**Наименование проекта:** «Развитие энергосберегающих технологий промышленной и транспортной техники путем использования смазочных материалов, способных формировать антифрикционные пленки в узлах трения, за счет снижения коэффициента трения и повышения износостойкости трибосистем»

**Наименование Заказчика** Российский научный фонд

**Номер договора** 18-19-00292 от. 17.04.2018 г.

**Сроки выполнения** 2018 – 2020 гг.

**Руководитель проекта** Доктор технических наук, профессор РАН Колесников Игорь Владимирович

**Аннотация результатов, полученных в 2018 году**

Смазочные материалы обладают многими важными функциями, в частности они снижают износ трущихся деталей, защищают детали машин от коррозии, снижают рабочую температуру, шумы, удаляют частицы износа из зоны контакта, препятствуя, таким образом, абразивному изнашиванию поверхностей, а также понижают коэффициент трения скольжения. В последнем раскрывается энергосберегающая функция смазочных материалов. Понижая силу трения, мы уменьшаем потери энергии на трение, что снижает расход топлива или электроэнергии на функционирование устройства.

Данное исследование посвящено поиску технологий, позволяющих добиться высоких антифрикционных свойств смазочных материалов. К таким технологиям можно отнести процесс формирования на трущихся поверхностях антифрикционных пленок. Эти пленки обеспечивают высокие антифрикционные и, как следствие, энергосберегающие свойства смазочных материалов, однако, их природа и закономерности образования плохо изучены. Образование таких пленок в узлах трения промышленной и транспортной техники позволит получить экономический эффект, выраженный в снижении расхода топлива или энергии, увеличении КПД механизмов и снижении их износа в процессе эксплуатации. В этом состоит актуальность проекта.

Анализ литературных источников показал, что изучению процесса формирования антифрикционных пленок посвящено множество отечественных и зарубежных работ, однако, общего мнения относительно механизма процесса до сих пор не выработано. Все авторы, работающие в данном направлении, отмечают, что природа подобных пленок тяжело поддается изучению из-за влияния множества различных факторов, но при этом они сходятся во мнении о превалирующей роли химических факторов (взаимодействий).

В иностранных научных работах по данной тематике в настоящее время акцент делается на изучении механизмов процессов, приводящих к образованию поверхностных пленок, в то время как отечественные работы в основном посвящены исследованию триботехнических свойств пленок в конкретных узлах трения, где они формируются. Наибольшей распространенностью пользуется подход, обосновывающий окисление органических соединений на металлических поверхностях трущихся тел и последующую конденсацию продуктов реакций окисления, что приводит к образованию так называемых "полимеров трения". Однако и этот подход не вскрывает все многообразие процессов, протекающих в зоне фрикционного контакта в присутствии смазочного материала. Научная новизна проекта заключается в исследовании механизма образования антифрикционных пленок в экологически чистых смазочных материалах. Практическая значимость проекта состоит в научно-обоснованном поиске новых функциональных добавок, способных влиять на формирование и функционирование антифрикционных пленок.

В качестве смазочных сред нами изучены подсолнечное масло, сложные эфиры дикарбоновых кислот - диоктилсебацинат, диоктиладипинат. В качестве добавок изучены диэтилмалонат (малоновый эфир), ацетоуксусный эфир, ацетилацетон, дикарбоновые кислоты.

В ходе проведенных исследований нами было обнаружено, что смазочные материалы на основе сложных эфиров склонны к образованию на поверхностях трения особых пленок, обладающих антифрикционным эффектом в узле трения. Обнаружено, что окончательная стабилизация коэффициента трения в случае образования этих пленок в условиях работы машины достигается в течение 4-5 часов после начала испытания. Последующие испытания показали, что использование некоторых органических соединений в качестве присадок к сложноэфирным маслам позволяет ускорить время выхода системы на стабильный режим трения, не допуская интенсивного разогрева и, как следствие, процессов деструкции смазочного материала. Об образовании антифрикционных пленок на поверхностях трения свидетельствует заметное (до 8 раз) снижение по сравнению с начальной величиной коэффициента трения.

Установлено, что добавка в подсолнечное масло или диоктилсебацинат диэтилмалоната значительно уменьшает начальное значение коэффициента трения и время выхода на режим, только при относительно низких концентрациях. Эффект присадки начинает проявляться уже при концентрации 0,1 % и достигает максимума при содержании 0,5 % диэтилмалоната в смазочной среде. Более высокие концентрации постепенно ухудшают антифрикционные свойства смазочного материала, а при содержании диэтилмалоната более 1 % на трибограммах обнаруживается характерное повышение коэффициента трения («холм»), высота которого увеличивается с увеличением содержания диэтилмалоната.

Поведение таких присадок как ацетоуксусный эфир и ацетилацетон в смазочных средах имеют похожие закономерности. Однако, из-за высокой химической активности этих добавок по отношению к стальной поверхности их избыток может приводить к удалению слоя оксидной пленки на металле и вызывать задир. Было обнаружено, что на процесс формирования поверхностной антифрикционной пленки также оказывают сильное влияние и дикарбоновые кислоты, несмотря на их низкую растворимость в подсолнечном масле. Добавка 0,05 % малоновой кислоты оказывает эффект идентичный высоким (2-5 %) концентрациям диэтилмалоната. При этом наблюдается стабильно высокий (0,1) коэффициент трения. Этот факт связан со способностью обоих соединений образовывать комплексы с железом, которые в случае кислоты получаются легче из-за воздействия кислых протонов групп -СООН на оксидную пленку металла. Добавление в подсолнечное масло 0,05 % других дикарбоновых кислот (щавелевой, янтарной, адипиновой, азелаиновой) также приводит к стабильно высоким коэффициентам трения. При этом антифрикционная пленка не образуется.

Установлено, что процесс образования антифрикционной пленки начинается с механоактивации молекул смазочной среды, в результате которой генерируются "строительные блоки", из которых формируется антифрикционная пленка. Далее протекают термоактивированные процессы структурирования пленки. Более подробно эти процессы будут изучены при выполнении работ при дальнейшей реализации проекта.

Изучение изменений, происходящих на поверхностях трения в среде смазочных материалов, производили при помощи методов ИКС НПВО, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, растровой электронной микроскопии. Для этих исследований подготавливали образцы на разных стадиях формирования антифрикционных пленок.

Комбинированный метод исследования пленок вторичных поверхностных структур, основанный на совместном применении рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и ИК-Фурье НПВО спектроскопии, позволяет получать информацию о входящих в состав антифрикционной пленки органических и неорганических компонентах. Метод ИК-спектроскопии широко применяется для определения изменений, протекающих в органических молекулах, в процессе их химического превращения.

Анализ спектров полученных с дорожки трения не подтверждает образование связи C-O-Fe, на которые указывают авторы некоторых иностранных работ. Вместе с тем данные рентгеноэлектронной спектроскопии указывают на частичное отсутствие слоя оксидной пленки на металле в участке дорожки трения, покрытом антифрикционной пленкой. Данное обстоятельство позволяет предположить, что формирование пленки происходит на участках ювенильной поверхности металла, где она собой заменяет оксидный слой. Поскольку антифрикционная пленка является весьма плотной, она предотвращает образование оксидного слоя на железе, что также было подтверждено методом рентгеноэлектронной спектроскопии. Таким образом, совмещенный метод ИК и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии позволил предположить, что удаляемый слой оксида железа интерколируется в состав антифрикционной пленки непосредственно в форме оксида без образования «металлоорганического соединения». Это предположение также подтверждается и фактом магнитной восприимчивости частиц износа, образуемых при трении, а также общей нестихиометричностью содержания железа и органических компонентов в структуре пленки, которые были установлены нами методами термогравиметрии и фотоколориметрии.

Анализ спектров ИК-Фурье НПВО показал, что антифрикционная пленка, сформированная в среде подсолнечного масла, не является продуктом его окисления и последующего высыхания. Вместе с тем в спектре пленки явно выражены изменения сигналов, отвечающих за колебания связей С-О и С=О, что может свидетельствовать об образовании пленки на поверхности трения через реакции карбонильной группы молекул сложных эфиров.

Значительное содержание железа в оксидной форме подтвердилось также и по результатам дифференциального термогравиметрического анализа. Кривая дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК), показывающая тепловые характеристики исследуемого образца в зависимости от температуры в инертной атмосфере, позволяет анализировать фазовые переходы и химические реакции в исследуемом образце, а встроенные датчики измерения массы фиксируют происходящие при этом изменения массы пробы. Так как антифрикционную пленку очень сложно отделить от поверхности трения, исследованию подвергали частицы износа, образованные в смазочной среде диоктилсебацината. Частицы износа, образованные при трении в среде сложных эфиров отличаются от частиц износа, полученных в минеральных маслах. Такие частицы черного цвета, не имеют металлического блеска, характерного для частиц износа образованных, например, в вазелиновом масле. Кроме того, частицы износа в сложноэфирных лубрикантах образуют объемные осадки или взвеси в растворе. Таким образом, частицы износа, сформированные в смазочных средах сложных эфиров, являются удаленной с поверхностей трения антифрикционной пленкой. Дифференциальному термогравиметрическому анализу подвергались пробы чистого сложноэфирного лубриканта, а также частицы износа, сформированные в соответствующем смазочном материале, предварительно отделенные, промытые растворителем от смазочного материала и высушенные. На кривых ДСК чистых смазочных материалов имеется только один пик, соответствующий кипению жидкости, при этом масса пробы после испытания равна нулю. При анализе частиц износа кроме пика, характерного для кипения чистого смазочного материала, присутствует еще несколько дополнительных пиков - в интервале от 400 до 500° С, что соответствует температуре пиролиза нелетучих органических соединений. При температуре 620° С наблюдается еще более выраженный пик, соответствующий реакции частичного восстановления оксида железа углеродом, полученным в результате пиролиза. Высокая интенсивность отмеченных пиков указывает именно на химические процессы, а не на фазовые переходы, которые идут с гораздо меньшими тепловыми эффектами. Результаты дифференциального термогравиметрического анализа показали наличие нелетучих органических соединений, которые образуются при трении из молекул смазочной среды. Эти соединения значительно превосходят по молекулярной массе исходные молекулы, то есть являются либо олигомерными, либо полимерными образованиями.

**Публикации за 2018 год:**

1. В.И. Колесников, С. Ф. Ермаков, И.В. Колесников, А.П. Сычев Об экранирующем действии этаноламинов и холестерических жидкокристаллических наноматериалов при фрикционном взаимодействии металлов в пластичных смазках // Трение и износ. 2019. Т.40. №1. С. 12-17.

2. Kolesnikov I.V., Lebedinskii K.S., Boiko M.V. Investigation of the effect of some organic compounds on the formation of an antifriction film in a dioctyl sebacate medium // MATEC Web of Conferences. 2018. V. 226, 03025. DOI: 10.1051/matecconf/201822603025

**Аннотация результатов, полученных в 2019 году**

При выполнении плана 2018 года было обнаружено, что содержание железа в антифрикционных пленках исключает наличие стехиометрического полимерного соединения со связями Fe-O-C. Однако в современной литературе имеются данные об участии некоторых переходных металлов в процессах образования вторичных поверхностных структур. Начало таким работам было положено Д.Н. Гаркуновым открытием явления «избирательного переноса», с которым связаны такие процессы как трибосинтез комплексных соединений, их трибокоординация и ассоциация в молекулярные пленочные структуры, обладающие свойством самовосстановления.

Для изучения влияния соединений переходных металлов на процессы образования поверхностных антифрикционных пленок нами проведены исследования смазочных материалов, содержащих комплексные соединения кобальта, меди, никеля и железа.

Исследовано влияние иона металла в составе комплекса на триботехнические характеристики смазочного материала. Для этого была изучена серия комплексных соединений, имеющих одинаковую органическую часть (лиганды), но разный металл, входящий в состав комплекса - ацетилацетонаты меди, никеля, кобальта и железа.

Изучено влияние лиганда в составе комплекса на триботехнические характеристики смазочного материала. Для этого были изучены комплексные соединения, содержащие одинаковый металл, но различную органическую часть - ацетилацетонат меди, оксихинолят меди, тетраэтилтиурамдисульфид меди.

Сопоставление трибологических свойств присадок с энергиями связей металла и органической части, установленных методом РФЭС, показало, что с уменьшением прочности связи эффективность комплексных соединений растет. При трении происходит разрушение комплексов в зоне трибоконтакта. Образующиеся частицы взаимодействуют с поверхностями трения и со смазочным материалом.

В 2018 году было обнаружено, что при трении стальных тел в среде диоктилсебацината на поверхностях трибосопряжения образуется пленка, о формировании которой свидетельствует заметное (до 2-3 раз) снижение коэффициента трения. Нами изучено формирование вторичных поверхностных структур при трении в смазочном материале содержащем диоктилсебацинат совместно с холестериловыми эфирами капроновой и олеиновой кислот.

Проведенные трибологические испытания на торцевой машине трения показали, что добавление холестериловых эфиров капроновой и олеиновых кислот в диоктилсебацинат приводит к более быстрому снижению и меньшей величине коэффициента трения в устоявшемся режиме. При этом поверхностная пленка формируется только из молекул диоктилсебацината. В то же время холестериловые эфиры способны к планарной ориентации на поверхностях трения, что обуславливает образование в зоне трибоконтакта слоистых структур, что обеспечивает дополнительное снижение коэффициента трения и повышение энергосберегающих свойств смазочного материала. Данный эффект достигается за счет реализации в зоне трения мезоморфного состояния смазочного материала, которое характеризуется упорядоченным ориентированным расположением молекул мезогенной присадки.

Изучено влияние наноразмерных частиц на процессы, происходящие при образовании поверхностных пленок в диоктилсебацинате и вазелиновом масле. В эти масла добавляли наночастицы некоторых металлов, оксидов металлов и кремния в количестве 0,1-0,5%.

Установлено, что при трении в маслах, модифицированных наночастицами оксидов цинка, алюминия, кремния и титана, происходит уменьшение шероховатости поверхностей трибосопряжения, что приводит к снижению коэффициента трения. Эффект от легирования масел наночастицами связан со сглаживанием микрорельефа дорожки трения в результате их абразивного воздействия, которое зависит от твердости изученных веществ. Частицы с большей твердостью эффективны при низких нагрузках, а с меньшей - при высоких.

Современные представления о формировании поверхностных пленок при трении базируются на концепции взаимодействия смазочного материала с кислородом окружающей среды и полимеризации продуктов окисления.

Результаты трибологических исследований, полученные при выполнении плана 2018 года, показали, что процессы механоактивации, приводящие к образованию антифрикционной пленки, наиболее интенсивно протекают в первые минуты эксперимента. Это значит, что за столь короткий промежуток времени в смазочной среде должно накопиться достаточное количество продуктов реакции, которые должны вступить в реакции конденсации и образовать антифрикционную пленку. В тоже время известно, что для окисления сложных эфиров требуется большие промежутки времени (часы) и повышенные температуры (более 100° С).

Для того чтобы разрешить обнаруженные противоречия нами методом ИК-спектроскопии НПВО изучена кинетика формирования поверхностной пленки в среде подсолнечного масла и диоктилсебацината.

Для изучения закономерностей изменения химических связей при образовании поверхностных пленок в среде рафинированного подсолнечного масла нами была проведена серия трибологических испытаний различной продолжительности при нагрузке 2МПа.

Экспериментально установлено, что наибольшие изменения полос поглощения в ИК-спектрах наблюдаются в первые 20 секунд трения. Спектры поверхностей трения, сформированных при более продолжительных временах испытаний совпадают со спектром после 20 секунд трения. Это позволяет сделать вывод, что основные химические реакции, приводящие к образованию антифрикционной пленки, протекают на поверхности трения в первые секунды трибологических испытаний. В то время как дальнейшая стабилизация коэффициента трения, вероятнее всего, вызвана процессами структурирования, протекающими в антифрикционной пленке.

В спектре пленки по сравнению с исходным маслом явно выражено снижение интенсивности колебаний связей С=О и увеличение интенсивности колебаний связей С-Н.

Аналогичные зависимости наблюдали при изучении кинетики образования поверхностной пленки в среде диоктилсебацината, где наибольшие изменения в спектрах происходили в первые 40 секунд трения.

Таким образом, процессы окисления смазочного материала не могут быть ответственными за формирование вторичных поверхностных структур при трении в сложноэфирных смазочных средах. Данный результат является принципиально новым в науке о смазочных материалах и ставит вопрос о необходимости уточнения имеющихся в настоящее время представлений о формировании поверхностных пленок при трении.

Методом РФЭС был исследован элементный состав поверхностей трения, сформированных в среде растительного и минерального масел в присутствии добавок комплексных соединений кобальта, меди и никеля. Исследовались исходные поверхности трения, а также поверхности, полученные после травления ионами аргона в течение 5 мин, 10 мин и 15 мин соответственно.

Установлено, что на поверхности стали при трении происходит образование пленок переноса, зарегистрированных нами по C1s, O1s спектрам. На поверхности стали атомы железа находятся в не окисленном состоянии.

**Публикации за 2019 год:**

1. Boiko M.V., Kolesnikov I.V., Boiko T.G., Bicherov A.A. Kinetics of Antifriction Film Formation in Sunflower Oil // Journal of Friction and Wear. 2019. V. 40. I. 6. P. 532-535. DOI: 10.3103/S1068366619060060

2. Boiko M.V., Nikogosov M.V., Ponomarenko A.G. Tests of energy-saving additives to engine oils on gasoline engine stand // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 560. I. 1, 012054. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012054

3. М.В. Бойко, А.П. Сычев, И.В. Колесников, С.Ф. Ермаков, Е.Б. Шершнев Влияние эфиров холестерина на процессы формирования поверхностных антифрикционных пленок // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2019. Т. 20, № 5, с. 235-240.

4. М.В. Бойко, И.В. Колесников, Т.Г. Бойко, А.А. Бичеров Формирование антифрикционной пленки в среде подсолнечного масла Сборник научных трудов "Транспорт: наука, образование, производство" Т.1. Технические науки, Т.1. 2019, с.276-279.

**Аннотация результатов, полученных в 2020 году**

Целью выполнения заключительного этапа работ по проекту было обоснование механизма образования граничных смазывающих пленок. Понимание природы процессов, происходящих при взаимодействии смазочного материала с поверхностью металла, позволит целенаправленно подбирать наиболее эффективные присадки исходя из их химического строения, и управлять образованием граничных пленок.

Исследование морфологии поверхностей трибосопряжения, сформированных в маслах, модифицированных наночастицами оксидов цинка, алюминия, кремния и титана показало уменьшение шероховатости после трения. Изменение триботехнических свойств масел при добавлении наночастиц связано со сглаживанием микрорельефа дорожки трения в результате их абразивного воздействия, которое зависит от твердости изученных веществ. Вещества с большей твердостью эффективны при низких нагрузках, а с меньшей - при высоких.

Методом РФЭС нами исследованы изменения, происходящие при образовании модифицированного поверхностного слоя при трении в синтетических смазочных материалах. Масла обладают способностью изменять прочностные свойства металлических тел трибосопряжения. При трении происходит деструкция смазочного материала. Образующиеся при этом атомы элементов взаимодействуют с металлом, вызывая уменьшение микротвердости, увеличение шероховатости поверхности, что приводит к понижению износостойкости и долговечности узла трения. Протекание таких процессов необходимо учитывать для предотвращения преждевременного выхода из строя деталей машин.

Было установлено, что в образовании граничных смазывающих пленок при трении в среде эфиров пентаэритрита ключевую роль играет неокисленное железо, что очень важно для установления механизма протекающих процессов. Масла на основе органосилоксановых жидкостей формируют вторичные поверхностные структуры на поверхности оксида железа.

Испытания модифицированных масел на стенде с двигателем внутреннего сгорания позволили установить, что энергосберегающие свойства моторных масел можно повысить путем добавления веществ, способствующих формированию на поверхностях трения граничных пленок, обладающих антифрикционными свойствами. При использовании таких модифицированных масел наблюдали снижение расхода топлива на 3,8 – 14,1 % по сравнению с исходным маслом. Экономия топлива при эксплуатации транспорта – одна из важнейших задач современной науки и техники. Снижение потерь на трение внутри двигателя автомобиля лишь на 1%, в результате улучшенной технологии смазки может привести к экономии 1 млрд. литров топлива ежегодно во всем мире.

При образовании граничных пленок улучшаются параметры экологичности работы ДВС – наблюдается снижение объемных долей СО и СН в выхлопных газах.

Определение биоразлагаемости сложноэфирных смазочных материалов по ГОСТ 32427-2013 позволило установить, что подсолнечное масло и бис(2-этилгексил)себацинат с предложенными присадками способны к быстрому разложению в окружающей среде.

Изучение механизма, кинетики образования и функционирования антифрикционной пленки на поверхности контртела, выявление наиболее эффективных добавок, оптимальных соотношений компонент позволило установить, что образование поверхностных граничных пленок определяется процессами взаимодействия компонентов смазочного материала с поверхностью неокисленого металла. Активацию процессов формирования граничных поверхностных пленок можно осуществлять путем добавления в смазочный материал веществ, образующих комплексные соединения с железом.

Обоснована последовательность процессов, приводящих к образованию поверхностных граничных пленок при трении в сложноэфирных смазочных средах:

1. Удаление оксидной пленки с поверхности железа в зоне трения. Может осуществляться как механически за счет столкновения шероховатостей, так и химически – за счет образования растворимых в масле комплексных соединений с молекулами присадок.

2. Адсорбция на вновь образованной поверхности молекул смазочного материала.

3. Химические реакции образования поверхностных пленок из молекул смазочного материала. Изменения сигналов, отвечающих за колебания связей С-О и С=О в ИК-спектрах, свидетельствуют об активном участии карбонильных групп молекул масла в этих процессах. Высокие скорости формирования поверхностных пленок, установленные при помощи ИК-спектроскопии, указывают на каталитический характер реакций.

4. Процесс роста граничной пленки.

Экспериментально установлено, что скорость образования поверхностных пленок определяется скоростью стадии удаления оксида с поверхности железа. Поэтому наибольшую эффективность показали добавки, растворяющие оксидную пленку в результате реакций комплексообразования.

Критериями отбора присадок, способствующих формированию граничных смазочных пленок, являются:

- активность в реакциях комплексообразования с катионами металла;

- растворимость как самих присадок, так и продуктов их взаимодействия с металлом в смазочном материале. Растворимость зависит от полярности молекул, поэтому в неполярных средах, к которым относится большинство смазочных материалов, наиболее эффективными будут слабополярные лиганды.

Практическая ценность проекта заключается в том, что активация процессов формирования граничных поверхностных пленок позволяет повысить энергосберегающие и экологические свойства узлов трения за счет снижения потерь на трение.

 **Публикации за 2020 год:**

1. Бойко М.В., Колесников И.В., Бойко Т.Г., Сидашов А.В. Исследование частиц износа, сформированных в сложноэфирных смазочных средах Транспорт: наука, образование, производство, Т.1. 2020, с. 192-196.

2. Boiko M.V., Kolesnikov I.V., Boiko T.G., Sidashov A.V., Fevraleva V.A. Study of wear particles formed in some ester lubricants // AIP Conference Proceedings. V. 2188. 2019. P. 020001 DOI: 10.1063/1.5138375.

3. Boiko M.V., Sychev A.P., Kolesnikov I.V. Investigations of Antifriction Films Formation in Dioctyl Sebacate Medium with Cholesteryl Esters // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2020. P. 1035-1041 DOI: 10.1007/978-3-030-22041-9\_109.

4. Колесников И.В., Сычев А.П., Бойко М.В., Колесников В.И., Сычев А.А., Бойко Т.Г., Бичеров А.А., Ермаков С.Ф. Смазочное масло для трансмиссий и шарниров винтов вертолетов // Патент РФ № 2739323 от 22.12.2020.

5. Ponomarenko A.G., Boiko T.G., Bicherov A.A., Bicherov A.V., Shiryaeva T.A., Kulemzin D.V. Improving the lubricating properties of transmission oils by activating the processes of boundary films formation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021. V. 1029. P. 012002. DOI:10.1088/1757-899X/1029/1/012002.

6. Sidashov A.V., Boiko M.V. Surface Films Formation on Steel During Friction of Polymer Composites Containing Microcapsules with Lubricant // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2020. P. 1259-1268. DOI: 10.1007/978-3-030-22041-9\_131.

7. Sidashov A.V., Boiko M.V., Kozakov A.T., Lesnyak V.V. Formation of Surface Structures under Friction in Synthetic Oils // Journal of Friction and Wear. 2020. V. 41, I. 5. P. 417–420. DOI: 10.3103/S1068366620050165.