

DOI 10.51582/interconf.7-8.12.2021.053

Мельник Владимир Борисович

кандидат технических наук,
доцент кафедры прикладной механики и инженерии материалов
Национальный авиационный университет, Украина

Микосянчик Оксана Александровна

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры прикладной механики и инженерии материалов
Национальный авиационный университет, Украина

Киндрачук Мирослав Васильевич

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры прикладной механики и инженерии материалов
Национальный авиационный университет, Украина

Леусенко Дарья Владимировна

аспирантка
Национальный авиационный университет, Украина

ВЛИЯНИЕ ПРИСАДОК КАРБОНОВЫХ КИСЛОТ НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ СМАЗОЧНЫЙ СЛОЙ В ЛОКАЛЬНОМ КОНТАКТЕ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

***Аннотация.** Проведено исследование смазочных слоёв, образованных маслами с поверхностно-активными присадками карбоновых кислот в локальном контакте зубчатых передач. В исследованиях установлены высокие приработочные свойства таких присадок, которые обусловлены как адсорбционным пластифицирующим действием, так и снижением толщины гидродинамического слоя. Чрезмерное снижение толщины смазочного слоя в присутствии ПАВ может привести к непосредственному контакту выступов неровностей. Защиту от схватывания в этом случае обеспечивают адсорбционные и окисные плёнки. В частности, присадка муравьиной кислоты, очевидно, образует недостаточно эффективные адсорбционные плёнки. Вместе с тем, муравьиная*

кислота является хорошим восстановителем и находит в этом качестве широкое применение в технике. Уменьшение толщины плёнки окислов при небольшой толщине вязкого и адсорбционных слоёв является причиной развития схватывания.

Ключевые слова: *толщина смазочного слоя, локальный контакт, адсорбция, контактно-гидродинамическая теория смазки, карбоновые кислоты.*

Гидродинамический слой в контакте занимает промежуточное положение между граничными слоями, прилегающими к сопряженным поверхностям трения. Толщина и роль такого слоя существенно изменяется в зависимости от условий нагружения и материалов, но этот слой всегда практически имеет место в условиях трения с подачей смазки. В связи с этим, в рамках проводимых исследований, встает задача изучения влияния карбоновых кислот на этот слой.

В работах [1,2] показано, что с увеличением суммарной скорости качения уменьшается роль и, в частности, толщина граничных слоёв. По этой причине раздельное исследование гидродинамических слоёв проводилось при повышенных скоростях / от 8,5 до 25 м/с /, т.е. в условиях минимального влияния толщины граничных слоёв.

Испытания проводились на контактно-роликовой машине трения по схеме ролик-ролик. В качестве образцов служили пары роликов диаметром 80 и 85 мм. Материал образцов – сталь 45, твёрдость HB-200. Давление в контакте составляло 400 и 1000 МПа. В качестве смазочных материалов применялось авиационное масло МС-20, без присадок и с присадками / 0,5% / одной из основных карбоновых кислот. Перед испытаниями образцы предварительно прирабатывались, тщательно промывались в бензине Б-70 и высушивались.

Методами раздельного измерения толщины гидродинамической и граничной прослоек [3,4], было установлено, что в условиях проводимых испытаний толщина граничных составляющих пренебрежимо мала по сравнению с толщиной гидродинамического слоя.

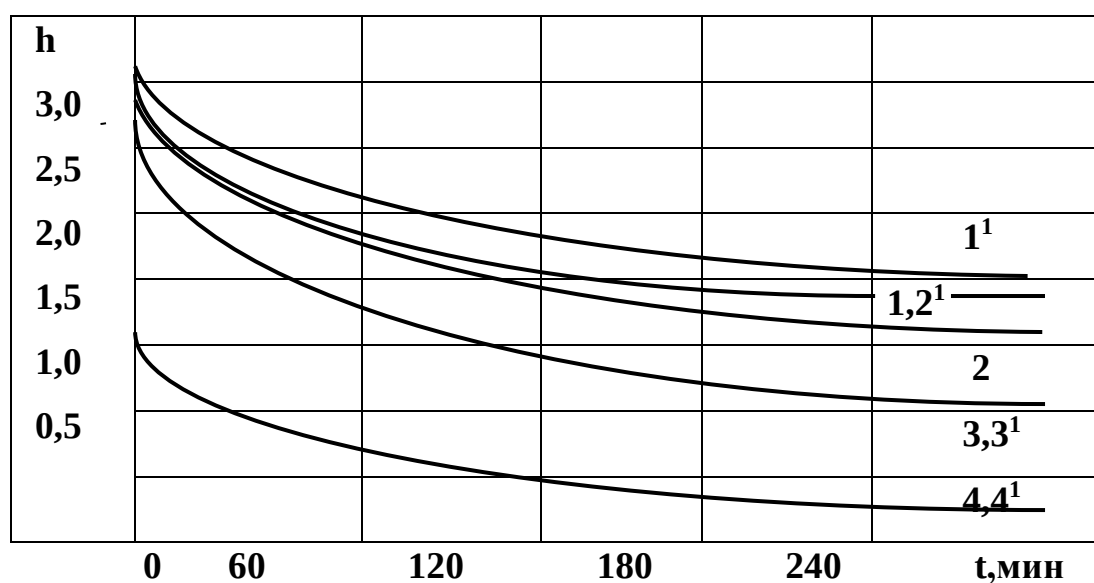
На рис.1-4 приведены результаты исследований смазочного действия масла МС-20 с присадками в начальный период – период стабилизации

параметров смазочного действия.

Введение присадок в масло во всех испытаниях приводило к снижению толщины смазочного слоя / рис.1/ на величину, зависящую от вида присадки и условий нагружения.

Наибольшее влияние оказывают присадки муравьиновой кислоты, которые способны уменьшить толщину смазочного слоя на 90% и более – вплоть до появления и развития схватывания контактных поверхностей.

С увеличением давления усиливается действие присадок пропорционально их молекулярному весу, т. е. с увеличением давления с 400 до 1000 МПа толщина слоя уменьшалась приблизительно на 0, 0, 7 и 20% соответственно в присутствии муравьиновой, уксусной и олеиновой кислот.



1-4 – при давлении в контакте 1000 МПа; 1¹- 4¹ - при давлении в контакте 400 МПа; 1,1 – МС-20; 2,2 – МС – 20 с олеиновой кислотой; 3,3 – МС-20 с уксусной кислотой; 4,4 – МС – 20 с муравьиной кислотой.

**Рис.1. Изменение толщины гидродинамического слоя
в послепусковой период**

Изменение коэффициента трения / рис.2 / происходит в соответствии с кривой Герси-Штрибека – уменьшаются потери на трение с уменьшением толщины слоя, а в случае чрезмерного его снижения потери на трение увеличиваются. Последнее подтверждается появлением следов схватывания на трущихся поверхностях.

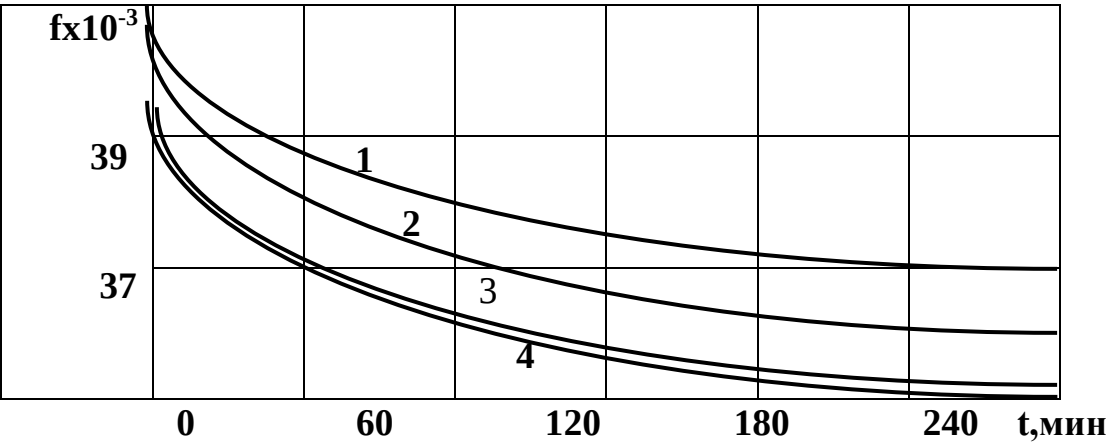
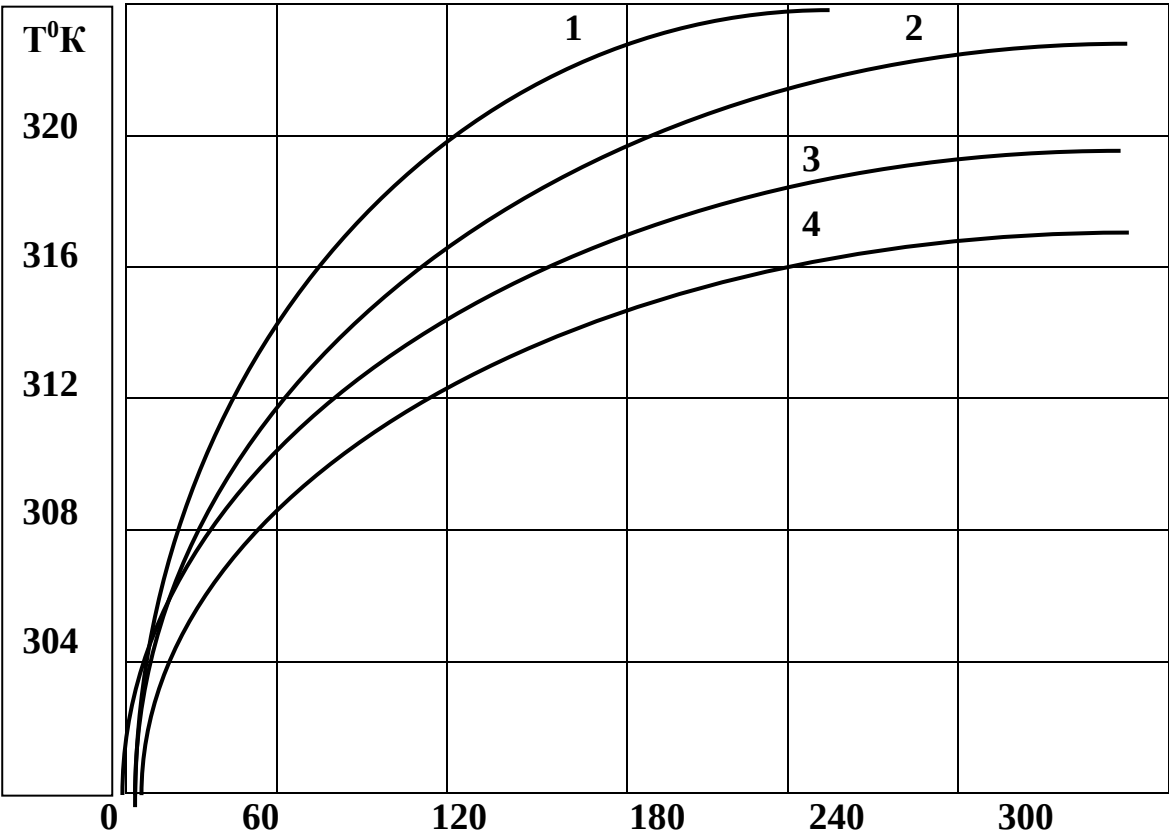


Рис. 2. Изменение коэффициента трения. 1,1¹ – MC-20; 2,2¹ – MC-20 с олеиновой кислотой; 3,3¹ – MC-20 с уксусной кислотой; 4,4¹ – MC-20 с муравьиной кислотой



1,1¹ – MC-20; 2,2¹ – MC-20 с олеиновой кислотой; 3,3¹ – MC-20 с уксусной кислотой; 4,4¹ – MC-20 с муравьиной кислотой

Рис.3. Изменение температуры масла на входе в контакт

Скорость изменения и конечные значения температуры масла качественно согласуются с экспериментальными данными потерь на трение / рис.2. и рис.3.

На рис.4. приведен график изменения отношения расчётных значений кинематической вязкости масла МС-20 и МС-20 с присадкой муравьиной кислоты на входе в контакт с учётом изменения температуры на входе в контакт / кривая 1 /.

На рис..4. приведены также кривые для средней кинематической вязкости в контакте, которая определялась в соответствии с формулой Ньютона [1]

$$\nu = \mu h / V_{\text{ск}} \quad (1)$$

где μ - напряжение сдвига в слое масла в контакте; ν – кинематическая вязкость; h – толщина смазочного слоя в контакте; $V_{\text{ск}}$ – скорость.

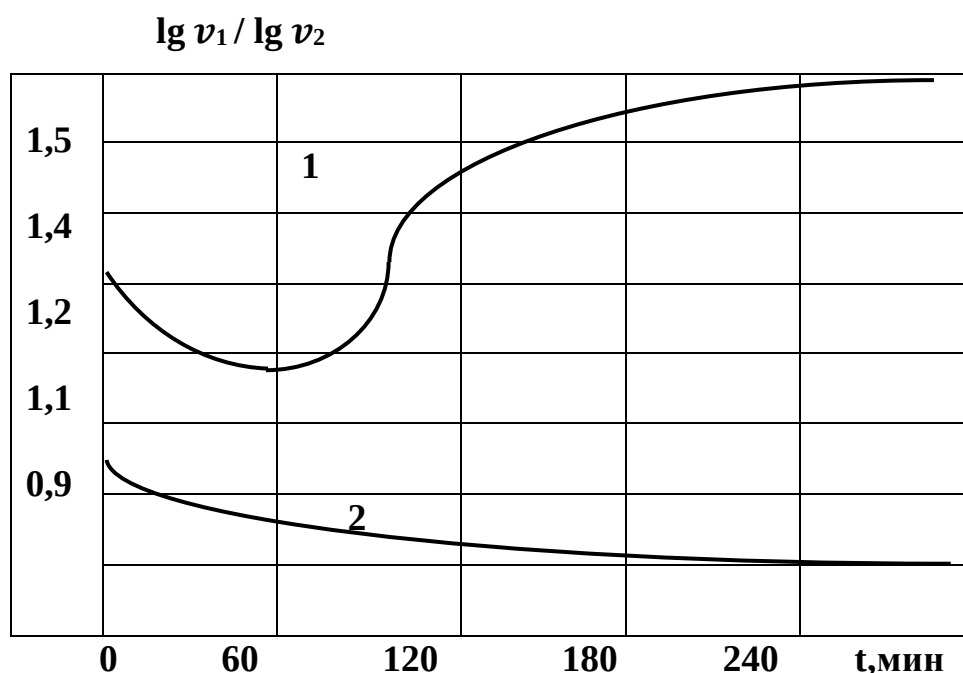


Рис.4. Изменение величины отношения средней кинематической вязкости масла МС-20 к аналогичной величине масла МС-20 с присадкой муравьиной кислоты и контакте 1 и величины отношения вязкости этих смазочных материалов на входе в контакт 2 в период стабилизации параметров смазочного слоя

Скорость изменения и конечные значения температуры масла качественно согласуются с экспериментальными данными потерь на трение / рис.2. и рис.3. /.

На рис.4. приведен график изменения отношения расчётных значений

кинематической вязкости масла МС-20 и МС-20 с присадкой муравьиной кислоты на входе в контакт с учётом изменения температуры на входе в контакт / кривая 1 /.

На рис..4. приведены также кривые для средней кинематической вязкости в контакте, которая определялась в соответствии с формулой Ньютона [1]

$$v = \mu h / V_{\text{ск}} \quad (2)$$

где μ - напряжение сдвига в слое масла в контакте; v - кинематическая вязкость; h - толщина смазочного слоя в контакте; $V_{\text{ск}}$ - скорость.

Из анализа полученных отношений следует, что вязкость базового масла на входе в контакт ниже вязкости масла с присадками что объясняется тепловыми явлениями.

$$\lg v_1 / \lg v_2 \leq 1 \quad (3)$$

Однако одни тепловые явления не в состоянии объяснить тот факт, что при меньшей температуре масла с присадкой муравьиной кислоты, вязкость в контакте ниже, чем у масла без присадок.

Для анализа соотношений теоретических и экспериментальных параметров смазочного действия в соответствии с данными температуры проведен расчёт толщины контактно-гидродинамического смазочного слоя по формуле Петрусевича А.И.,

$$h = C v_o^\beta V_{\text{сум}} P^{-6} a^\varepsilon \rho^\tau E^m \quad (4)$$

где C - коэффициент, v - кинематическая вязкость; $V_{\text{сум}}$ - суммарная скорость качения; P - погонная нагрузка; a - пьезокоэффициент вязкости; ρ - приведенный радиус кривизны; E - модуль упругости.

а также коэффициент трения в соответствии с формулой предложенной Дроздовым Ю.Н. [5,6,7].

$$f = \frac{A_p^{0,1} \left[10 + \lg \left(\frac{HB \cdot R_a}{E_{\text{пр}} E_{\text{пр}}} \right) \right]}{v_k^{0,07} \cdot g_{\text{ск}}^{0,35} \cdot g_e^{0,1} \cdot R_{\text{пр}}^{0,25}} \quad (5)$$

где $A=0,09$. Формула используется при выполнении следующих условий:

вязкость – $\nu > 1$ сст, нагрузка $P_n \geq 300$ Кгс/см, давление в контакте $p \geq 4000$ Кгс/см², скорость качения $V_{\text{кач}} \geq 100$ см/с; скорость скольжения $V_{\text{ск}} > 20$ см/с, приведенный радиус кривизны $R_{\text{пр}} > 0,5$ см, шероховатость $R_a > 10^{-5}$ см. Твёрдость $HB > 5000$ Кгс/см².

Функциональная схема /рис.5./ отражает причины и ход изменения толщины смазочного слоя и коэффициента трения в соответствии с КГТС. При заданных условиях смазки N , V , T , и материалах C увеличение температуры T сопровождается уменьшением вязкости; / динамической и кинематической / и пьезокоэффициента вязкости α , что в соответствии с выражениями (4) и (5), вызывает увеличение коэффициента трения и уменьшение толщины гидродинамического слоя. Такие изменения приводят к увеличению деформации контактных поверхностей и ускоряют их изнашивание. Стабилизация параметров в этих условиях возможна по причине увеличения теплоотвода поперёк смазочного слоя.

Изменения экспериментальных и расчётных кривых смазочных слоёв качественно совпадают, т.е. имеют спадающий характер /рис. 2. и рис..6./.

Из величины отношения экспериментальных толщин к расчётным следует, что лучшая сходимость соответствует испытаниям с маслом без присадок при установившихся параметрах / отношение в процентах составляет 77%/. Худшая сходимость наблюдалась при добавлении муравьиной кислоты /около 11%/.

Возрастающий характер потерь на трение противоположен аналогичным экспериментальным характеристикам, где наблюдалось снижение потерь на трение с момента начала испытаний. По мере роста температуры увеличение расчётных значений коэффициента трения обусловлено снижением вязкости масла, значения которой находятся в знаменателе выражения (5).

Качественно подобные результаты получены и при испытаниях вазелинового масла, масел И-40А, И-50А, МК-8, а также присадок шавелевой, янтарной, циклобутанкарбоновой, циклопентанкарбоновой и циклогексанкарбоновой кислот. Обнаруженное явление снижения толщины

смазочного слоя с одновременным снижением потерь на трение в присутствии присадок поверхностно-активных веществ проявлялось в той же степени и при больших скоростях качения – до 25м/с.

Такие явления противоречат установившимся взглядам и не могут быть объяснены с позиций классической контактно-гидродинамической теории смазки, учитывающей лишь сжимаемость контактных поверхностей и изменение вязкости в соответствии с температурой в контакте.

Одной из причин значительного снижения толщины смазочного слоя в присутствии поверхностно-активных веществ может быть изменение вязкости масел в объёме в соответствии с номограммой Семенидо или формулой Штаудингера [8] для смазочных смесей. Однако расчёты показывают, что вязкость применявшихся смесей масла и присадок незначительно отличается от вязкости базового масла.

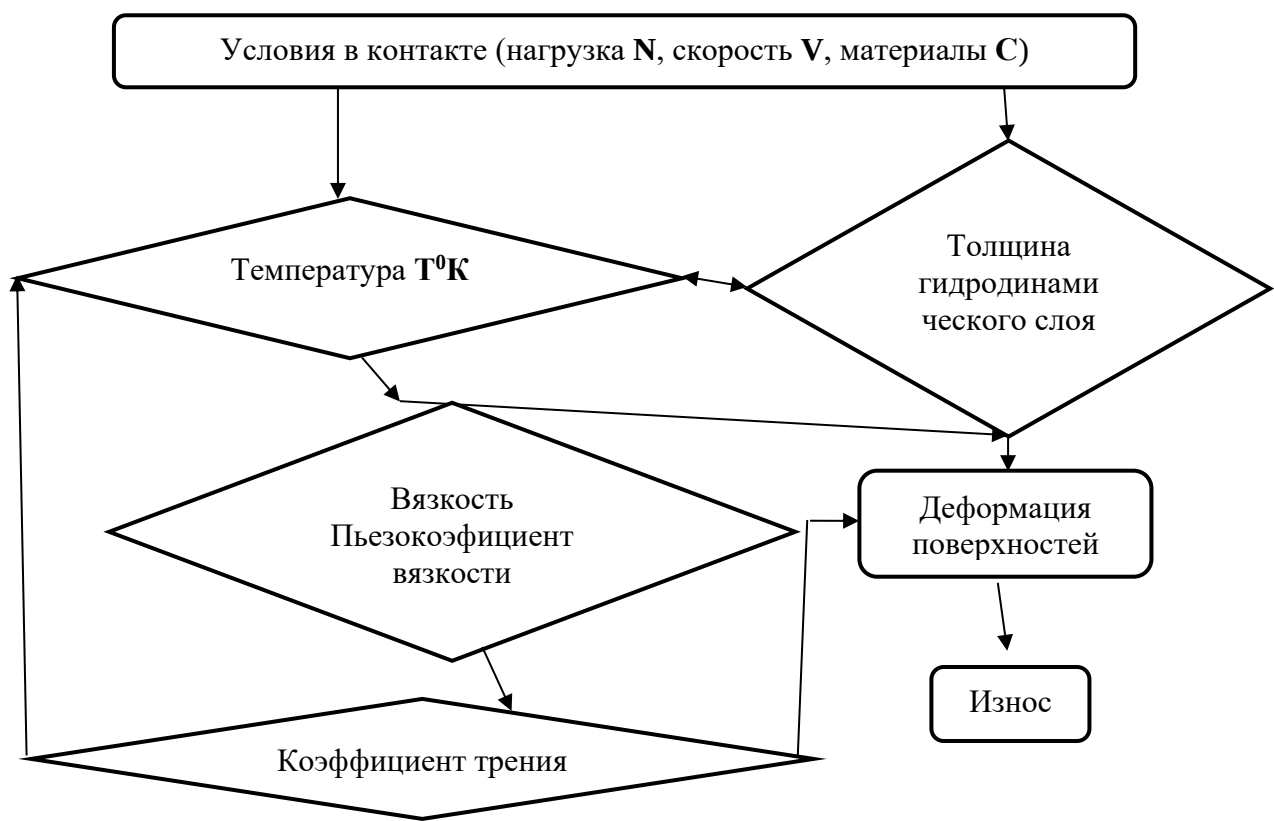


Рис.5. Функциональная схема механизма стабилизации толщины гидродинамического слоя и коэффициента трения в соответствии с контактно-гидродинамической теорией смазки при заданных условиях нагружения

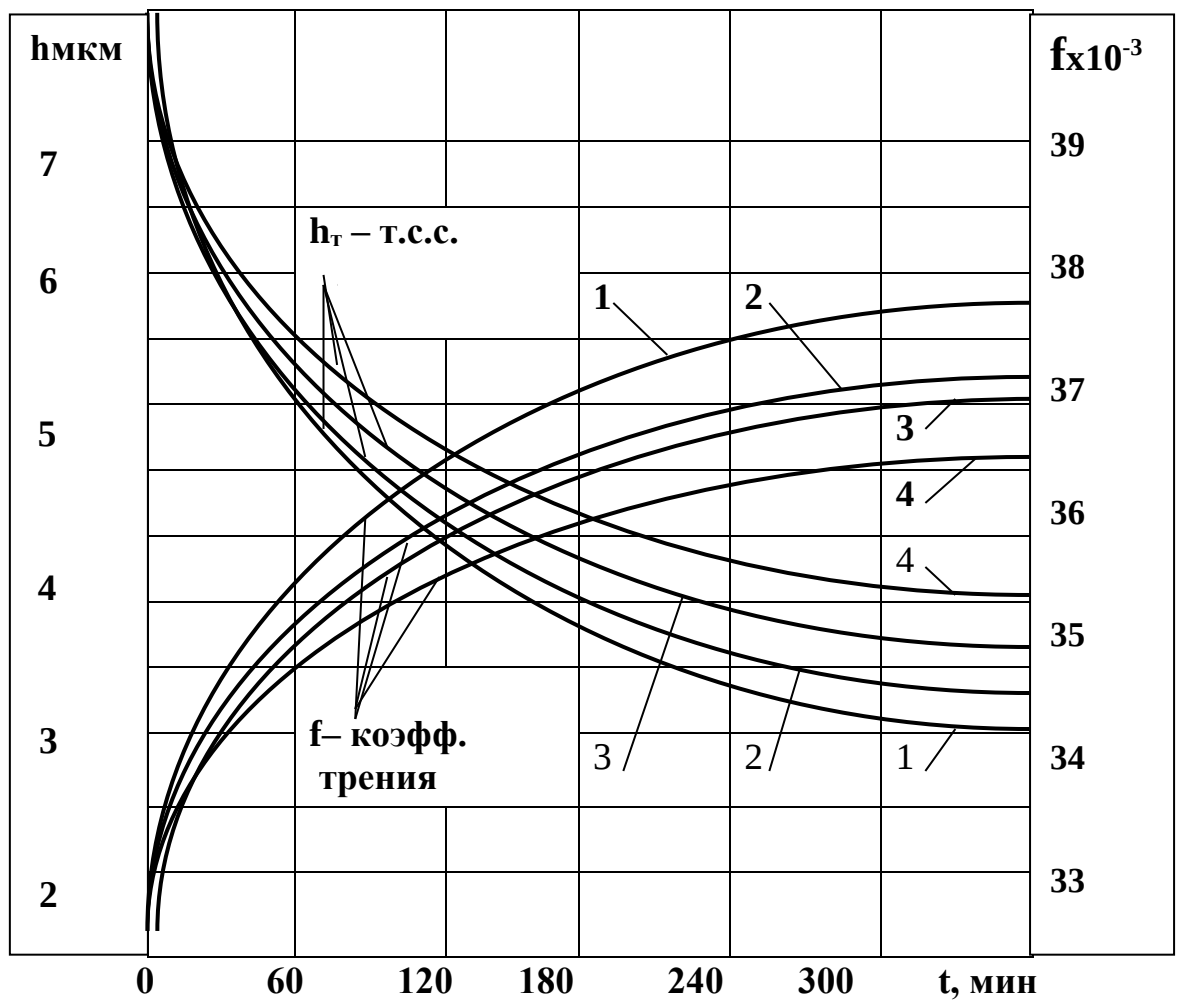


Рис.6. Изменение коэффициента трения f и толщины смазочного слоя h в соответствии с формулами контактной гидродинамики в послепусковой период при давлении в контакте 1000 МПа; 1 – МС-20; 2 – МС-20 с олеиновой кислотой; 3 – МС-20 с уксусной кислотой; 4 – МС-20 с муравьиной кислотой

Вязкость применявшихся кислот на два-три порядка ниже вязкости базового масла МС-20, поэтому возможность снижения толщины смазочного слоя в соответствии с этим механизмом вполне реальна. Для проверки такого предположения с поверхности образцов в процессе испытаний в установившемся режиме трения за зоной контакта отбирались пробы масла. Методом инфракрасного спектрального анализа определялось содержание присадок в этих пробах и сравнивалось с их содержанием в объеме. Существенного различия в вязкости, способного повлиять заметно на толщину смазочного слоя, не наблюдалось.

На отсутствие значительного влияния вязкости присадок на вязкость смазочных смесей указывает также тот факт, что вязкость уксусной кислоты на 25% /при 20⁰C/ меньше вязкости муравьиной, а толщина смазочного слоя в последнем случае была значительно ниже на всём протяжении испытаний /рис.1./.

В работе [8] указывается на возможность ламинизации потока смазочного слоя присадками, имеющими нитеобразную или пластинчатую структуру, вследствие их ориентации вдоль потока. Однако длина молекулы олеиновой кислоты значительно превышает длину молекулы уксусной или муравьиной кислот, но последние обладают большим влиянием на смазочный слой и на коэффициент трения. В проводимых исследованиях скорее наблюдалась обратная зависимость между величиной изменения смазочных свойств и длиной молекул.

Проведенные исследования согласуются с положениями КГДТС, в которой указывается, что в условиях контактно-гидродинамической смазки проявляются не только вязкостные свойства смазки и упругие – твёрдых тел, но и влияние процессов адсорбции, реализующих условия проявления эффекта, называемого автором [8], гидродинамическим ориентированным состоянием смазочного слоя. Такое действие подтверждается тем, что с увеличением нагрузки на контакт увеличивается влияние присадок. Известно, что нагрузка имеет первостепенную роль в деструкционных процессах [8], в результате которых образуются свободные радикалы молекул с адсорбционной активностью.

Чрезмерное снижение толщины смазочного слоя в присутствии ПАВ может привести к непосредственному контакту выступов неровностей. Защиту от схватывания в этом случае обеспечивают адсорбционные и окисные плёнки. В частности, присадка муравьиной кислоты, очевидно, образует недостаточно эффективные адсорбционные плёнки. Вместе с тем, муравьиная кислота является хорошим восстановителем и находит в этом качестве широкое применение в технике. Уменьшение толщины плёнки окислов при небольшой толщине вязкого и адсорбционных слоёв является причиной развития схватывания.

Список источников:

1. Райко М.В. Исследование смазочного действия нефтяных масел в условиях работы зубчатых передач. Диссертация на соискание учёной степени доктора техн. Наук. Киев; КИИГА, 1974, 369с.
2. Мельник В.Б. Реология смазочного слоя в локальном контакте зубьев зубчатых передач. Проблемы тертя та зношування: зб. наук.праць.- К.:НАУ, 2008.- № 49.- С.185-189
3. Мельник В.Б. Метод оцінки складових змащувального шару в локальному контакті зубчатих передач / В.Б. Мельник, Д.В. Леусенко // Проблеми тертя та зношування: зб. наук.праць.- К.:НАУ, 2012.- № 58.- С.165-168.
4. Мельник В.Б. Вплив карбонофторидних присадок на показники якості змащувальної дії мастильних матеріалів в процесі припрацювання зубчатих передач / В.Б Мельник, Ю.С Леусенко// Проблеми тертя та зношування: зб. наук.праць.- К.:НАУ, 2013 - № 1(60).- С. 74-78
5. Петрусеви́ч А.И. Роль гидродинамической масляной плёнки в стойкости и долговечности поверхностей контакта деталей машин. – Вестник машиностроения, 1963, № 1 с.20-26.
6. Дроздов Ю.Н., Решиков В.Ф. О коэффициенте трения и толщине масляной плёнки в тяжёлонагруженном контакте.– Вестник машиностроения,1968,№ 2,с.9-12.
7. Дроздов Ю.Н., Смирнов В.И. Исследование коэффициента трения скольжения при высоких температурах контакта.– Вестник машиностроения,1977, № 6, с.19-23.
8. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. М.: Физматгиз, 1963, 472с.