

### **Annotation**

The aim of the work is to substantiate the fundamental basis of tribomutation processes based on the quantum mechanism of formation of the classical form of the tribosystem. For this purpose, a theoretical model was developed based on the hypothesis of P. Atkins, whose research showed that the apparatus of quantum mechanics is able to physically correctly describe the appearance of a real, classical object from a quantum state. In accordance with the obtained equations, it is assumed that when replacing quantum information with classical information, the effects of quantum nature are preserved, despite the "action" of the postulate of wave function reduction. At the same time, the postdecoherent physical system approaches quantum objects.

*Keywords:* wave function, density matrix, quantum entanglement, tribosystem, decoherence

УДК 531.43

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-262

М.Г. Шалыгин, А.Г. Суслов  
Брянский государственный технический университет,  
Брянск, Россия, migshalygin@yandex.ru

## **МОДЕЛЬ ИЗНАШИВАНИЯ НАНОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ УМЕНЬШЕНИЯ ПЕРИОДА ПРИРАБОТКИ ФРИКЦИОННОЙ ПАРЫ**

### **Аннотация**

Приведена молекулярно-механическая модель изнашивания наногеометрии (субшероховатости) поверхностей трения, основанная на теории усталостного и адгезионного разрушения поверхности. Показано, что модель адекватна в условиях установившегося износа и равновесной шероховатости. Приведена технология ускорения завершения процесса приработки.

*Ключевые слова:* приработка, субшероховатость, модель, износ, качество поверхности.

### **Введение**

Развитие исследований в области трибологии и средств профилирования поверхностей деталей высокого разрешения позволяет при обеспечении износостойкости учесть микронеровности в нанометровом диапазоне (субшероховатость), сформировавшиеся в процессе приработки на фактических площадках контакта. Таким образом, как показывают результаты экспериментальных исследований поверхностей трения на износ, в период приработки целесообразно использовать модель изнашивания, основанную на геометрии шероховатости поверхности. Тогда как в период установившегося износа необходимо учитывать субшероховатость поверхности.

### **Методы и материалы**

Теоретические исследования базировались на микро- и наногеометрии поверхностей трения, теории молекулярного и усталостного изнашивания. Экспериментальные исследования проводили на образце, изготовленном из стали

45, поверхности образца обрабатывали шлифованием до шероховатости Ra = 1,0 мкм.

Отжиг образцов проводили в муфельной печи. Печь разогревалась до температуры 180°C, образцы, обсыпанные порошкообразным диоксидом кремния, помещали в печь и выдерживали в течении 30 мин. Остывание образцов происходило в печи при открытой дверце. Более детально методика проведения отжига приведена в работе [1]. Испытания на износ проводили по схеме цилиндр-плоскость. Испытания проводили без смазочного материала, при нагрузке 30 Н. Скорость вращения цилиндрического образца 60 об/мин, продолжительность испытаний 4 мин. Радиус контртела R=25 мм. Шероховатость образцов измерялась на профиллографе БВ7669М на базовой длине 0,8мм, в трех измерениях Химический анализ поверхности проводили на спектрометре Искролайн-100, металлографию осуществляли на микроскопе LeicaDM, предварительно обработав поверхность 3-ным спиртовым раствором азотной кислоты. В качестве контртела выступала сталь 40X с качеством поверхностей Ra = 1,0 мкм.

### Результаты и обсуждение

Принимая, что износ контактирующих пиков субшероховатости обусловлен усталостными свойствами, механический удельный износ определяется как сумма удельных износов при пластической и упругой деформациях и их срезе [2]:

$$u_c = \frac{V_{\text{деф.пл}} + V_{\text{деф.упр}} + V_{\text{деф.ср}}}{A_r L} \quad (1)$$

где  $V_{\text{деф.пл}}$ ,  $V_{\text{деф.упр}}$ ,  $V_{\text{деф.ср}}$  – объем деформируемого материала субшероховатости при пластическом, упругом контакте и срезе;  $A_r$  – площадь фактического касания.

Объем деформируемого материала при упругом, пластическом контакте или срезе определяется как сумма объемов деформируемых пиков на число циклов до разрушения:

$$V_{\text{деф}} = n_{\text{ц}} \sum V_{\text{деф.в}} \quad (2)$$

тогда как суммарный объем деформируемых пиков определяется как объем единичного деформируемого пика  $V_{\text{деф.в}}$  на число взаимодействующих пиков  $n_{\text{вз}}$ : для пластического  $V_{\text{деф.в.пл}} = V_{\text{деф.в}} n_{\text{вз.пл}}$ , упругого  $V_{\text{деф.в.упр}} = V_{\text{деф.в}} n_{\text{вз.упр}}$  контакта и среза  $V_{\text{деф.в.ср}} = V_{\text{деф.в}} n_{\text{вз.ср}}$  неровностей.

Исходя из предположения, что вершина пика субшероховатости стремится к сферической форме, объем фактически деформируемого материала можно смоделировать частью эллипсоида вращения, который деформируется под действием контртела на основе общего выражения

$$V_{\text{ф}} = \pi \Phi_{\text{деф}} \frac{ab h_{\text{вн}}^2}{4Rp^2} \left( 2Rp - \frac{h_{\text{вн}}}{3} \right) \quad (3)$$

где  $a$ ,  $b$  – параметры эллипсоида вращения, определяющие фактическую площадь контакта;  $\Phi_{\text{деф}}$  – параметр, зависящий от типа деформации:  $\Phi_{\text{пл}} = (\tau_{\text{сдв}}/\sigma_{\text{вр}})$ ;  $\Phi_{\text{упр}} = (\sigma_{\text{н}}/\sigma_{\text{вр}})$ ;  $\Phi_{\text{ср}} = 1$ .

Очевидно, что число циклов до разрушения материала при резании  $n_{\text{ц}} = 1$ , тогда число циклов при пластической и упругой деформациях определяется по выражениям, приведенным в работе [3.]. Число взаимодействий субшероховатости поверхности с контртелом определяется как отношение среднего числа зерен на

поверхности детали  $\chi_{\text{ср}}$  и относительного сближения  $\varepsilon$  трущихся поверхностей. Так как субшероховатость располагается на фактических площадках контакта шероховатости, можно предположить, что относительное сближение определяется как отношение абсолютного сближения на наибольший пик субшероховатости. Абсолютное сближение будет равным разности наибольшего пика субшероховатости и высоты субшероховатости после ее внедрения в контртело.

Разность наибольшего пика субшероховатости и высоты субшероховатости после ее внедрения будет являться глубиной внедрения  $h_{\text{вн}}$ . При этом, как показали исследования связи субшероховатости поверхности и размеров зерен материала, наибольший пик субшероховатости не будет превышать наибольшего размера зерна  $R_{\text{maxс}} < l_{\text{д.кр.}}$ , тогда число взаимодействий субшероховатости поверхности с контртелом:

$$n_{\text{вз}} = \frac{\chi_{\text{ср}} l_{\text{д.кр.}}}{h_{\text{вн}}} \quad (4)$$

Глубину внедрения можно описать через величину пластической и упругой [4] деформаций шероховатой поверхности в процессе приработки. Так как субшероховатость формируется фазовым составом и структурой материала (что справедливо для сталей), то число взаимодействий пиков субшероховатости с контртелом необходимо определять на основе фазового и структурного состава материала [4].

В процессе приработки в местах действия локальных контактных пластических и упругих деформаций будет разрушаться окисная пленка и образовываться ювенильный контакт трущихся поверхностей. Учитывая относительно малые геометрические размеры субшероховатости, очевидно, что субшероховатость наряду с механической составляющей изнашивания будет подвержена молекулярному износу, обусловленному схватыванием поверхностей при трении. Молекулярный износ осуществим в случае, когда энергия взаимодействия молекул контртела  $E_{\text{вз.к}}$  больше энергии адгезионного взаимодействия  $E_{\text{а}}$  и энергии взаимодействия молекул тела  $E_{\text{вз.т}}$ , т.е.  $E_{\text{вз.к}} > E_{\text{а}} > E_{\text{вз.т}}$ . Приведенное неравенство по своей сути является необходимым условием осуществления молекулярного износа тела или контртела. Проведя простейшие преобразования неравенства, получим следующий параметр [5]:

$$A = \frac{E_{\text{а}} - E_{\text{вз.т}}}{E_{\text{вз.к}}} \quad (5)$$

При значениях параметра  $A \leq 0$  будет осуществляться молекулярный износ контртела, при  $A > 0$  – молекулярный износ тела. В некоторых случаях, при условии  $E_{\text{а}} > E_{\text{вз.т}}$  и, одновременно,  $E_{\text{а}} > E_{\text{вз.к}}$  возможен как износ тела, так и контртела. На границе двух фаз находятся некомпенсированные связи, которые направлены в сторону менее плотной среды. Эти связи испытывают избыточное силовое воздействие со стороны частиц твердого тела, которое стремится «втянуть» частицы поверхностного слоя внутрь более плотной среды.

Молекулярная составляющая удельного износа субшероховатости определяется как объем адгезионных вырывов на фактической площади контакта за путь трения. Молекулярное изнашивание ( $s_{\text{с}}$ ) стальных поверхностей напрямую будет зависеть от числа дефектов, размеров и формы зерен, типа решетки. Тогда

$$s_{\text{с}} = \frac{k_{\text{реш}} V_{\text{а.т.}}}{A_r L} \quad (6)$$

где  $V_{a,t}$  – объем, отделяемый при молекулярном износе;  $k_{реш}$  – коэффициент, учитывающий процентное соотношение структуры рассматриваемого типа в изнашиваемом материале.

Если молекулярное изнашивание субшероховатости происходит близко к границе зерна или месту скопления дислокаций, тогда определение параметра  $V_{a,t}$  представляет трудно решаемую задачу. Общая величина молекулярного износа, в жизненном цикле изделия, напрямую зависит от числа циклов взаимодействий поверхностей  $n_{ц.а}$ . Представляет интерес его определение при единичном контакте поверхностей ( $n_{ц.а} = 1$ ). Пластическая деформация способствует возникновению молекулярного изнашивания.

При пластических деформациях дислокации перемещаются к краю зерна, следовательно, в начальный момент трения молекулярное изнашивание будет больше, чем при установившемся режиме. Атомы кристаллических решеток сопряженных поверхностей, расположенные близко к зоне пластических деформаций и образовавшие молекулярную связь, приведут к увеличению отделяемого объема  $V_1$  в процессе изнашивания. Возможны случаи, когда неровности трущихся поверхностей оказываются на некотором расстоянии друг от друга, однако достаточном, чтобы между ними образовалась межмолекулярная связь и при этом на некотором удалении от зоны фактического контакта. В таком случае также произойдет увеличение отделяемого объема  $V_2$  при износе. В этом случае, объем, отделяемый при молекулярном износе, если такой произошел (5), можно определить из формы и характеристик кристаллической решетки, а также из физико-механических свойств зерен материала и параметров субшероховатости.

Энергия единицы связи определяется из энергии активации адгезии  $E_H$  и расстояния, на котором взаимодействие молекул стремится к нулю  $z_0$ . Число связей, приходящихся на единицу площади контакта, если за единицу площади принять единичную молекулу, образовавшую связь, определяется как отношение числа некомпенсированных связей молекулы, образовавших адгезионную связь на число некомпенсированных связей адгезива и субстрата. Тогда энергия адгезионного взаимодействия, с учетом сил Лондона, определяется по формуле

$$E_a = \frac{A_H w^2}{z_0^2 w_1 w_2} \quad (7)$$

где  $A_H$  – константа Гамакера;  $w_1, w_2$  – число некомпенсированных связей тела и контртела;  $w$  – число некомпенсированных связей молекулы, образовавших адгезионную связь;  $z_0$  – компенсированное расстояние, на котором энергия взаимодействия равна нулю.

Адгезионное взаимодействие осуществимо, когда свободная молекулярная связь активирована, поэтому в выражении (7) константа Гамакера по своей сути характеризует энергию активации адгезии  $A_H = E_H$ . Число некомпенсированных связей у единичной молекулы, находящейся на границе раздела фаз, определяется исходя из кристаллической решетки твердого тела. Компенсированное расстояние  $z_0$  в реальных условиях является постоянно изменяющейся функцией, зависящей от частоты собственных колебаний молекул и других факторов. Энергию взаимодействия единичной молекулы внутри твердого тела можно описать потенциалом Леннарда–Джонса, потенциалом Букиннгема или потенциалом Штокмайера.

С учетом рассмотренной картины молекулярно-механического изнашивания субшероховатости поверхностей трения, интенсивность изнашивания

субшероховатости поверхности, а именно усталостная  $u_c$  и адгезионная  $s_c$  составляющие, определяются через удельный износ

$$I_h = \frac{(u_c + s_c) \left( \frac{A_r}{A_a} \right)}{\rho} \quad (8)$$

Однако, как показали результаты исследований, выражение (8) справедливо для установившегося износа, тогда как адгезия  $s_c$  основной вклад в величину износа вносит в период приработки, тогда адгезионной составляющей можно пренебречь и с учетом (1) получим выражение:

$$I_h = \frac{V_{\text{деф.пл}} + V_{\text{деф.упр}} + V_{\text{деф.сп}}}{\rho A_a L} \quad (9)$$

где  $\rho$  – плотность материала.

Экспериментальные исследования показали, что полученные теоретические модели износа субшероховатости адекватны для процесса установившегося изнашивания и неадекватны для процесса приработки. Поэтому для определения износа поверхностей трения для условий приработки целесообразно использовать существующие теоретические модели изнашивания шероховатости поверхности [3]. А для процесса установившегося износа математические модели изнашивания субшероховатости поверхности (9).

С точки зрения повышения износостойкости и долговечности пар трения интерес представляют методы уменьшения времени приработки поверхностей с целью наиболее быстрого достижения поверхностями трения равновесной шероховатости. В рамках развития разработанной модели изнашивания субшероховатости поверхности предложены несколько технологических методов уменьшения времени приработки.

В настоящее время проводится большой объем исследования контактирующих поверхностей в период приработки. Ведется анализ процессов формирования микропрофиля поверхностей деталей машин на этапах обработки и приработки [6, 7]. Разрабатываются методы технологического управления физико-химическими параметрами поверхностных слоев [9]. Проводятся исследования износостойкости, контактной жесткости и антифрикционных свойств поверхностей после их напыления и упрочнения [9]. Проводится моделирование процессов приработки для поверхностей различной геометрии и упрочнения [10]. Разрабатываются методики приработки трибосистем [11]. Оценивается надежность трибосистем в целом [12]. Проводятся исследования изменения конструкции трибосопряжений с целью уменьшения периода приработки [13].

В проведенных в Брянской государственном техническом университете исследованиях по уменьшению периода приработки за счет уменьшение неровностей шероховатости с целью ускорения наступления процесса изнашивания по субшероховатости сравнение проводили по двум образцам: образец 1 – не отожженный в печи; образец 2 – отожженный в печи. Результаты измерения параметров шероховатости образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Средние значения параметров шероховатости поверхности по трем измерениям

Параметр	Образец 1	Образец 2
$Ra$ , мкм	0,993	0,220
$Rz$ , мкм	3,701	-

$R_{max}$ , мкм	5,942	1,163
$S_m$ , мм	0,073	0,167
$S$ , мм	0,013	0,008
$t_{50}$ , %	68,5	52,2

Как видно из табл. 1 высотные параметры шероховатости  $Ra$ ,  $R_{max}$  уменьшились: параметр  $Ra$  в 4,5 раз; параметр  $R_{max}$  – в 5,1 раз. Шаговые параметры  $S$ ,  $S_m$  повели себя разнонаправленно: параметр  $S_m$  увеличился в 2,2 раза; параметр  $S$  уменьшился в 1,6 раз. Уменьшение высотных  $Ra$ ,  $R_{max}$  и увеличение шаговых  $S_m$  параметров шероховатости свидетельствует о выглаживании поверхности в следствии проведенного отжига. Уменьшение параметра  $S$  говорит об общем уменьшении количества выступов шероховатости. Также следует отметить уменьшение значения параметра опорной кривой профиля  $t_r$  на уровне 50%, как характеристики уменьшения несущей способности материала.

Испытания образцов на износ (рис. 1) позволили установить, что выглаживание поверхности привело к уменьшению износа, что позволит уменьшить время приработки.

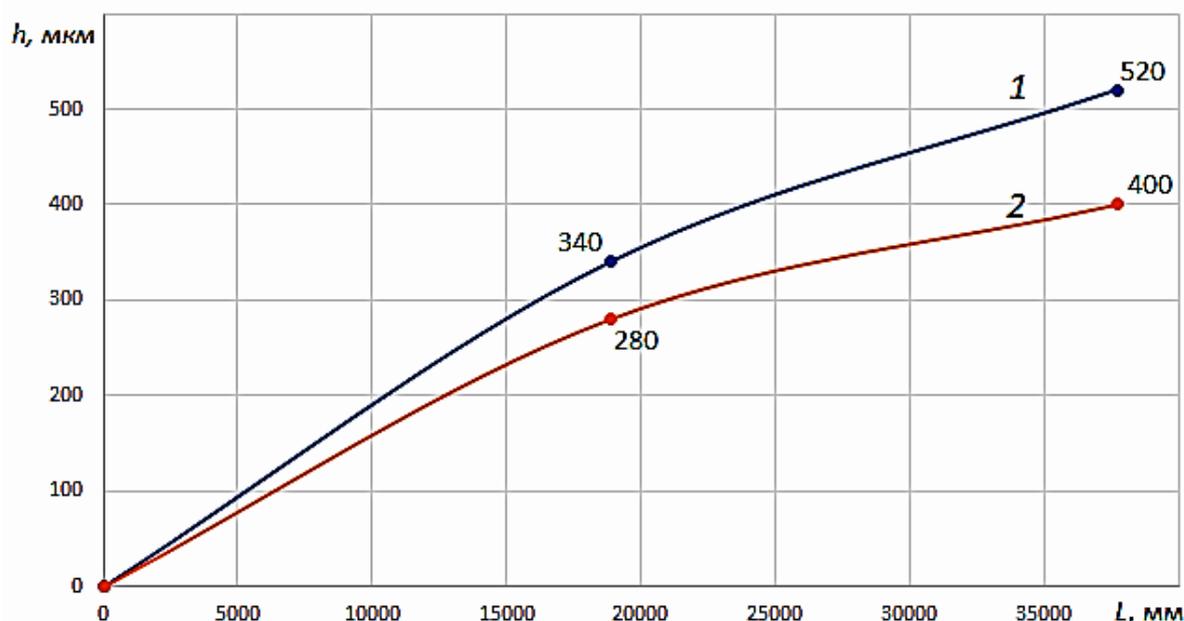


Рисунок 1 – Результаты испытания на износ пары трения: 1 – образец 1; 2 – образец 2

Так, износ пары трения с образцом 1 составил 0,52 мм, с образцом 2 – 0,4 мм. Интенсивность изнашивания пары трения с образцом 1 –  $1,38 \cdot 10^{-5}$ , образцом 2 –  $1,06 \cdot 10^{-5}$ . Следовательно, можно прийти к заключению, что процесс приработки образца 2 завершится быстрее, чем у образца 1.

### Заключение

Проведенный химический анализ образцов показал, что в поверхностном слое образца 2 после отжига в порошке диоксида кремния увеличилось количество кремния в 1,18 раз и уменьшилось содержание хрома в 0,18 раз. Увеличение содержания кремния можно объяснить его переходом из диоксида кремния в поверхностный слой стали. Объяснить потерю хрома можно его расходом на возникающую химическую реакцию  $Cr + SiO_2 = CrO + SiO_2$ . Однако, данное предположение требует дополнительного подтверждения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суслов А.Г., Шалыгин М.Г. Управление наногеометрией деталей методом поверхностного упрочнения // Научно-технические технологии в машиностроении. 2021. № 11. С. 38-41.
2. Шалыгин М.Г. Изнашивание субшероховатости поверхностей трения в водородсодержащей среде: монография. – М: Инновационное машиностроение, 2018. – 92 с.
3. Фундаментальные основы технологического обеспечения и повышения надежности изделий машиностроения / под ред. А.Г. Суслова. – М.: Инновационное машиностроение, 2022. – 552 с
4. Suslov AG, Shalygin MG. A wear model for subrough surface contacts of martensitic steels. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. 2019; 233(10):1574-1584.
5. Shalygin M.G. Surface Parameters with Different Treatment Technologies and Their Effect on Wear. J. Frict. Wear (2019) 40: 213. <https://doi.org/10.3103/S1068366619030115>
6. Нагоркин М.Н., Федоров В.П., Суслов А.Г., Тотай А.В. Технологическое управление параметрами эксплуатационной шероховатости поверхностей деталей пар трения скольжения комбинированной антифрикционной обработкой // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2023. – № 12(150). – С. 37-45. – DOI 10.30987/2223-4608-2023-37-45. – EDN QFJRDD.
7. Суслов А.Г., Шалыгин М.Г. Комплексное технологическое повышение износостойкости и статической прочности деталей из стали 40X13 // Научно-технические технологии в машиностроении. 2018. № 1. С. 19-21
8. Тотай А.В. Повышение эксплуатационной надежности деталей технологическим управлением физико-химическими параметрами их поверхностных слоев // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2020. – № 1(103). – С. 24-30. – DOI 10.30987/2223-4608-2020-2020-1-24-30. – EDN WRAIUI
9. Пыриков И. Л. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств плоских поверхностей скольжения // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2021. – № 1(115). – С. 15-23. – DOI 10.30987/2223-4608-2020-2021-1-15-23. – EDN NPWXVY.
10. Волченков А.В., Никитина Л.Г. Алгоритм разработки программы приработки криволинейных поверхностей // Транспортное машиностроение. – 2023. – № 2(14). – С. 12-18. – DOI 10.30987/2782-5957-2023-2-12-18. – EDN CQFMSY.
11. Войтов В.А., Бекирова А.Ш., Войтов А.В., Цымбал Б.М. Методика приработки трибосистем и экспериментальная проверка ее эффективности // Трение и износ. – 2019. – Т. 40, № 5. – С. 487-497. – EDN XNTCSA.
12. Клименко Н.П. Оценка надежности трибосистем на неустановившихся режимах работы // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2022. – № 2. – С. 7-12. – DOI 10.24143/2073-1574-2022-2-7-12. – EDN ZRSQJE.
13. Коченов В.А., Грунин К.Е. Повышение долговечности и износостойкости деталей трибосопряжений ДВС путем изменения их конструктивных особенностей // Тракторы и сельхозмашины. – 2017. – № 8. – С. 47-52. – EDN ZENSLN.

M.G. Shalygin, A.G. Suslov  
Bryansk State Technical University,  
Bryansk, Russia, migshalygin@yandex.ru

## THE WEAR MODEL OF THE NANOGOMETRY OF FRICTION SURFACES AND THE TECHNOLOGY OF REDUCING THE RUN-IN PERIOD OF THE FRICTION PAIR

## Abstract

A molecular mechanical model of the wear of nanogeometry (sub-roughness) of friction surfaces based on the theory of fatigue and adhesive destruction of the surface is carried out. It is shown that the model is adequate under conditions of steady wear and equilibrium roughness. The technology of accelerating the completion of the burn-in process is given.

*Keywords:* run-in, sub-roughness, model, wear, surface quality.

УДК 665.7.038.62

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-263

И.А. Шульгин<sup>1,2</sup>, Wu Jiangyu, А.Д. Бреки<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, igorshulgin@polihimnpp.ru

<sup>2</sup>ООО «НПП «Полихим», Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Jiangsu Pedagogical University, Xuzhou, 101 Shanghai Road, China

## ПОЛУЧЕНИЕ ПРОТИВОЗАДИРНОЙ ПРИСАДКИ НА ОСНОВЕ ОСЕРНЁННОГО МЕТИЛОВОГО ЭФИРА ПОДСОЛНЕЧНОГО МАСЛА

### Аннотация

В работе приведён синтез новой противозадирной присадки и исследованы её свойства увеличения нагрузки сваривания при добавлении в индустриальное масло. Получение присадки проводится по реакции метилового эфира жирных кислот подсолнечного масла с элементной серой в инертной атмосфере с последующей очисткой продукта.

*Ключевые слова:* противозадирная присадка, сульфидирование, метиловый эфир жирных кислот подсолнечного масла.

### Введение

На протяжении более чем ста лет, серосодержащие соединения привлекают внимание исследователей как потенциальные присадки к маслам и смазкам. Всё началось с того, что было обнаружено, что масла, полученные из нефти, и подвергшиеся недостаточной очистке от содержащейся в ней серы, зачастую, проявляли себя более эффективно, чем высокоочищенные. Анализ этих данных привел к попыткам ввести серу в масла искусственно [1].

В качестве субстрата для синтеза полисульфидных соединений могут выступать различные масла минерального, растительного, животного или синтетического происхождения, что будет определять свойства полученных присадок. Присоединение серы протекает достаточно легко, при нагревании масла с элементной серой в инертной атмосфере. В зависимости от процента вводимой серы, природы субстрата и условий протекания реакции возможно получение сильно различающихся по свойствам продуктов реакции: это могут быть смолы и резины, похожие на продукты вулканизации каучука, или же жидкие соединения, хорошо растворимые в базовых маслах [2-5]. На рисунке 1 показаны возможные варианты протекания реакции серы с олефинами.