrial (capacity 200 and 2500 kg/cycle) types has been developed and manufactured. The distinctive feature of this equipment is the presence in it of the dispersing circuit connected to the circulation circuit via the bypass system and containing the hydrodynamic disperser that implements the cavitation effect with the possibility of the dispersing of the reaction mass components to the nanosized level. The industrial production of the BG on the thickeners of various types (calcium, lithium-calcium, complex calcium sulfonate, complex lithium) has been organized in accordance with the developed technologies.

Keywords: *biodegradable grease, mixed dispersion medium, heterogeneous dispersed phase, technology, equipment, rheological and tribological properties*