ISSN 1561-8331 (Print)
ISSN 2524-2342 (Online)
УДК 547-32:544.72.05
https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-4-480-487

Поступила в редакцию 05.10.2021
Received 05.10.2021

В. М. Акулова[1], А. Е. Соломянский[1], Г. Б. Мельникова[2], Д. А. Некрашевич[1], Ю. В. Синькевич[3], И. Г. Чишанков[1], В. Е. Агабеков[1]

[1]Институт химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
[2]Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
[3]Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ ЛЕНГМЮРА–БЛОДЖЕТТ НА ОСНОВЕ ВЫСШИХ ЖИРНЫХ КИСЛОТ

Аннотация. Исследованы морфология и трибологические свойства моно- и мультислойных пленок Ленгмюра–Блоджетт (ЛБ) на основе нервоновой (НК), церотиновой (ЦК) и монтановой кислот (МК). Установлено, что ЛБ монослой МК на поверхности кремния в 11 и 1,3 раза стабильнее мономолекулярных ЛБ пленок НК и ЦК соответственно. Мультислойное покрытие МК, состоящее из 140 слоев, в 35 раз увеличивает износоустойчивость стальной поверхности.

Ключевые слова: защитное покрытие, технология Ленгмюра–Блоджетт, метод горизонтального осаждения, жирная кислота, монтановая кислота, триботехнические свойства

Для цитирования. Защитные покрытия Ленгмюра–Блоджетт на основе высших жирных кислот / В. М. Акулова [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2021. – Т. 57, № 4. – С. 480–487. https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-4-480-487

V. M. Akulova[1], A. E. Salamianski[1], G. B. Melnikova[2], D. A. Nekrashevich[1], Yu. V. Sinkevich[3], I. G. Chishankov[1], V. E. Agabekov[1]

[1]Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
[2]A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
[3]Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

PROTECTIVE LANGMUIR-BLODGETT COATINGS BASED ON LONG-CHAIN FATTY ACIDS

Abstract. The morphology and tribotechnical properties of Langmuir–Blodgett (LB) monolayers and multilayers of some fatty acids, such as nervonic (NA), cerotic (CA) and montanic acids (OCA), was investigated. It was established that the wear resistance of silicon surface coated by LB monolayer of OCA is greater by 11 and 1.3 times in comparison with the LB monomolecular films of NA and CA, respectively. The multilayer of OCA, formed by 140 layers, increases the stability of steel surface by 35 times.

Keywords: protective coating, Langmuir–Blodgett technique, horizontal presipitation method, fatty acid, montanic acid, tribological properties

For citation. Akulova V. M., Salamianski A. E., Melnikova G. B., Nekrashevich D. A., Sinkevich Yu. V., Chishankov I. G., Agabekov V. E. Protective Langmuir–Blodgett coatings based on long-chain fatty acids. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series,* 2021, vol. 57, no. 4, pp. 480–487 (in Russian). https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-4-480-487

Введение. Минимизация трения и изнашивания деталей устройств в прецизионных узлах трения повышает срок их эксплуатации [1, 2]. В частности, защита от трения и изнашивания необходима микроэлектромеханическим устройствам (МЭМС), являющихся частью гироскопов, сенсоров и систем обработки сигналов миниатюрных устройств [3]. Низкая технологичность таких систем обусловлена невысокой прочностью материала их контактирующих поверхностей, которым чаще всего является кремний [4].

Надежность и стабильность МЭМС возможно повысить за счет модификации их прецизионных узлов трения смазочными материалами, включая органосиланы, например октадецилтрихлорсилан, жирные кислоты, полибензоксазин, графен и его оксид [5, 6]. Преимущество использования жирных кислот в качестве материала защитного покрытия состоит в возможности следования принципам «Зеленой трибологии». Смазки на основе жирных кислот – более экологически чистые и менее токсичные для окружающей среды по сравнению с синтетическими аналогами [1, 2].

К примеру, важнейшим источником стеариновой кислоты (СК) являются какао и масло ши; бегеновую кислоту (БК) выделяют из растительных масел (рапсового, подсолнечного) и природных жиров (свиного и говяжьего); церотиновая кислота (ЦК) содержится в пчелином и пальмовом воске, а монтановая кислота (МК) – в пчелином и монтановом воске, получаемом из бурого угля; нервоновая кислота (НК) входит в состав масел семян *Cardamine graeca L.*, *Malania oleifera* и *Tropaeolum speciosum* [7–10].

Существуют разные способы формирования защитных покрытий – метод самоорганизации, осаждение из газовой фазы, центрифугирование, электрофоретическое осаждение и т. д., однако для работы с жирными кислотами наиболее перспективна технология Ленгмюра–Блоджетт (ЛБ) [5, 11]. С ее помощью можно получать защитные мономолекулярные покрытия, при этом нет необходимости использовать вакуум и термическую обработку [11]. В процессе эксплуатации устройств молекулы защитного покрытия ЛБ, адсорбированные на поверхности за счет сил Ван-дер-Ваальса, переносятся между контактирующими поверхностями, замедляя их износ [12].

Технология ЛБ может быть реализована различными способами [12–14]. Существуют методы горизонтального (ГО) и традиционного вертикального осаждения (ВО) [13, 14]. Традиционным способом получают как монослои насыщенных – пальмитиновой [14], стеариновой [15], арахиновой [16], так и ненасыщенных – олеиновой [17], эруковой [18] и других высших жирных кислот [14, 18]. Методом ВО также формируют мультислойные покрытия на основе миристиновой, стеариновой, бегеновой и арахиновой кислот, в основном используя субфазу, содержащую ионы металлов [19, 20]. Применяемый в данной работе метод ГО по сравнению с традиционным подходом имеет преимущества: возможность отказаться от использования растворов солей в качестве субфазы и бездефектность структуры сформированных пленок [13]. Следует отметить, что трибологические свойства монослоев высших жирных кислот, особенно ненасыщенных, мало изучены [21, 22].

Цель настоящей работы – получить защитные моно- и мультислойные покрытия Ленгмюра–Блоджетт для МЭМС и прецизионных узлов трения на основе нервоновой, церотиновой и монтановой кислот, изучить их износоустойчивость и сопоставить ее со стабильностью монослоев стеариновой и бегеновой кислот.

Материалы и методы исследования. Для получения ЛБ покрытий использовали насыщенные жирные кислоты (Sigma-Aldrich) со степенью чистоты СК ($C_{17}H_{35}COOH$), БК ($C_{21}H_{43}COOH$) ≥ 99 %, ЦК ($C_{25}H_{51}COOH$) ≥ 90 %, МК ($C_{27}H_{55}COOH$) ≥ 98 % и ненасыщенную (Cayman Chemical) НК ($CH_3(CH_2)_7CH{=}CH(CH_2)_{13}COOH$) ≥ 90 %. Ленгмюровские слои жирных кислот формировали из их растворов в хлороформе с концентрацией 0,1 мг/мл. Монослои жирных кислот получали на пластинах из стали марки 12Х17 и кремния прямоугольной формы площадью 1,5 см^2 методом ГО на установке LT–201 (ОДО «Микротестмашины», Республика Беларусь). Пластины кремния предварительно подвергали гидрофилизации в растворе «пираньи» (H_2O_2 и H_2SO_4 в соотношении 1:2,5 по объему) в течение 45 мин при температуре 50,0 °С. Условия получения монослоев методом ГО: субфаза – дистиллированная вода температурой 25,0 °С, линейная скорость сжатия барьеров – 0,2 мм/с; поверхностное давление формирования монослоев ЦК – 16 мН/м, НК – 20 мН/м, СК, БК и МК – 30 мН/м.

Мультислойные покрытия МК получали методом ВО при условиях, как и для их монослоев: скорость перемещения подложки – 0,024 мм/с, количество слоев в мультислоях МК – 60 и 140, тип выделения – Y.

Морфологию и шероховатость образцов, сформированных на кремнии, исследовали методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на микроскопе Nanoscope IIID (Veeco Instrument, США). Условия сканирования: скорость – 3–5 Гц; стандартный кремниевый кантилевер с жесткостью 0,12 Н/м. Разрешение получаемых изображений составляло 512 × 512 точек. Толщину монослоев жирных кислот оценивали через дефект в их структуре, искусственно созданный кантилевером микроскопа. Шероховатость исходной стали марки 12Х17 и модифицированной моно- и мультислойными покрытиями МК определяли, используя профилометр М2 (Mahr, Германия).

Краевой угол смачивания (КУС) покрытий жирных кислот на кремниевых и стальных поверхностях измеряли методом «неподвижной» капли дистиллированной воды объемом 3 мкл на приборе DSA100E (Kruss, Германия).

Износоустойчивость покрытий изучали на трибометре возвратно-поступательного типа (Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси). Условия трибоиспытаний: приложенная нагрузка – 1,0 Н, индентор – стальной шарик диаметром 3,0 мм (сталь 95Х18), длина хода индентора – 3,0 мм, его линейная скорость – 4,0 мм/с. Тестирование образцов прекращали при достижении значений коэффициента трения (k_f) ~0,4 для кремниевых поверхностей [11] и ~0,5 для стальных [6].

Результаты и их обсуждение. Значения минимальной площади на молекулу ленгмюровских слоев насыщенных высших жирных кислот в фазовом состоянии «твердая пленка» (A_0) для СК, БК и МК составляет 0,19 нм^2; ЦК – 0,20 нм^2 (рис. 1).

Коллапс ленгмюровских слоев СК, БК и МК наблюдается при π >55 мН/м, в случае слоя ЦК – 36 мН/м. Для ЦК значение A_0 незначительно больше по сравнению с другими насыщенными жирными кислотами, это свидетельствует о том, что молекулы ЦК образуют на водной поверхности высокоупорядоченный плотный монослой [23].

Для ленгмюровского слоя НК в фазовом состоянии «твердая пленка» A_0 составляет 0,30 нм^2, а его разрушение наблюдается при поверхностном давлении 33 мН/м (рис. 1, *b*). Наличие двойной связи в молекулах НК уменьшает плотность упаковки образуемых ими монослоев по сравнению с ленгмюровскими слоями насыщенных жирных кислот [23].

Монослои ЛБ насыщенных жирных кислот содержат в своей структуре точечные углубления – дефекты (рис. 2), так называемые «пинхолы» [24]. Шероховатость монослоев СК, БК, МК, ЦК и НК, сформированных на кремнии, свидетельствует об их однородности (табл. 1).

Мономолекулярные пленки жирных кислот, полученные методом ГО, различаются своей толщиной: СК – 2,2 нм [25], БК – 2,7 нм [12], ЦК – 2,9 нм (рис. 2, *a*), МК – 3,2 нм (рис. 2, *b*), а НК – 2,4 нм (рис. 2, *c*). Таким образом, длина неполярной части молекул изученных жирных кислот влияет на толщину формируемого монослоя. При этом углеводородные хвосты молекул СК, БК, ЦК, МК и НК незначительно отклонены от вертикального положения в их монослоях ЛБ [12, 25].

Значения КУС кремниевой поверхности ~5° [5]. Для покрытия МК, полученного на кремнии, установлен наибольший КУС водой среди рассматриваемых жирных кислот – 64,3° ± 1,6° (рис. 3, *a*), который превосходит КУС для монослоя НК – 45,3 ± 0,9° (рис. 3, *b*). Это с свидетельствует о том, что покрытие из ненасыщенной НК проявляет более гидрофильные свойства по сравнению с монослоем МК вследствие меньшей плотности упаковки молекул в монослое НК, что подтверждается изотермами сжатия ленгмюровских слоев жирных кислот. При нанесении капли воды на кремний, модифицированный монослоем ЛБ насыщенной жирной кислоты, вода проникает в «пинхол» дефекты, что приводит к реорганизации ЛБ покрытия и ее контакту с гидрофильной кремниевой поверхностью [24, 26].

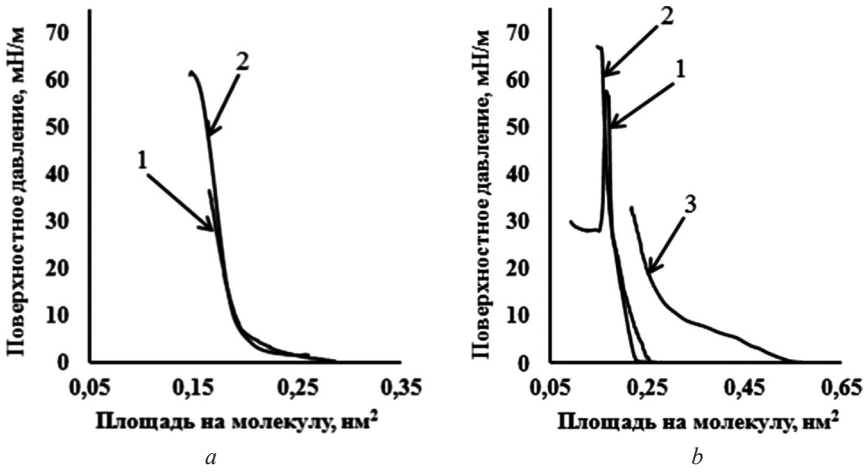
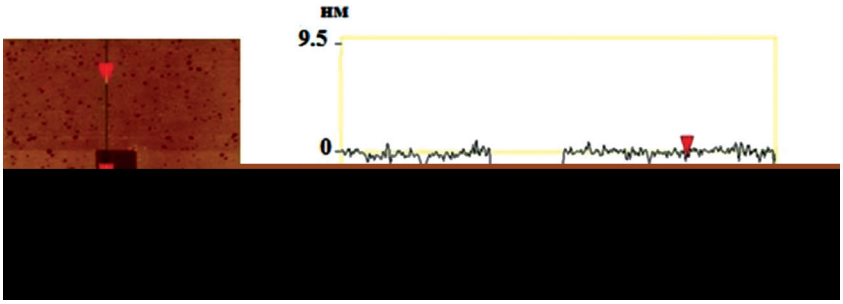


Рис. 1. Зависимость поверхностного давления (π) от площади на молекулу (*A*) на водной поверхности для ленгмюровских слоев: *a* – *1* – ЦК, *2* – МК; *b* – *1* – СК, *2* – БК, *3* – НК

Fig. 1. The surface pressure–area per molecule (π –*A*) isotherms for Langmuir layers of fatty acids on aqueous subphase: *a* – *1* – CA, *2* – OCA; *b* – *1* – SA, *2* – BA, *3* – NA



a

b

c

Рис. 2. АСМ-изображение искусственного дефекта в монослое и профиль его поперечного сечения: *a* – ЦК, *b* – МК, *c* – НК

Fig. 2. AFM-image of an artificial defect in monolayer and profile of its cross-section profile: *a* – CA, *b* – OCA, *c* – NA

Таблица 1. **Значения шероховатости монослоев высших жирных кислот**

Table 1. **The roughness of monolayers of long-chain fatty acids**

Монослой	СК	БК	ЦК	МК	НК
R_a, нм	0,26	0,26	0,58	0,35	0,37
R_z, нм	0,85	0,81	0,85	0,57	0,87

a *b*

Рис. 3. Краевой угол смачивания водой кремниевых поверхностей, модифицированных мономолекулярными ЛБ пленками жирных кислот: *a* – МК, *b* – НК

Fig. 3. Water contact angle of the silicon surface modified by monomolecular LB films of fatty acids: *a* – OCA, *b* – NA

Кремний при нагрузке 1,0 Н разрушается в течение одного цикла скольжения, при этом коэффициент трения материала возрастает от 0,25 до 0,70. Кремниевые поверхности, модифицированные монослоями СК, БК, ЦК, МК и НК, выдерживают 106,0 ± 25,0, 340,0 ± 25,0, 625,0 ± 60,0, 780,0 ± 15,0 и 70,0 ± 9,0 циклов скольжения (рис. 4). Значения k_f для насыщенных жирных кислот не превышает ~0,07, а для покрытия НК k_f равен ~0,08. Износостойкость пленок МК выше по сравнению с СК, БК и ЦК в 7,5, 2,3, 1,3 раза соответственно, поскольку у МК больше длина молекул [27].

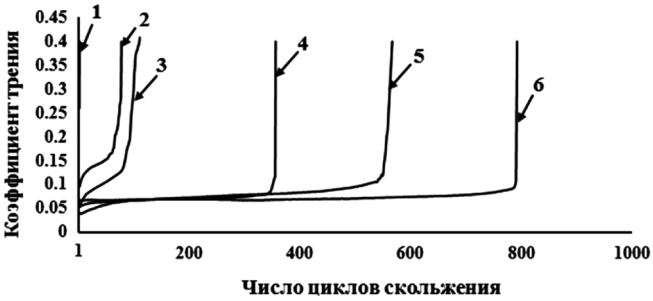


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения от числа циклов скольжения для покрытий, полученных на кремнии: *1* – немодифицированная кремниевая поверхность, монослои: *2* – НК, *3* – СК, *4* – БК, *5* – ЦК, *6* – МК

Fig. 4. The friction coefficient as a function of the number of sliding cycles for coatings formed on silicon: *1* – unmodified silicon surface, monolayers: *2* – NA, *3* – SA, *4* – BA, *5* – CA, *6* – OCA

Следует отметить, что покрытия СК, БК и МК стабильнее монослоя НК в 1,5, 5 и 11 раз соответственно. Низкая износоустойчивость покрытия НК по сравнению с монослоями насыщенных высших жирных кислот объясняется не длиной молекул НК, а меньшей плотностью упаковки молекул в монослое НК, что также подтверждается его значением КУС водой.

Покрытие МК обладает наибольшим КУС водой и износоустойчивостью на кремнии среди рассматриваемых жирных кислот, по этой причине изучены поверхностные и трибологические свойства моно- и мультислоев МК, сформированных на поверхности стали 12Х17. Монослой МК не оказывает влияние на шероховатость стальной поверхности (табл. 2). Увеличение толщины покрытий МК за счет наращивания количества слоев нарушает их однородность и упорядоченность, что приводит к незначительному ухудшению гидрофобных свойств модифицированной стальной поверхности [4].

Таблица 2. **Значения шероховатости и КУС моно- и мультислоев МК, сформированных на стали 12Х17**

Table 2. **Roughness and water contact angle of OCA mono- and multilayers formed on steel AISI 430**

Количество слоев на стали 12Х17	R_a, мкм	R_z, мкм	КУС водой, град.
0	0,025	0,19	82,0 ± 0,2
1	0,025	0,20	104,0 ± 0,1
60	0,031	0,23	99,5 ± 0,5
140	0,035	0,28	101,7 ± 0,1

Исходная сталь 12Х17 выдерживает 4 цикла скольжения стального шарика (k_f~ 0,2), а покрытая монослойным покрытием МК – 40,0 ± 4,0 циклов (k_f~ 0,1) (рис. 5).

Поверхность стали, покрытая 60 и 140 слоями МК, изнашивается в течение 85,0 ± 20,0 и 138,0 ± 20,0 циклов скольжения соответственно. При этом для испытываемых поверхностей значения k_f не превышают ~ 0,04. Таким образом, присутствие на стальной поверхности мультислойного покрытия МК, содержащего 140 слоев, увеличивает в 3,5 и 35 раз ее износоустойчивость по сравнению с монослоем МК и немодифицированной сталью, что обусловлено увеличением количества МК в узле трения [2].

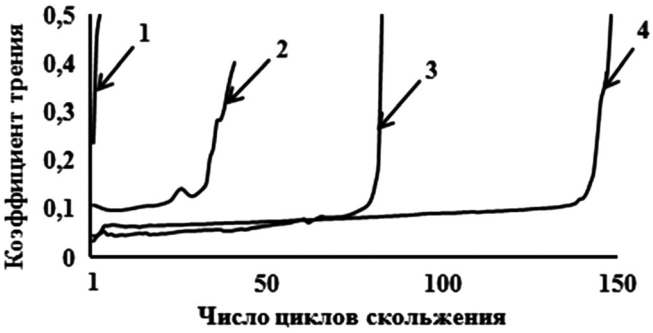


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения от числа циклов скольжения на стали: *1* – немодифицированная стальная поверхность, *2* – монослой МК, *3* – 60 слоев МК, *4* – 140 слоев МК

Fig. 5. The friction coefficient as a function of the number of sliding cycles on steel: *1* – unmodified steel surface, *2* – LB monomolecular film of OCA, *3* – 60 layers of OCA, *4* – 140 layers of OCA

Модифицированные кремниевые поверхности в 19,5 раза стабильнее стальных подложек, хотя их КУС водой не превышает 70°. Существенное различие в износоустойчивости и смачиваемости модифицированных кремниевых и стальных подложек, по-видимому, связано с тем, что шероховатость стали R_a ~ 25,0 нм больше, чем

у кремния R_a < 0,5 нм [27]. Это позволяет сформировать на стальных подложках моно- и мультислойные ЛБ пленки жирных кислот без использования растворов солей в качестве субфазы.

Заключение. Методом горизонтального осаждения получены однородные мономолекулярные ЛБ покрытия нервоновой, церотиновой и монтановой кислот, снижающие коэффициент трения кремниевой поверхности с 0,25 до 0,07–0,08 и стали 12Х17 с 0,2 до 0,04. Установлено, что ЛБ монослой монтановой кислоты толщиной 3,2 нм, сформированный на кремнии, в 11 и 1,3 раза стабильнее мономолекулярных ЛБ пленок нервоновой и церотиновой кислот соответственно. Мультислой монтановой кислоты, сформированный методом вертикального осаждения, состоящий из 140 слоев, в 35 раз увеличивает износоустойчивость стальной поверхности. Моно- и мультислойные ЛБ пленки высших насыщенных жирных кислот могут быть использованы в качестве защитных покрытий в микроэлектромеханических устройствах и прецизионных узлах трения.

Список использованных источников

1. The influence of fatty acids on tribological and thermal properties of natural oils as sustainable biolubricants / C. J. Reeves [et al.] // Tribology International. – 2015. – Vol. 90. – P. 123–134. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.04.021

2. Role of Green Tribology in Sustainability of Mechanical Systems: A State of the Art Survey / A. Anand [et al.] // Materials Today: Proceedings. – 2017. – Vol. 4, N 2. – P. 3659–3665. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.259

3. Wear of silicon surfaces in MEMS / I. S. Y. Ku [et al.] // Wear. – 2011. – Vol. 271, N 7–8. – P. 1050–1058. https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.04.005

4. Cuong, P. D. A study on surface modification for tribological application in MEMS / P. D. Cuong, T. D. Quy, E.-S.Yoon // Proceedings of the International Conference on System Science and Engineering, Ho Chi Minh, July 21–23, 2017 / Institute of Electrical and Electronics Engineers. – Ho Chi Minh, 2017. – P. 408-411. https://doi.org/10.1109/ICSSE.2017.8030907

5. Preparation and tribological properties of self-assembled tetraethoxysilane/octadecyltrichlorosilane bilayer films / M. Li [et al.] // Surface Topography: Metrology and Properties. – 2019. – Vol. 7. – P. 1–17. https://doi.org/10.1088/2051-672X/ab1564

6. Sahoo, R. R. Frictional response of fatty acids on steel / R. R. Sahoo, S. K. Biswas // Journal of Colloid and Interface Science. – 2009. – Vol. 333, N 2. – P. 707–718. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2009.01.046

7. Kenar, J. A. Naturally Occurring Fatty Acids: Source, Chemistry, and Uses / J. A. Kenar, B. R. Moser, G. R. List // Fatty Acids: Chemistry, Synthesis, and Applications / J. A. Kenar, B. R. Moser, G. R. List ; U. A. Moghis (Eds.). – 2017. – Ch. 2. – P. 23–82. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809521-8.00002-7

8. Krist, S. (ed.). Vegetable Fats and Oils / S. Krist (ed.). – Wien : Springer International Publishing, 2020. – XIII, 832 p. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30314-3

9. Grossman, R. F. Handbook of Vinyl Formulating / R. F. Grossman (ed.). – Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2008. – 2nd ed. – 531 p. https://doi.org/10.1002/9780470253595

10. A Review of Nervonic Acid Production in Plants: Prospects for the Genetic Engineering of High Nervonic Acid Cultivars Plants [Electronic resource] / F. Liu [et al.] // Front Plant Sci. – Mode of access: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7973461. – Date of access: 15.08.2021. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.626625

11. Salamianski, A. E. Tribological behavior of composite Langmuir–Blodgett films of triacontanoic acid / A. E. Salamianski, G. K. Zhavnerko, V. E. Agabekov // Surface and Coating Technology. – 2013. – Vol. 227. – P. 62–64. http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.02.024

12. Tribological properties of Langmuir–Blodgett films on silicon surface in microscale sliding contact / D. I. Kim [et al.] // Tribology Letters. – 2004. – Vol. 17, N 2. – P. 169–177. https://doi.org/10.1023/B:TRIL.0000032442.03009.21

13. Device for forming mono- or multilayers of amphiphilic compounds on a solid surface : patent BY 15411 / G. K. Zhavnerko, V. E. Agabekov, A. E. Salamianski, S. A. Chizhik, A. A. Suslov, V. V. Chikunov. – Publ. date: 28.02.2012.

14. Morphological and Interaction Characteristics of Surface Active Ionic Liquids and Palmitic Acid in Mixed Monolayers [Electronic resource] / A. F. Eftaiha [et al.] // Wiley, ChemPhysChem. – Mode of access: https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cphc.202000359. – Date of access: 02.08.2021.

15. Aqueous-phase aerosols on the air-water interface: Response of fatty acid Langmuir monolayers to atmospheric inorganic ions / S. Li [et al.] // Science of The Total Environment. – 2017. – Vol. 580. – P. 1155–1161. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.072

16. Capistran, B. A. Effects of Cu (II) on the Formation and Orientation of an Arachidic Acid Langmuir−Blodgett Film / B. A. Capistran, G. J. Blanchard // Langmuir. – 2019. – Vol. 35, N 9. – P. 3346−3353. https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b00022

17. Study of Friction-Reduction Properties of Fatty Acids and Adsorption Structures of their Langmuir–Blodgett Monolayers using Sum-Frequency Generation Spectroscopy and Atomic Force Microscopy / H. Koshima [et al.] // Tribology Letters. – 2016. – Vol. 64. – P. 1–8. https://doi.org/10.1007/s11249-016-0771-y

18. Two-Dimensional Dendritic Growth of Condensed Phase Domains in Spread Monolayers of cis-Unsaturated Fatty Acids / K. Iimura [et al.] // Langmuir. – 2001. – Vol. 17, N 15. – P. 4602–4609. https://doi.org/10.1021/la010236w

19. Surface morphology and stability of Langmuir-Blodgett mono- and multilayers of saturated fatty acids by scanning force microscopy / A. Schaper [et al.] // Langmuir. – 1993. – Vol. 9, N 8. – P. 2178–2184. https://doi.org/10.1021/la00032a046

20. The tribological behavior of LB films of fatty acids and nanoparticles / P. Zhang [et al.] // Wear. – 2000. – Vol. 242, N 1–2. – P. 147–151. https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00405-1

21. Effects of unsaturation on film structure and friction of fatty acids in a model base oil / S. M. Lundgren [et al.] // Journal of Colloid and Interface Science. – 2008. – Vol. 326, N 2. – P. 530–536. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2008.05.068

22. Correlation Between the Adsorption and the Nanotribological Performance of Fatty Acid-Based Organic Friction Modifiers on Stainless Steel / Z. Zachariah [et al.] // Tribology Letters. – 2020. – Vol. 68, N 11. – P. 1–16. https://doi.org/10.1007/s11249-019-1250-z

23. Characteristics of Long-Chain Fatty Acid Monolayers Studied by Infrared External-Reflection Spectroscopy / T. Hasegawa [et al.] // Langmuir. – 2002. – Vol. 18, N 12. – P. 4758–4764. https://doi.org/10.1021/la011756u

24. Reorganization of behenic acid monolayer on mica / X. Jiang [et al.] // Surface Review and Letters. – 2005. – Vol. 12, N 1. – P. 59–66. https://doi.org/10.1142/S0218625X05006792

25. The Influence of Thickness of Stearic Acid Self-Assembled Film on Its Protective Properties / Z. H. Gretić [et al.] // Journal of The Electrochemical Society. – 2016. – Vol. 163, N 14. – P. 937–944. https://doi.org/10.1149/2.1461614jes

26. Yiannos, P. N. Molecular reorientation of some fatty acids when in contact with water / P. N. Yiannos // Journal of Colloid Science. – 1962. – Vol. 17, N 4. – P. 334–347. https://doi.org/10.1016/0095-8522(62)90013-2

27. Dominguez, D. D. Friction and Durabilities of Well-Ordered, Close-Packed Carboxylic Acid Monolayers Deposited on Glass and Steel Surfaces by the Langmuir-Blodgett Technique / D. D. Dominguez, R. L. Mowery, N. H. Turner // Tribology Transactions. – 1994. – Vol. 37, N 1. – P. 59–66. https://doi.org/10.1080/10402009408983266

References

1. Reeves C. J., Menezes P. L., Jen T.-C., Lovell M. R. The influence of fatty acids on tribological and thermal properties of natural oils as sustainable biolubricants. *Tribology International*, 2015, vol. 90, pp. 123–134. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.04.021

2. Anand A., Irfan U. H. M., Vohra K., Raina A., Wani M. F. Role of Green Tribology in Sustainability of Mechanical Systems: A State of the Art Survey. *Materials Today: Proceedings*, 2017, vol 4, no. 2, pp. 3659–3665. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.259

3. Ku I. S. Y., Reddyhoff T., Holmes A. S., Spikes H. A. Wear of silicon surfaces in MEMS. *Wear*, 2011, vol. 271, no. 7–8, pp. 1050–1058. https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.04.005

4. Cuong P. D., Quy T. D., Yoon E.-S. A study on surface modification for tribological application in MEMS. *Proceedings of the International Conference on System Science and Engineering*. Ho Chi Minh, 2017, pp. 408–411. https://doi.org/10.1109/ICSSE.2017.8030907

5. Li M., Su B., Zhou B., Wang H., Meng J. Preparation and tribological properties of self-assembled tetraethoxysilane/octadecyltrichlorosilane bilayer films. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 2019, vol. 7, pp. 1–17. https://doi.org/10.1088/2051-672X/ab1564

6. Sahoo R. R., Biswas S. K. Frictional response of fatty acids on steel. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2009, vol. 333, no. 2, pp. 707–718. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2009.01.046

7. Kenar J. A., Moser B. R., List G. R. Naturally Occurring Fatty Acids: Source, Chemistry, and Uses. *Fatty Acids: Chemistry, Synthesis, and Applications* / U. A. Moghis (ed.). Academic Press and AOCS Press, 2017, pp. 23–82. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809521-8.00002-7

8. Krist S. (ed.). *Vegetable Fats and Oils*. Wien, Springer Internat. Publ., 2020, 832 p. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30314-3

9. Grossman R. F. (ed.). *Handbook of Vinyl Formulating*. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2008. 2nd ed. 531 p. https://doi.org/10.1002/9780470253595

10. Liu F., Wang P., Xiong X., Zeng X., Zhang X., Wu G. A Review of Nervonic Acid Production in Plants: Prospects for the Genetic Engineering of High Nervonic Acid Cultivars Plants. Front Plant Sci., 2021. Available at: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7973461 (Accessed 15 August 2021). https://doi.org/10.3389/fpls.2021.626625

11. Salamianski A. E., Zhavnerko G. K., Agabekov V. E. Tribological behavior of composite Langmuir–Blodgett films of triacontanoic acid. *Surface and Coating Technology*, 2013, vol. 227, pp. 62–64. http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.02.024

12. Kim D. I., Zhavnerko G. K., Ahn H.–S., Choi D.–H. Tribological properties of Langmuir–Blodgett films on silicon surface in microscale sliding contact. *Tribology Letters*, 2004, vol. 17, no. 2, pp. 169–177. https://doi.org/10.1023/B:TRIL.0000032442.03009.21

13. Patent BY 15411 Zhavnerko G. K., Agabekov V. E., Salamianski A. E., Chizhik S. A., Suslov A. A., Chikunov V. V. Device for forming mono- or multilayers of amphiphilic compounds on a solid surface. Publ. date 28.02.2012.

14. Eftaiha A. F., Qaroush A. K., Kayed G. G., Abdalrahman K. A., Assaf K. I., Paige M. F. Morphological and interaction characteristics of surface active ionic liquids and palmitic acid in mixed monolayers. *Chem. Phys. Chem*, 2020. Available at: https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cphc.202000359 (Accessed 02 August 2021).

15. Li S., Du L., Wei Z., Wang W. Aqueous-phase aerosols on the air-water interface: Response of fatty acid Langmuir monolayers to atmospheric inorganic ions. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 580, pp. 1155–1161. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.072

16. Capistran B. A., Blanchard G. J. Effects of Cu (II) on the Formation and Orientation of an Arachidic Acid Langmuir–Blodgett Film. *Langmuir*, 2019, vol. 35, no. 9, pp. 3346−3353. https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b00022

17. Koshima H., Iyotani Y., Peng Q., Ye S. Study of Friction-Reduction Properties of Fatty Acids and Adsorption Structures of their Langmuir–Blodgett Monolayers using Sum-Frequency Generation Spectroscopy and Atomic Force Microscopy. *Tribology Letters*, 2016, vol. 64, pp. 1–8. https://doi.org/10.1007/s11249-016-0771-y

18. Iimura K., Yamauchi Y., Tsuchiya Y., Kato T., Suzuki M. Two-Dimensional Dendritic Growth of Condensed Phase Domains in Spread Monolayers of cis-Unsaturated Fatty Acids. *Langmuir*, 2001, vol. 17, no. 15, pp. 4602–4609. https://doi.org/10.1021/la010236w

19. Schaper A., Wolthaus L., Moebius D., Jovin, T. M. Surface morphology and stability of Langmuir-Blodgett mono- and multilayers of saturated fatty acids by scanning force microscopy. *Langmuir*, 1993, vol. 9, no. 8, pp. 2178–2184. https://doi.org/10.1021/la00032a046

20. Zhang P., Xue Q., Du Z., Zhang Z. The tribological behavior of LB films of fatty acids and nanoparticles. *Wear*, 2000, vol. 242, no. 1–2, pp. 147–151. https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00405-1

21. Lundgren S. M., Ruths M., Danerlöv K., Persson K. Effects of unsaturation on film structure and friction of fatty acids in a model base oil. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2008, vol. 326, no. 2, pp. 530–536. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2008.05.068

22. Zachariah Z., Nalam P. C., Ravindra A., Raju A., Mohanlal A., Wang K., Castillo R. V., Espinosa–Marzal R. M. Correlation Between the Adsorption and the Nanotribological Performance of Fatty Acid-Based Organic Friction Modifiers on Stainless Steel. *Tribology Letters*, 2020, vol. 68, no. 11, pp. 1–16. https://doi.org/10.1007/s11249-019-1250-z

23. Hasegawa T., Nishijo J., Watanabe M., Umemura J., Ma Y., Sui G., Huo Q., Leblanc R. M. Characteristics of Long-Chain Fatty Acid Monolayers Studied by Infrared External-Reflection Spectroscopy. *Langmuir*, 2002, vol. 18, no. 12, pp. 4758–4764. https://doi.org/10.1021/la011756u

24. Jiang X., Zhang X., Dai S., Wang D., Li Y., Du Z. Reorganization of behenic acid monolayer on mica. *Surface Review and Letters*, 2005, vol. 12, no. 1, pp. 59–66. https://doi.org/10.1142/S0218625X05006792

25. Gretić Z. H., Mioč E. K., Čadež V., Šegota S., Otmačić Ćurković H., Hosseinpour S. The Influence of Thickness of Stearic Acid Self-Assembled Film on Its Protective Properties. *Journal of The Electrochemical Society*, 2016, vol. 163, no. 14, pp. 937–944. https://doi.org/10.1149/2.1461614jes

26. Yiannos P. N. Molecular reorientation of some fatty acids when in contact with water. *Journal of Colloid Science*, 1962, vol. 17, no. 4, pp. 334–347. https://doi.org/10.1016/0095-8522(62)90013-2

27. Dominguez D. D., Mowery R. L., Turner N. H. Friction and Durabilities of Well-Ordered, Close-Packed Carboxylic Acid Monolayers Deposited on Glass and Steel Surfaces by the Langmuir-Blodgett Technique. *Tribology Transactions*, 1994, vol. 37, no. 1, pp. 59–66. https://doi.org/10.1080/10402009408983266

Информация об авторах

Акулова Виктория Максимовна – аспирант, мл. науч. сотрудник. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Беларусь). E-mail: myfavoritecheese@mail.ru

Соломянский Александр Ефимович – канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Беларусь). E-mail: solasy@mail.ru

Мельникова Галина Борисовна – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Беларусь). E-mail: galachkax@gmail.com

Некрашевич Дарья Александровна – мл. науч. сотрудник. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Беларусь). E-mail: aleksgortyw@gmail.com

Синькевич Юрий Владимирович – д-р техн. наук, профессор. Белорусский национальный технический университет (ул. Б. Хмельницкого, 9, 220013, Минск, Беларусь). E-mail: Sinkevich.u@bntu.by

Чишанков Игнат Геннадьевич – мл. науч. сотрудник. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Беларусь). E-mail: chishankov_ignat@mail.ru

Агабеков Владимир Енокович – академик, д-р хим. наук, профессор, зав. отделом. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Беларусь). E-mail: mixa@ichnm.by

Information about the authors

Viktoryia M. Akulova – Ph. D. Student, Junior Researcher. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skorina str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: myfavoritecheese@mail.ru

Aliaksandr E. Salamianski – Ph. D. (Chemistry), Leading Researcher. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skorina str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: solasy@mail.ru

Galina B. Melnikova – Ph. D. (Chemistry), Senior Researcher. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovki str., 220072, Minsk, Belarus). E-mail: galachkax@gmail.com

Darya A. Nekrashevich – Junior Researcher. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skorina str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: aleksgortyw@gmail.com

Yurii V. Sinkevitch – D. Sc. (Engineering), Professor, Belarusian National Technical University (9, B. Khmelnitsky str., 220013, Minsk, Belarus). E-mail: Sinkevich.u@bntu.by

Ignat G. Chishankov – Junior Researcher. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skorina str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: chishankov_ignat@mail.ru

Vladimir E. Agabekov – Academician, D. Sc. (Chemistry), Professor, Head of the Department. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skorina str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mixa@ichnm.by