

Научная статья

УДК 629.017; 665.76

DOI 10.46845/1997-3071-2024-74-123-135

Поверхностное натяжение свежих и отработанных судовых моторных масел

Антон Дмитриевич Глушков¹, Николай Яковлевич Синявский², Наталья
Анатольевна Кострикова³

^{1,2,3} Калининградский государственный технический университет, Калининград,
Россия

¹ glushkov0407@gmail.com

² nikolaj.sinyavskij@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1285-206X>

³ natalia.kostrikova@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2969-0346>

Аннотация. Хорошо известно, что эффективность использования смазочных масел зависит от температуры. Важную роль в эффективности смазки играет поверхностное натяжение масла на границе раздела фаз. Определение свойств поверхностного натяжения моторных масел очень желательно, так как это имеет прямое промышленное значение. Хотя поверхностное натяжение не является самым важным свойством в определении относительной смазывающей способности, связь между физическими свойствами отработанных масел и поверхностным натяжением исследована в настоящее время недостаточно. Различия в поверхностном натяжении смазочных масел вызовут различия в способности поддержания этих тонких пленок. Представляется, что в отсутствие опубликованных данных о поверхностном натяжении отработанных моторных масел исследование температурных зависимостей будет иметь значение для решения задач диагностики. В статье основное внимание уделяется измерению межфазного натяжения и его значению при загрязнении масла, например, полярными органическими соединениями, которые образуются при работе двигателя. Взаимодействие масла, воды и кислорода снижает функциональность масла. Эти загрязнения притягиваются к границе раздела «масло/воздух» и в результате значительно уменьшают межфазное натяжение. Измерены и аппроксимированы температурные зависимости плотности и коэффициентов поверхностного натяжения свежих и отработанных судовых моторных масел. Установлены корреляции между этими параметрами, что является важным для задачи диагностирования.

Ключевые слова: судовые моторные масла, коэффициент поверхностного натяжения.

Финансирование: работа выполнена в рамках госзадания Федерального агентства по рыболовству, рег. № 122030900056-4.

Для цитирования: Глушков А. Д., Синявский Н. Я., Кострикова Н. А. Поверхностное натяжение свежих и отработанных судовых моторных масел // Известия КГТУ. 2024. № 74. С. 123–135. DOI 10.46845/1997-3071-2024-74-123-135.

Original article

Surface tension of fresh and used marine motor oils

Anton D. Glushkov¹, Nikolay Ya. Sinyavskiy², Natal'ya A. Kostrikova³

^{1,2,3}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

¹glushkov0407@gmail.com

²nikolaj.sinyavskij@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1285-206X>

³natalia.kostrikova@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2969-0346>

Abstract. It is well known that the effectiveness of lubricating oils depends on temperature. An important role in the effectiveness of lubrication is played by the surface tension of the oil at the interface of phase. Determination of the surface tension properties of motor oils is very desirable, since it has direct industrial significance. Although surface tension is not the most important property in determining relative lubricity, the relationship between the physical properties of used oils and surface tension has not been sufficiently studied to date. Differences in the surface tension of lubricants result in differences in their ability to maintain these thin films. It seems that in the absence of published data on the surface tension of used motor oils, the study of temperature dependences will be important for solving diagnostic problems. This article focuses on the measurement of interfacial tension and its significance when the oil is contaminated, for example, by polar organic compounds that are formed during engine operation. Interaction of oil, water and oxygen reduces oil functionality. These contaminants are attracted to the oil/air interface and, as a result, significantly reduce the interfacial tension. The temperature dependences of the density and surface tension coefficients of fresh and used marine motor oils have been measured and approximated. Correlations between these parameters have been established, which is important for the diagnostic task.

Keywords: marine engine oils, surface tension coefficient.

Funding: The work was carried out within the framework of the state assignment of the Federal Fisheries Agency, reg. No. 122030900056-4.

For citation: Glushkov A. D., Sinyavsky N. Ya., Kostrikova N. A. Surface tension of fresh and used marine motor oils // *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2024;(74):123–135. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2024-74-123-135.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность использования масел в качестве смазочных материалов снижается с ростом температуры. Целесообразно определить, какую роль в этом играет поверхностное натяжение масла и как оно зависит от температуры. Известно, что поверхностное натяжение – не самое важное свойство при определении относительной смазывающей способности масел, однако его, несомненно, нужно учитывать при исследовании вопросов формирования и прочности тонких масляных пленок, образующихся между поверхностями трения.

Изменения поверхностного натяжения масла являются самым ранним признаком загрязнения, образования осадка и окисления. Испытание на межфазное

натяжение – одно из наиболее ценных испытаний, которое можно использовать для оценки моторного масла [1]. Существует множество методов определения коэффициента поверхностного натяжения жидкостей. На точность измерений влияет ряд факторов, включая чистоту используемого оборудования, перемешивание жидкости (необходимое для ресуспендирования твердых веществ) и случайное загрязнение жидкости грязной лабораторной посудой.

Базовые минеральные масла являются гидрофобными, они неполярны в отличие от воды и других жидкостей. Чистое минеральное базовое масло имеет высокое поверхностное натяжение, по-видимому, из-за его высокой полярности. Чистоту базового масла можно охарактеризовать его межфазным поверхностным натяжением (МПН), поскольку оно пропорционально концентрации полярных поверхностно-активных примесей. Увеличение вязкости масла соответствует увеличению МПН, однако повышенная температура снижает межфазное натяжение между маслом и воздухом. При некоторой повышенной температуре эти вещества становятся смешиваемыми. Многие присадки по своим свойствам являются поверхностно-активными и снижают МПН. Смазочные материалы, в состав которых входят высокие дозы поверхностно-активных присадок, более склонны к растворению и эмульгированию воды во время эксплуатации.

Обогащение смазочных материалов поверхностно-активными веществами, в том числе многими присадками, может отрицательно влиять на скорость выделения воздуха из смазочных материалов, что приводит к образованию пены. На пенообразование также влияют многие другие факторы, включая вязкость, перемешивание, температуру и наличие пеногасящих добавок.

О состоянии смазочных масел можно в значительной мере судить по межфазному натяжению. Когда масла разлагаются и загрязняются, МПН снижается. Тест на МПН характеризует не причину, а только эффект, тем не менее, это, по крайней мере, указывает на существование проблемы, что побуждает к дальнейшим исследованиям и делает МПН потенциально эффективным инструментом диагностики.

Когда масла окисляются, они образуют растворимые и нерастворимые гидрофильные соединения. Многие из этих соединений могут изменить МПН смазочного материала задолго до того, как произойдет какое-либо заметное изменение кислотного числа или вязкости. Существует очень много примесей, которые могут резко изменить МПН масла. К ним относятся моющие средства, пыль, технологические химикаты, антифриз, обезжириватели, поверхностно-активные вещества и т. д. Многие из этих загрязнений невидимы для других инструментов анализа масла, таких как счетчики частиц и спектрометры. Истощение поверхностно-активных присадок (моющих средств, противоизносных присадок, ингибиторов ржавчины и т. д.) может привести к повышению МПН.

Внезапное увеличение утечки масла может быть связано с изменением МПН. Во многих случаях основной причиной этого является повышение рабочей температуры. Поскольку МПН линейно уменьшается с увеличением температуры, высокая температура может привести к утечке из-за уменьшения поверхностного натяжения и снижения вязкости. И то, и другое может привести к повышенной утечке.

Исследования поверхностного натяжения моторных масел начались очень давно. Сегодня, на наш взгляд, следует шире использовать этот инструмент анализа смазочных масел.

Так, в работе [2] предложен метод вычисления температурной зависимости коэффициента поверхностного натяжения $\sigma = \sigma(T)$ и удельной теплоты образования поверхности.

В [3] предложен метод расчета коэффициента поверхностного натяжения через теплофизические свойства вещества. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными из литературы показали хорошее совпадение для разных веществ в широком диапазоне температур.

В работе [4] показано, что процессы, протекающие на межфазовой границе раздела сред, влияют на свойства дисперсных систем. В [5] предложен способ оценки смазывающей способности масел, основанный на измерениях поверхностного натяжения. Показано, что наилучшую смазывающую способность имеют масла с низким значением поверхностного натяжения.

В работе [6] рассмотрены теплофизические и поверхностные свойства нескольких базовых масел. Показано, что углеводороды с двойными связями и ароматическими кольцами имеют более высокую плотность. Наибольшее поверхностное натяжение наблюдается у смазок на основе сложных эфиров, что связано с их более высокой полярностью. Это приводит к меньшей смачиваемости.

Поверхностное натяжение – свойство, редко упоминаемое в литературе, хотя оно может играть важную роль в эффективности регенерации отработанных масел. После работы Винчестера и Ребера в 1929 г. [7] о температурной зависимости поверхностного натяжения свежих масел эта тема мало исследована.

Поверхностное натяжение влияет на охлаждающую способность масла, т.к. меняет его растекаемость. В работе [8] для отработанных смазочных масел была обнаружена новая корреляция между вязкостью и плотностью. Показано, что поверхностное натяжение отработанных смазочных масел может быть рассчитано на основе линейной корреляции между логарифмом поверхностного натяжения и логарифмом плотности (с погрешностью в пределах $\pm 2\%$). Большая часть образцов отработанных смазочных масел демонстрирует значительно более низкое поверхностное натяжение, чем чистые масла, это позволяет сделать вывод, что измерения поверхностного натяжения могут быть хорошим способом разработки новых методик тестирования и стандартов смазочных масел.

В связи с этим данная работа направлена на исследование температурных зависимостей коэффициента поверхностного натяжения и плотности ряда свежих и отработанных судовых моторных масел. Целью работы являлось также установление корреляции между плотностью и поверхностным натяжением судовых моторных масел при различных температурах и определение критических температур.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для экспериментальных исследований коэффициента поверхностного натяжения применялся метод отрыва капель:

$$\sigma = \frac{mg}{\pi D}, \quad (1)$$

где m – масса капли; D – диаметр шейки капли. Массу измеряли при помощи аналитических весов ВЛ-124В класса точности 1. Диаметр капилляра был равен 1,15 мм. Для измерения плотности масел применялся набор ареометров АОН-1 760-820, 820-880, 880-940 кг/м³ с погрешностью ± 1 кг/м³. В качестве образцов служили судовые моторные масла Shell Rimula 15W40 (свежее и отработанное 250 и 500 ч), Total Disola M4015 (свежее и отработанное 300 ч), Lukoil ТПЕО 12/40 (свежее и отработанное 300 ч), а также базовое масло SN-500. Никакой предварительной подготовки перед измерениями образцы не подвергались.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Температурные зависимости плотности исследуемых масел в диапазоне температур 20–80 °С приведены на рис. 1–2. Из работы [9] известно, что плотность масел уменьшается линейно с повышением температуры:

$$\rho = a + bT, \quad (2)$$

где ρ – плотность, кг/м³; T – температура; a – сдвиг прямой; b – коэффициент отрицательного наклона.

Из рис. 1–2 видно, что графики имеют линейные зависимости. Коэффициенты аппроксимации и величины достоверности аппроксимации R^2 приведены в табл. 1.

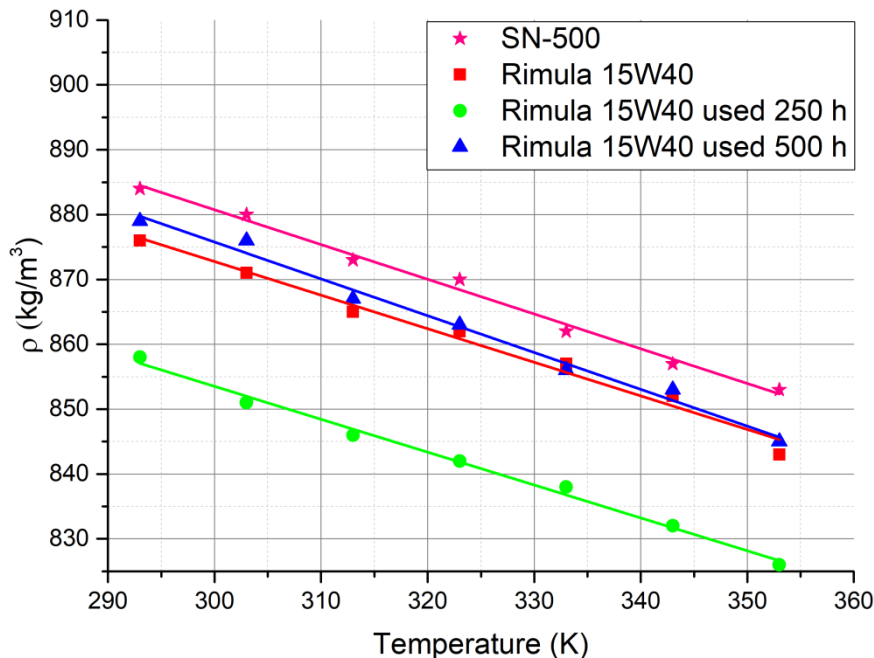


Рис. 1. Зависимости плотности масел SN-500 и Rimula 15W40 от температуры
Fig. 1. Dependence of the density of SN-500 and Rimula 15W40 oils on temperature

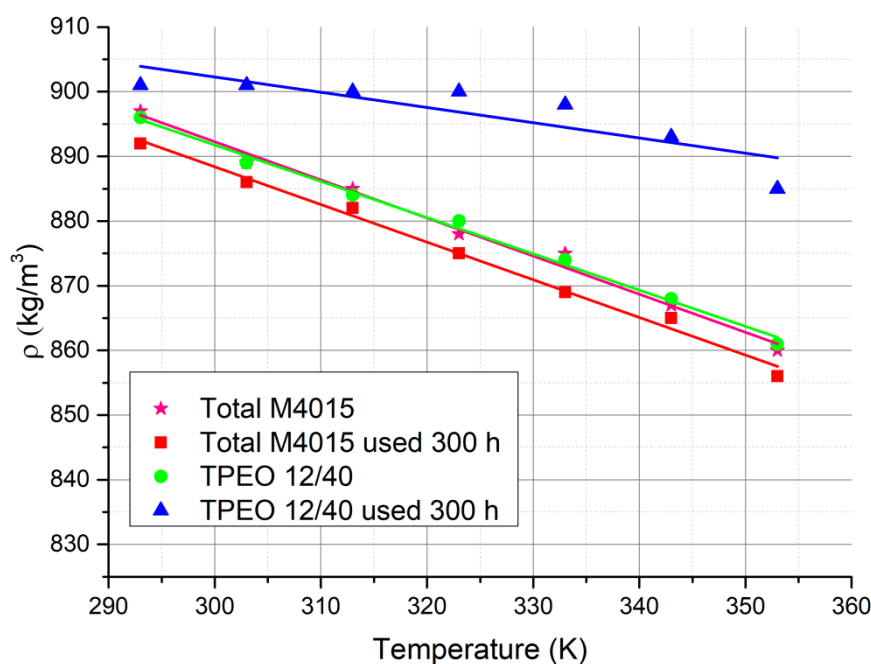


Рис. 2. Зависимости плотности масел Total M4015 и TPEO 12/40 от температуры
Fig. 2. Dependence of the density of Total M4015 and TPEO 12/40 oils on temperature

Таблица 1. Коэффициенты линейной аппроксимации $\rho = \rho(T)$ и $\sigma = \sigma(T)$. R^2 – величина достоверности аппроксимации, T_k – критическая температура
Table 1. Linear approximation coefficients $\rho = \rho(T)$ and $\sigma = \sigma(T)$. R^2 – value of approximation reliability, T_k – critical temperature

№ п/п	Масло	$\rho = a - bT$			$\sigma = a_1 - b_1T$			
		a	b	R^2	a_1	b_1	R^2	T_k, K
1	Базовое масло SN-500	1041	0.54	0.991	49	0.03	0.575	1630
2	Rimula 15W40	1028	0.52	0.981	52	0.06	0.950	872
3	Rimula 15W40 исп. 250 ч	1006	0.51	0.992	53	0.06	0.968	890
4	Rimula 15W40 исп. 500 ч	1046	0.57	0.986	64	0.08	0.738	802
5	Total M4015	1069	0.59	0.988	63	0.08	0.963	792
6	Total M4015 исп. 300 ч	1060	0.56	0.994	60	0.07	0.924	856
7	TPEO 12/40	1060	0.56	0.993	59	0.07	0.858	846
8	TPEO 12/40 исп. 300 ч	973	0.24	0.685	60	0.07	0.950	858

Существуют только эмпирические уравнения, связывающие поверхностное натяжение и температуру. Примером такого уравнения является формула Гуггенхайма–Катаямы–Ван дер Ваальса:

$$\sigma = \sigma_0 \left(1 - \frac{T}{T_k}\right)^n, \quad (3)$$

где σ_0 – константа для каждой жидкости; n – эмпирический коэффициент, значение которого равно 11/9 для органических жидкостей. Величина σ_0 может быть

задана выражением $k_1 T_k^{1/3} P_k^{2/3}$, где k_1 – универсальная безразмерная константа, T_k, P_k – критические температура и давление. Тогда уравнение для коэффициента поверхностного натяжения принимает вид [10]:

$$\sigma = k_1 T_k^{1/3} P_k^{2/3} \left(1 - \frac{T}{T_k}\right)^n. \quad (4)$$

На рис. 3–4 приведены экспериментальные температурные зависимости коэффициентов поверхностного натяжения исследованных моторных масел. Аппроксимировать эти зависимости формулой (4) не удастся. В работе [11] установлено, что поверхностное натяжение растительного масла уменьшается по линейному закону при повышении температуры:

$$\sigma = a_1 + b_1 T, \quad (5)$$

где a_1 и b_1 — коэффициенты линейной регрессии. Поверхностное натяжение также коррелирует с такими физическими свойствами, как вязкость и плотность веществ. В статье [12] предложена следующая связь между поверхностным натяжением и вязкостью, которая, по-видимому, справедлива для большого количества жидкостей:

$$\sigma = A e^{\frac{B}{\eta}}. \quad (6)$$

Экспериментальные зависимости коэффициентов поверхностного натяжения от температуры нами аппроксимированы линейными функциями (5). Коэффициенты аппроксимации приведены в табл. 1. Здесь же приведены критические температуры, т. е. температуры, при которых коэффициенты σ обращаются в нуль.

В статье [13] исследовали поверхностное натяжение растительных масел при температуре 10–140 °С и предложили уравнение для зависимости поверхностного натяжения от плотности в виде:

$$\sigma = a_2 + b_2 \rho, \quad (7)$$

где a_2 и b_2 – коэффициенты линейной регрессии.

В настоящей работе мы использовали для аппроксимации линейную зависимость между $\ln(\sigma)$ и $\ln(\rho)$, которая была предложена Пингейро и др. в [8]:

$$\ln(\sigma) = C + \lambda \ln(\rho), \quad (8)$$

где C и λ – параметры линейной регрессии, указанные в табл. 2.

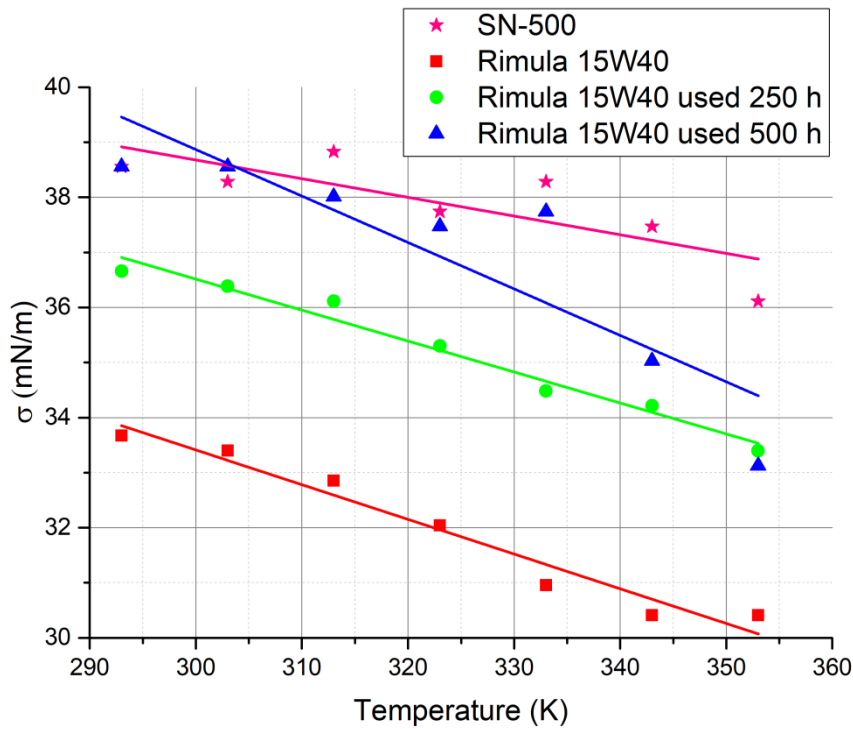


Рис. 3. Зависимости коэффициентов поверхностного натяжения масел SN-500 и Rimula 15W40 от температуры

Fig. 3. Dependences of surface tension coefficients oils SN-500 and Rimula 15W40 on temperature

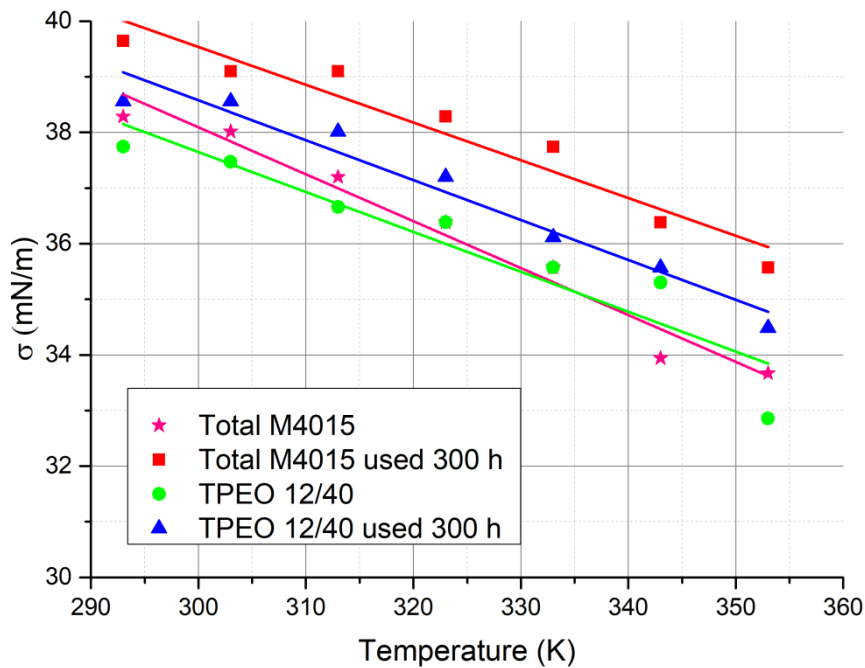


Рис. 4. Зависимости коэффициентов поверхностного натяжения масел Total M4015 и TPEO 12/40 от температуры

Fig. 4. Dependences of surface tension coefficients oils Total M4015 and TPEO 12/40 depending on temperature

Связь между коэффициентами поверхностного натяжения и плотностями моторных масел иллюстрируют рис. 5–6.

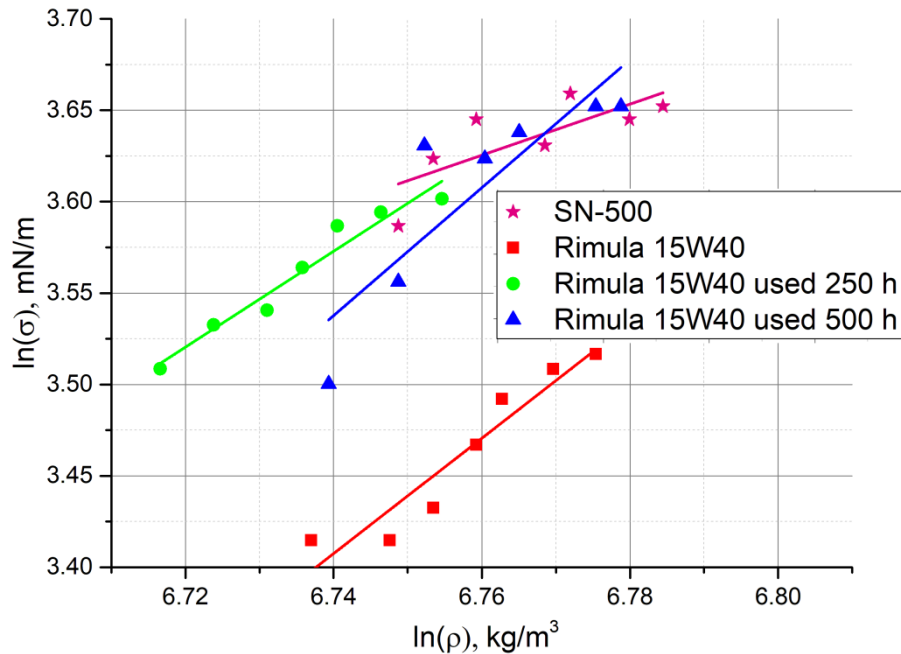


Рис. 5. Корреляция коэффициентов поверхностного натяжения и плотностей масел SN-500 и Rimula 15W40

Fig. 5. Correlation of surface tension coefficients and densities of SN-500 and Rimula 15W40 oils

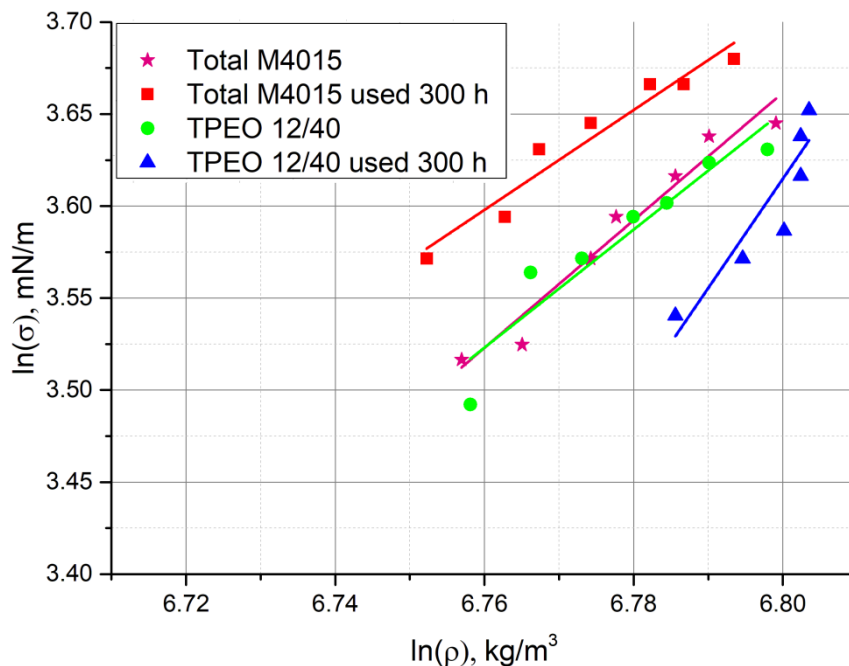


Рис. 6. Корреляция коэффициентов поверхностного натяжения и плотностей масел Total M4015 и TPEO 12/40

Fig. 6. Correlation of surface tension coefficients and densities of Total M4015 and TPEO 12/40 oils

Таблица 2. Коэффициенты линейной аппроксимации зависимости $\ln\sigma = f(\ln\rho)$
Table 2. Coefficients of linear approximation of the dependence $\ln\sigma = f(\ln\rho)$

№ п/п	Масло	$\ln(\sigma) = C + \lambda \ln(\rho)$		
		C	λ	R^2
1	Базовое масло SN-500	-5,81	1,396	0,505
2	Shell Rimula 15W40	-17,86	3,156	0,884
3	Shell Rimula 15W40 исп. 250 ч	-14,10	2,622	0,941
4	Shell Rimula 15W40 исп. 500 ч	-20,05	3,499	0,710
5	Total Disola M4015	-19,90	3,466	0,949
6	Total Disola M4015 исп. 300 ч	-14,74	2,713	0,932
7	Lukoil TPEO 12/40	-18,16	3,207	0,876
8	Lukoil TPEO 12/40 исп. 300 ч	-36,76	5,937	0,798

Плотность измеряется просто и быстро, поскольку требует недорогого набора калиброванных ареометров. Поверхностное натяжение измерить труднее, нужен более сложный измерительный прибор. Таким образом, определяя плотность масла, его поверхностное натяжение и вязкость можно вычислить. Например, для базового масла SN-500 ($\rho=873 \text{ кг/м}^3$ при $T=312 \text{ K}$) получаем $\sigma=38,2 \text{ мН}$ с погрешностью 2 %.

На основании экспериментальных результатов установлено, что для исследованных масел изменение поверхностного натяжения при температурах между $20 \text{ }^\circ\text{C}$ и $80 \text{ }^\circ\text{C}$ можно довольно точно определить прямо пропорциональной зависимостью. В этом случае линия может экстраполировать на температуру, при которой поверхностное натяжение равно нулю, что является критической температурой. Это не температура термодеструкции, не температура вспышки масла, не температура потери вязкости и способности образовывать масляную пленку. Эта температура значительно выше. Речь идет о критической температуре, при которой коэффициент поверхностного натяжения моторного масла обращается в ноль. Этой температуры масло в двигателе не достигает, т. к. двигатель отказывает значительно раньше. При критической температуре свойства пара и жидкости становятся одинаковыми и исчезает поверхность раздела фаз. Вместе с P_k и V_k это один из критических параметров, характеризующих состояния вещества.

Как видно из экспериментальных кривых, для некоторых масел имеется заметное отклонение от линейной зависимости, и маловероятно, что значение T_k , найденное процедурой экстраполяции, даст истинную критическую температуру. Значения T_k , полученные с использованием регрессии по формуле (5), для исследованных моторных масел (свежих и отработанных) приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что самая высокая критическая температура у базового масла, при добавлении присадок она значительно снижается. У исследованных свежих рабочих масел T_k лежат в пределах $792\text{--}842 \text{ K}$. У отработанных масел критические температуры выше, чем у свежих. Моторные масла – сложные многокомпонентные жидкости. Изменение критической температуры у отработанных масел свидетельствует об изменении состава углеводородов, срабатывании присадок, появлении продуктов износа, сажи, воды и пр.

Современные рецептуры моторных масел содержат жизненно важные пакеты присадок, которые помогают смазке выполнять основные рабочие функции. При продолжительной работе двигателя в моторном масле может произойти истощение всех таких присадок, особенно ингибиторов коррозии, депрессоров пены, антиоксидантов и противоизносных ингредиентов.

Как правило, поверхностное натяжение готового смазочного материала ниже, чем у базового масла, из которого смазка изготовлена, из-за наличия присадок. В идеале желательно использовать базовые масла с максимально возможным поверхностным натяжением, поскольку любая добавка или загрязнитель всегда снижают поверхностное натяжение по сравнению с эталонным чистым базовым маслом.

Присадки – диспергаторы, моющие средства, антиоксиданты или противоизносные присадки – всегда обладают поверхностной активностью, а это означает, что они будут иметь тенденцию располагаться на границах раздела «воздух/масло» и, следовательно, снижать соответствующее натяжение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследованы температурные зависимости плотности и коэффициентов поверхностного натяжения ряда свежих и отработанных судовых моторных масел. Установлена связь между вышеуказанными параметрами, определены значения аппроксимации и критические температуры, при которых поверхностное натяжение на границе двух фаз «масло/пар» исчезает.

Поверхностное натяжение является важнейшим свойством смазочной жидкости, оно помогает обеспечить герметичность, отсутствие утечек и условия смазки системы. Высокая температура значительно снижает поверхностное натяжение. Один из наиболее эффективных способов защиты элементов двигателя от трибологического изнашивания – создание на их поверхностях скольжения прочной граничной смазочной пленки, устойчивой при воздействии больших нормальных и касательных нагрузок. Очевидно влияние поверхностного натяжения на толщину масляной пленки, чем меньше поверхностное натяжение, тем больше растекаемость жидкости по поверхности твердого тела.

Список источников

1. Fitch J. The Surface Tension Test – Is It Worth Resurrecting. Noria Corporation, Practicing Oil Analysis September 2002. URL: <https://www.machinerylubrication.com/Read/376/surface-tension-test> (дата обращения: 01.04.2024).
2. Анализ температурной зависимости поверхностного натяжения жидкостей / Э. А. Масимов, Э. А. Эйвазов, А. Б. Ибрагимли, Г. Г. Мирзоева // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. Химические науки. 2015. № 12. С. 622–624.
3. Корепанов М. А. Метод расчета коэффициента поверхностного натяжения // Химическая физика и мезоскопия. 2005. Т. 7. № 2. С. 146–154.
4. Волков В. А. Коллоидная химия. Поверхностные явления и дисперсные системы. СПб.: Издательство «Лань», 2015. 672 с.

5. Исследование зависимости смазываемости конструкционных материалов от величины поверхностного натяжения масел / В. В. Калмыков, Д. А. Мельников, М. С. Горбачева, А. А. Сухарева // Современные наукоемкие технологии, 2017. № 6. С. 47–51.
6. Heat capacity, density, surface tension, and contact angle for polyalphaolefins and ester lubricants / Monica A. Coelho de Sousa Marques, Maria J. G. Guimarey, Vicente Domínguez-Arca, Alfredo Amigo, Josefa Fernandez // *Thermochimica Acta*. 2021. V. 703. P. 178994.
7. Winchester G., Reber R. K. Variation of Surface Tensions of Lubricating Oils with Temperature // *Industrial and Engineering Chemistry*. 1929. V. 21. N 1. P. 1093–1096.
8. Measurement and correlation of thermophysical properties of waste lubricant oil / C. T. Pinheiro, R. F. Pais, A. G. M. Ferreira, M. J. Quina, L. M. Gando-Ferreira // *J. Chem. Thermodynamics*. 2018. V. 116. P. 137–146.
9. Rodenbush C. M., Hsieh F. H., Viswanath D. S. Density and viscosity of vegetable oils // *J. Am. Oil Chem. Soc.* 1999. V. 76. P. 1415–1419.
10. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: справочное пособие. Л.: Химия, 1982. 592 с.
11. Oh F. C. H., Let C. C. Surface tensions of palm oil, palm olein and palm stearin // *Journal of Oil Palm Research*. 1992. V. 4. N 11992. P. 27–31.
12. Pelofsky A. H. Surface tension-viscosity relation for liquids // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 1966. V. 11. N 3. P. 394–397.
13. Characterization of the surface tension of vegetable oils to be used as fuel in diesel engines / B. Esteban, J. R. Riba, G. Baquero, R. Puig, A. Rius // *Fuel*. 2012. V. 102. P. 231–238.

References

1. Fitch J. The Surface Tension Test – Is It Worth Resurrecting. Noria Corporation, Practicing Oil Analysis September 2002. Available at: <https://www.machinerylubrication.com/Read/376/surface-tension-test> (accessed 01 April 2024).
2. Masimov E. A., Eyvazov E. A., Ibragimli A. B., Mirzoeva G. G. Analiz temperaturnoy zavisimosti poverkhnostnogo natyazheniya zhidkostey [Analysis of the temperature dependence of surface tension of liquids]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy. Khimicheskie nauki*, 2015, no. 12, pp. 622–624.
3. Korepanov M. A. Metod rascheta koeffitsienta poverkhnostnogo natyazheniya [Method for calculating the surface tension coefficient]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya*, 2005. vol. 7, no. 2, pp. 146–154.
4. Volkov V. A. *Kolloidnaya khimiya. Poverkhnostnye yavleniya i dispersnye sistemy* [Colloidal chemistry. Surface phenomena and disperse systems]. Saint-Petersburg, Lan' Publ., 2015, 672 p.
5. Kalmykov V. V., Melnikov D. A., Gorbacheva M. S., Sukhareva A. A. Issledovanie zavisimosti smazyvaemosti konstruktsionnykh materialov ot velichiny poverkhnostnogo natyazheniya masel [Study of the dependence of the lubricity

of structural materials on the surface tension of oils]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2017, no. 6, pp. 47–51.

6. Monica A. Coelho de Sousa Marques, María J. G. Guimarey, Vicente Domínguez-Arca, Alfredo Amigo, Josefa Fernandez. Heat capacity, density, surface tension, and contact angle for polyalphaolefins and ester lubricants. *Thermochimica Acta*, 2021, vol. 703, pp. 178994.

7. Winchester G., Reber R. K. Variation of Surface Tensions of Lubricating Oils with Temperature. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1929, vol. 21, no. 1, pp. 1093–1096.

8. Pinheiro C. T., Pais R. F., Ferreira A. G. M., Quina M. J., Gando-Ferreira L. M. Measurement and correlation of thermophysical properties of waste lubricant oil. *J. Chem. Thermodynamics*, 2018, vol. 116, pp. 137–146.

9. Rodenbush C. M., Hsieh F. H., Viswanath D. S. Density and viscosity of vegetable oils. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 1999, vol. 76, pp. 1415–1419.

10. Reed R., Prausnitz J., Sherwood T. *Svoystva gazov i zhidkostey: spravochnoe posobie* [Properties of gases and liquids: reference manual]. Leningrad, Khimiya Publ., 1982, 592 p.

11. Oh F. C. H., Let C. C. Surface tensions of palm oil, palm olein and palm stearin. *Journal of Oil Palm Research*, 1992, vol. 4, no. 11992, pp. 27–31.

12. Pelofsky A. H. Surface tension-viscosity relation for liquids. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 1966, vol. 11, no. 3, pp. 394–397.

13. Esteban B., Riba J. R., Baquero G., Puig R., Rius A. Characterization of the surface tension of vegetable oils to be used as fuel in diesel engines. *Fuel*, 2012, vol. 102, pp. 231–238.

Информация об авторах

А. Д. Глушков – аспирант Института морских технологий, энергетики и строительства

Н. Я. Синявский – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики

Н. А. Кострикова – кандидат физико-математических наук, доцент, проректор по научной работе

Information about the authors

A. D. Glushkov – graduate student at the Institute of Marine Technologies, Energy and Construction

N. Ya. Sinyavsky – DSc in Physics and Mathematics, professor, head of the Department of physics

N. A. Kostrikova – PhD in Physics and Mathematics, associate professor, vice-rector for research

Статья поступила в редакцию 20.05.2024; одобрена после рецензирования 01.07.2024; принята к публикации 02.07.2024.

The article was submitted 20.05.2024; approved after reviewing 01.07.2024; accepted for publication 02.07.2024.