

NATURE OF VISCOSITY-TEMPERATURE DEPENDENCE OF LUBRICATING OILS

Yu. N. Tsvetkov¹, M. Yu. Vlasov², L. I. Dekhtyr¹¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation² — Lumex-marketing Ltd, St. Petersburg, Russian Federation

The measurements of lubricating oils viscosity were carried out. The six grades of oils were chosen to investigate: four mineral oils — MS-20, I-40A, I-20A and MVP — and two synthetic polyalphaolefin oils — PAOM-13 and PAOM-4. The viscosity was determined using a rotational device Brookfield LVDV-II+Pro in different temperatures. For the investigated oils the plot of a derivative of viscosity with respect to temperature as a function of temperature turned out to approximate to a unified function close to a linear one. The existence of such a unified dependence follows from the thermal fluctuant nature of viscous flow of oils, that is the sensibility of oil viscosity to a temperature change is determined by the viscosity itself. It was demonstrated that the plot of viscous flow activation energy against viscosity is bounded with two asymptotes — horizontal and vertical ones. The existence of two asymptotes points to the different mechanism of viscous flow of comparatively low-molecular oils as against the high-molecular ones. The presence of horizontal asymptote is an evidence that the viscous flow of comparatively high-molecular oils occurs through sticking and breaking-off of separate structural fragments of neighboring molecules, and activation energy of such oils flow is determined by the energy of rupture of temporary ties between neighboring molecules; these ties are formed in the interaction of the structural fragments, which are kinetically independent structural elements of molecules. The presence of vertical asymptote points to the fact that viscous flow activation energy of the low-molecular oil, the molecule size of which is smaller than the size of structural fragments mentioned above, is determined by the energy necessary to shift the molecules as units relative to each other. Accordingly, the activation energy is determined by the total energy of the ties between the molecules in relative shifting and geometrical factors as well.

Keywords: mineral lubricating oil, polyalphaolefin oil, molecular structure, rotational viscometer, oil viscosity, temperature, activation energy, viscous flow, mechanism of flow, intermolecular interaction.

For citation:

Tsvetkov, Yuriy N., Michail Yu. Vlasov, and Leonid I. Dekhtyr. "Nature of viscosity-temperature dependence of lubricating oils." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.6 (2017): 1242–1251. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1242-1251.

УДК 665.76**ПРИРОДА ВЯЗКОСТНО-ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ
СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ****Ю. Н. Цветков¹, М. Ю. Власов², Л. И. Дехтярь¹**¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация² — ООО «Люмэкс-маркетинг», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Проведены измерения вязкости шести смазочных масел — четырёх масел нефтяного происхождения: МС-20, И-40А, И-20А, МВП, и двух синтетических: ПАОМ-13 и ПАОМ-4. Вязкость масел определяли на ротационном вискозиметре Брукфильда LVDV-II+Pro при различных температурах. Для разных масел зависимость производной вязкости можно аппроксимировать единой функцией, близкой к линейной, что следует из термофлуктуационной природы вязкого течения масел, т. е. чувствительность вязкости к изменению температуры определяется значением самой вязкости. Показано, что зависимость энергии активации вязкого течения от вязкости масел ограничивается двумя асимптотами: горизонтальной и вертикальной. Существование двух асимптот указывает на разный механизм вязкого течения у сравнительно низкомолекулярных масел и сравнительно высокомолекулярных. Наличие горизонтальной асимптоты свидетельствует о том, что вязкое течение сравнительно высокомолекулярных масел происходит

путём прилипания и отрыва отдельных структурных фрагментов между соседними молекулами, и энергия активации течения таких масел определяется энергией разрушения временных узлов между соседними молекулами, образованных взаимодействием структурных фрагментов, которые являются кинетически самостоятельными структурными элементами молекул. Существование вертикальной асимптоты указывает на то, что для низкомолекулярных масел, у которых размеры молекул меньше размера ранее упомянутых структурных фрагментов, энергия активации вязкого течения обусловлена энергией, необходимой для сдвига молекул как единого целого относительно друг друга на определённое расстояние и, соответственно, энергия активации будет определяться суммарной энергией связей между молекулами при их относительном сдвиге, а также геометрическими факторами.

Ключевые слова: минеральное смазочное масло, полиальфаолефиновое масло, молекулярное строение, ротационный вискозиметр, вязкость масла, температура, энергия активации, вязкое течение, механизм течения, межмолекулярное взаимодействие.

Для цитирования:

Цветков Ю. Н. Природа вязкостно-температурной зависимости смазочных масел / Ю. Н. Цветков, М. Ю. Власов, Л. И. Дехтярь // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1242–1251. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1242-1251.

Введение

Вязкость смазочного масла является мерой внутреннего трения в нём [1], [2]. От вязкости непосредственно зависят потери на трение при работе узла трения в режиме гидродинамической смазки и косвенным образом, так как вязкость зависит от молекулярной массы масла (потери в узле трения, работающем при граничной смазке). В судовой технике в режиме гидродинамической смазки работают, в частности, опорные подшипники скольжения судовых валопроводов и коленчатых валов судовых дизелей. При решении многих практических вопросов, связанных с выбором масла для указанных узлов трения, а также при рассмотрении теоретических вопросов жидкостной смазки, касающихся решения уравнения Рейнольдса, важно знать насколько изменяется вязкость с изменением температуры, т. е. *индекс вязкости* [2], [3]. Именно индекс вязкости может служить одним из показателей качества масла: чем менее чувствительна вязкость к температуре, тем более качественным считается масло. Вязкость в этом отношении, в отличие от индекса вязкости, является нейтральным показателем, т. е. масла с разной вязкостью имеют одинаковое применение в зависимости от условий гидродинамической смазки, и нельзя по значению вязкости, без привязки к режиму работы, для которого предназначено масло, сделать вывод о том, насколько качественным оно является.

Степень изменения вязкости углеводородных масел с изменением температуры, а также и сама вязкость, зависят от химического состава масла. Количество атомов углерода в молекулах масла, разветвлённость молекулы, а также наличие полярных функциональных групп, участвующих в межмолекулярном взаимодействии, являются определяющими факторами температурной зависимости вязкости масел. Для снижения чувствительности вязкости к изменению температуры в масла (в частности, моторные) добавляют загущающие присадки, количество которых в масле может достигать по массе 5 % и более. Для повышения эффективности таких добавок и обоснованного прогнозирования вязкости смеси углеводородных жидкостей с различными молекулярными массами необходимо проведение численного моделирования вязкости таких смесей [4], а для этого необходимо знать не только механизм взаимодействия между молекулами присадок и базового масла, но и механизм межмолекулярного взаимодействия в самом масле. Для выяснения последнего необходимо исследовать вязкостно-температурную зависимость масла, так как вязкость и вязкостно-температурная зависимость определяются межмолекулярными взаимодействиями в жидкости, и изучение этой зависимости является существенным в понимании взаимодействия между молекулами в жидкостях и их смесях [5], [6]. Однако здесь остаётся ещё много «белых пятен». Изучению зависимости вязкости масел от температуры посвящено много работ, в частности публикации [2], [7], [8], однако в них основной акцент сделан на статистической обработ-

ке вязкостно-температурных зависимостей масел с целью получения универсального уравнения для возможного его применения на практике в широком диапазоне условий эксплуатации без объяснения природы таких зависимостей, что не позволяет использовать их для обоснования путей совершенствования вязкостно-температурных свойств смазочных масел.

Целью работы является исследование природы температурной зависимости вязкости смазочных масел.

Методы и материалы

Испытанию подлежали две группы смазочных масел разного происхождения — четыре минеральных масла: МС-20, И-40А, И-20А, МВП, и два синтетических полиальфаолефиновых: ПАОМ-13 и ПАОМ-4. Контроль масел осуществляли методом инфракрасной (ИК) спектроскопии. ИК-спектры масел регистрировали с помощью инфракрасного фурье-спектрометра «ИнфРАЛЮМ ФТ-02». Степень разветвлённости молекул масел определяли по отношению количества метильных и метиленовых групп. Количество метильных групп CH_3 оценивали по площади S_{1380} пика при волновом числе 1380 см^{-1} , соответствующем деформационным колебаниям групп CH_3 (рис. 1). Количество метиленовых групп CH_2 оценивали по площади S_{720} пика поглощения при 720 см^{-1} , соответствующего маятниковым деформационным колебаниям групп CH_2 [9], [10]. Степень разветвлённости молекул оценивали по отношению площадей указанных пиков.

Для минеральных масел отношение S_{1380}/S_{720} составило примерно $1,9 - 2,1$, тогда как для синтетических это отношение оказалось равным $1,0 - 1,2$. Сравнительно низкие значения этих показателей указывают на преобладание в исследуемых маслах парафиновых структур н-строения. Более низкие значения отношения S_{1380}/S_{720} для полиальфаолефиновых масел указывают на то, что они имеют более однородную структуру. Действительно, состав минеральных масел представляет собой сложную смесь углеводородов — н-алканов, изоалканов, циклоалканов (нафтенов), алкенов и ароматических соединений, тогда как полиальфаолефиновые масла имеют более однородный состав как с точки зрения молекулярных масс, так и с точки зрения изомерного состава — молекулы полиальфаолефинов имеют линейное строение [11].

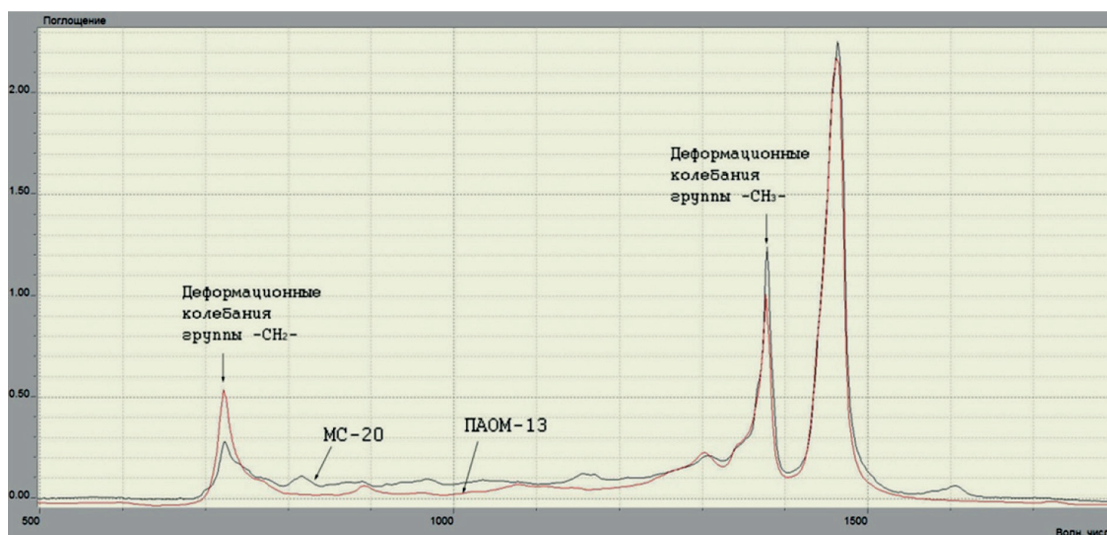


Рис. 1. Пример ИК-спектров минерального и полиальфаолефинового масла

Вязкость масел определяли на ротационном вискозиметре Брукфильда LVDV-II+Pro (рис. 2, а), представляющем собой вискозиметр с контролируемой скоростью сдвига, снабжённый измерительной системой Серле [12]. При испытании каждое масло помещали в термостатируемую ячейку и проводили опыты при четырёх температурных значениях в диапазоне от $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и различной скорости вращения шпинделя, что обеспечивало разные скорости

сдвига масла в зазоре ячейки. Вязкость масла регистрировали сначала в процессе увеличения скорости вращения с определёнными интервалами до достижения максимальной скорости вращения, а затем также в процессе снижения скорости до начального значения. Значение вязкости при конкретной температуре принимали равным среднему арифметическому значению, полученному при разной скорости вращения шпинделя.

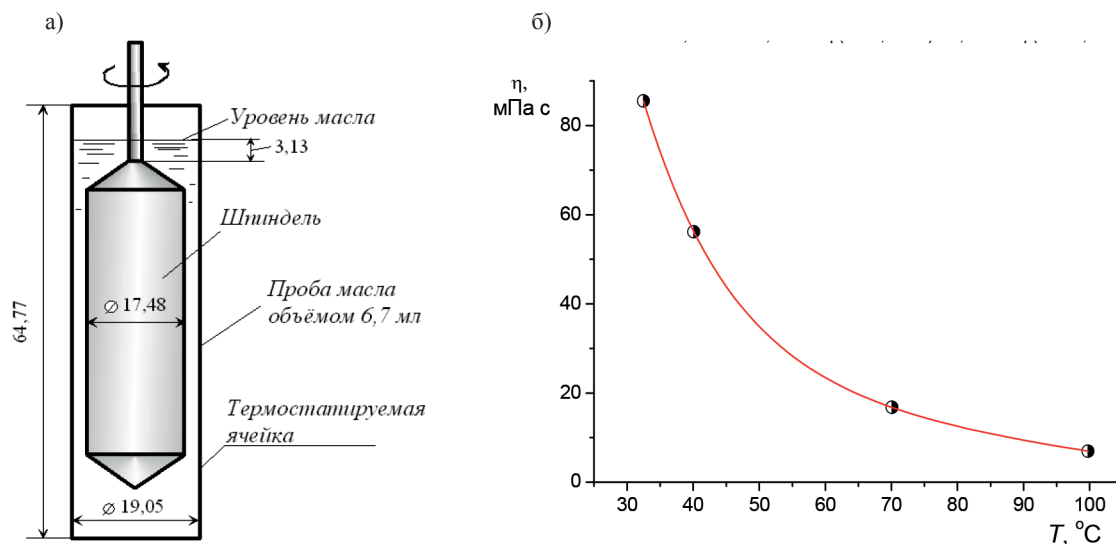


Рис. 2. Схема испытательной ячейки вискозиметра Брукфильда LVDV-II +Pro (а) и пример зависимости вязкости от температуры для масла И-40А (б)

Для каждого масла по четырём точкам аппроксимацией определяли аналитический вид зависимости $\eta(t)$ — рис. 2, б. По найденной аналитической зависимости в диапазоне измерения выбирали восемь-девять точек через семь – девять градусов, в этих точках находили вязкость и производную вязкости по температуре. Затем эти точки использовали для анализа влияния температуры на характеристики вязкости: увеличение таким способом количества точек позволило сделать процесс аппроксимации более наглядным.

Результаты и обсуждение

Как видно из рис. 3, каждое масло подчиняется собственной зависимости вязкости от температуры.

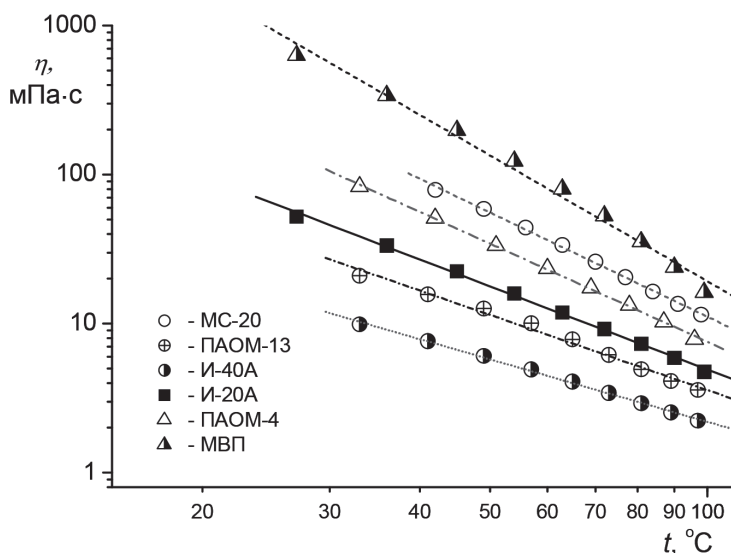


Рис. 3. Зависимости вязкости масел от температуры

Все графики $\eta(t)$, представленные на рис. 3, можно с достаточной точностью (коэффициенты корреляции принимали значения от 0,995 до 0,999) в диапазоне изменения температуры в несколько десятков градусов аппроксимировать степенными зависимостями следующего вида:

$$\eta = \frac{C}{t^n},$$

где C и n — опытные постоянные; t — значение температуры в °С.

Как следует из сопоставления зависимостей на рис. 3, с увеличением вязкости масла растёт ее чувствительность к температуре, что проявляется в увеличении показателя степени n при переменной t : если для масла МВП показатель $n = 1,40$, то для масла МС-20 $n = 2,80$. Это позволило предположить существование единой зависимости $d\eta/dt$ от вязкости η . График производной $d\eta/dt$ в зависимости от вязкости η представлен на рис. 4.

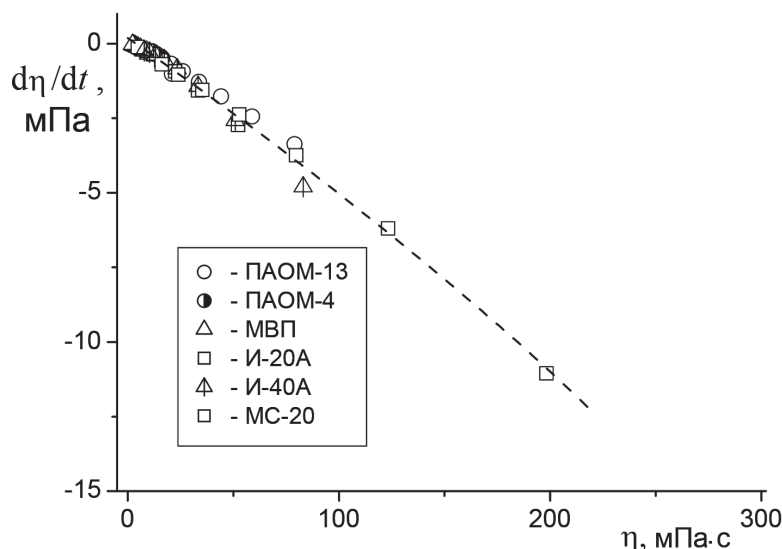


Рис. 4. Зависимость производной вязкости по температуре от вязкости для различных масел

Как видно из рис. 4, действительно, точки для разных масел укладываются в одну зависимость. Необходимо отметить, что существование единой зависимости $d\eta/dt$ от вязкости η было обнаружено ранее в работе [2] и сделан вывод о том, что наиболее важным фактором, влияющим на изменение вязкости от температуры, является сама вязкость, без объяснения причин существования такой зависимости.

По мнению авторов, существование единой зависимости $d\eta/dt$ от вязкости η можно объяснить с учётом известного факта, свидетельствующего о том, что вязкое течение углеводородных масел является термоактивационным процессом, т. е. зависимость вязкости от температуры подчиняется уравнению Аррениуса:

$$\eta = \eta_0 \exp\left(\frac{U}{RT}\right), \quad (1)$$

где U — энергия активация вязкого течения; R — универсальная газовая постоянная, равная 8,314 Дж/(моль·К); T — абсолютная температура.

Представленные на рис. 5 графики зависимости вязкости η от обратного значения абсолютной температуры T^{-1} , на которых по оси ординат нанесена логарифмическая шкала, действительно, представляют собой прямые линии, что находится в полном соответствии с уравнением (1). По углу наклона зависимостей $\eta(T^{-1})$ были рассчитаны значения энергии активация вязкого течения для каждого из испытанных масел (см. таблицу на с. 1247).

Продифференцировав зависимость (1) по температуре, получим

$$\frac{d\eta}{dT} = -\frac{U}{RT^2} \eta_0 \exp\left(\frac{U}{RT}\right). \quad (2)$$

Принимая во внимание, что $\frac{d\eta}{dT} = \frac{d\eta}{dt}$, и с учётом уравнения (1) выражение (2) можно переписать зависимость (2) в следующем виде:

$$\frac{d\eta}{dt} = -A\eta, \quad (3)$$

где $A = \frac{U}{RT^2}$.

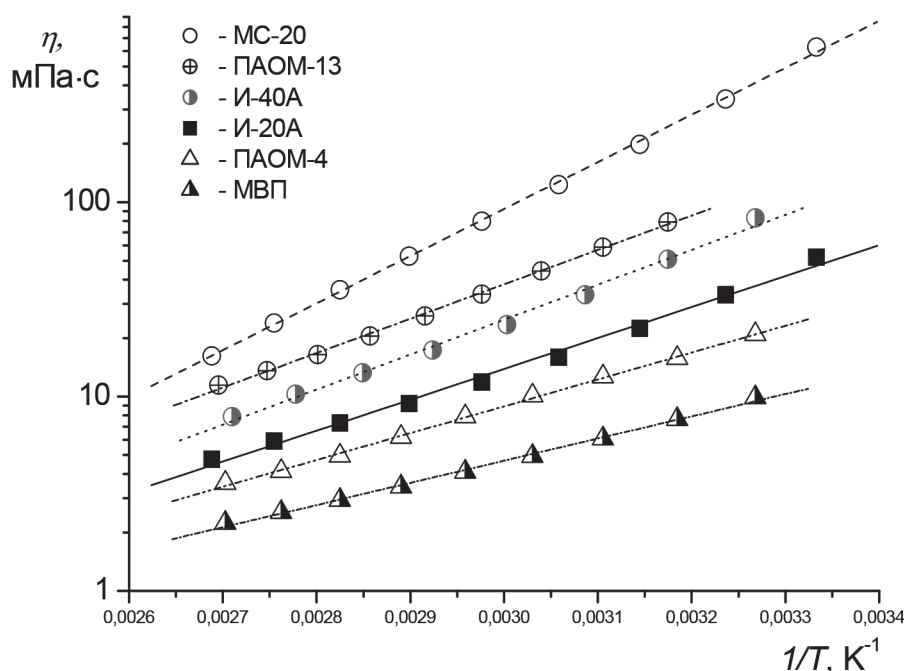


Рис. 5. Зависимость вязкости от обратного значения абсолютной температуры для различных масел

Очевидно, что коэффициент A перед переменной η в правой части уравнения (3) не является величиной постоянной, он зависит как от энергии активации, так и от температуры, однако зависимость на рис. 4 близка к линейной, а разброс экспериментальных точек несущественен. Это объясняется тем, что значение коэффициента A в уравнении (3) изменяется незначительно при изменении вязкости и температуры в широком диапазоне (см. таблицу). Тем не менее, эти незначительные изменения множителя A всё же приводят к отклонению графика рис. 4 от прямой линии, и он приобретает слабо выраженный нелинейный характер. Следовательно, именно термофлуктуационная природа зависимости вязкости от температуры является причиной существования единой зависимости $d\eta/dt$ от вязкости η (рис. 4).

Значения энергии активации и коэффициента A

Масло	U , кДж/моль	Значение A для разных масел при достижении вязкости		
		10 мПа·с	50 мПа·с	100 мПа·с
МВП	21,9	0,028	0,033	0,034
ПАОМ-4	26,4	0,030	0,037	0,039
И-20А	30,5	0,032	0,040	0,043
И-40А	34,4	0,032	0,042	0,045
ПАОМ-13	33,9	0,029	0,039	0,042
МС-20	46,4	0,035	0,047	0,052

По найденным значениям энергии активации вязкого течения каждого из испытанных масел была построена зависимость энергии активации от вязкости масел при температуре 20 °С, представленная на рис. 6. Зависимость $U(\eta)$ для минеральных масел можно аппроксимировать функцией вида $\eta = C_1 \cdot 10^{(U/C_2)}$, где C_1 и C_2 — опытные постоянные. Как видно, точки, соответствующие минеральным маслам, лежат на одной кривой, тогда как синтетические полиальфаолефиновые масла, похоже, формируют отдельную зависимость. Допуская одинаковый характер зависимости $U(\eta)$ для минеральных и синтетических масел, для полиальфаолефиновых масел через имеющиеся две точки можно также провести зависимость $U(\eta)$, идентичную зависимости для минеральных масел.

Так как между вязкостью и молекулярной массой масел одного гомологического ряда имеется однозначное соответствие, получается, что с увеличением молекулярной массы масла энергия активации увеличивается. Из рис. 6 также следует, что зависимость $U(\eta)$ асимптотически приближается к двум прямым: 1 и 2. Наличие этих асимптот важно для понимания механизма течения масел и природы зависимости вязкости от температуры.

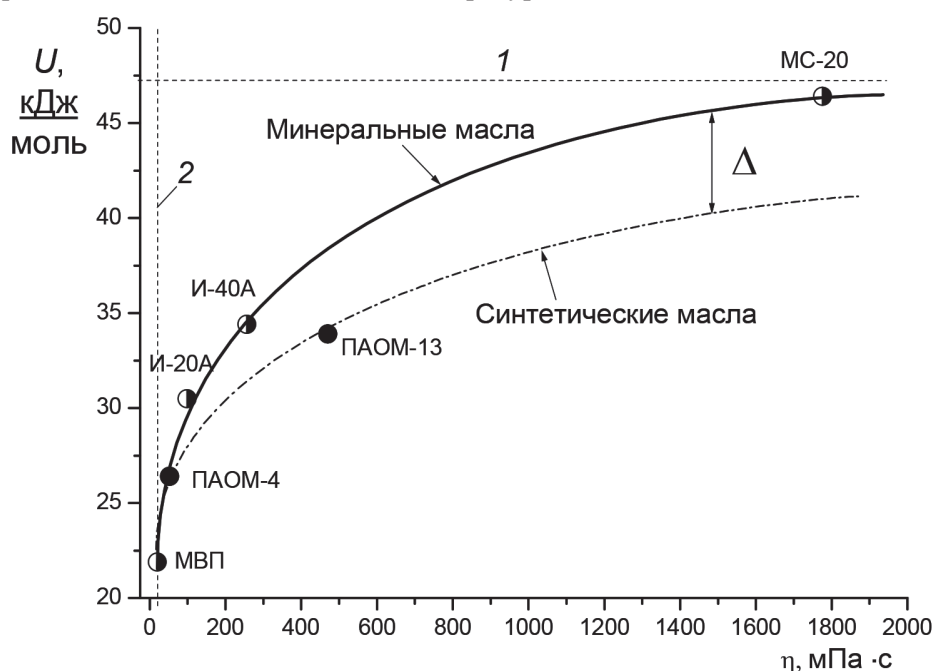


Рис. 6. Зависимость энергии активации вязкого течения от вязкости масел при температуре 20 °С

Известно, что механизм влияния температуры на вязкость зависит от вида органического соединения и структуры изомера. Так, в работе [13] на примере алкандиолов различного строения рассматривается зависимость энергии активации от длины углеродной цепи. Энергия активации для 1, 2-алкандиолов практически не зависит от количества атомов углерода в углеводородном радикале, так как водородные связи $O-H \cdots O$ между молекулами ведут к образованию мицеллярной структуры. В случае 1, n -алкандиолов с увеличением количества n атомов углерода в углеводородном радикале энергия активации вязкого течения увеличивается, при этом увеличение носит затухающий характер подобно графикам, предоставленным на рис. 6, и при $n \geq 6$ прирост энергии активации практически прекращается, что, по мнению авторов [13], вызвано тем, что молекулы 1, n -алкандиолов путём образования связей $O-H \cdots O$ формируют слоистые структуры. В случае неполярных молекул n -алканов, к которым относятся полиальфаолефиновые масла и преобладающая часть составляющих фракций минеральных масел, межмолекулярное взаимодействие обусловлено слабыми дисперсионными (силами Лондона) и электростатическими силами. При этом в работе [14] численным моделированием показано, что энергия активации диффузии, которую, в принципе, можно считать эквивалентом энергии активации вязкого течения, достигает асимптотического

предела при количестве атомов углерода в молекулярной цепи более шестидесяти, что соответствует графикам на рис. 6.

Ограничение роста энергии активации линией 1 на графиках рис. 6 можно объяснить, используя работы [15], [16]. В работе [15] на основе анализа данных, приведенных в литературе, указывается, что увеличение молекулярной массы низкомолекулярных соединений приводит только к ограниченному росту энергии активации их вязкого течения, предельные значения которой достигаются при молекулярных массах незначительных по сравнению с массами полимеров. Это объясняется тем, что температурная зависимость вязкости сравнительно высокомолекулярных соединений определяется размерами не молекул, а их небольших участков — сегментов, которые являются кинетически самостоятельными структурными элементами масла. Указанные сегменты включают не более 30 – 40 атомов основной цепи макромолекул [16], т. е. под действием тепла происходят «перескоки» именно сегментов из одного положения в другое. Исходя из ранее изложенного можно предположить, что вязкое течение высоковязких (т. е. со сравнительно большой молекулярной массой) минеральных и полиальфаолефиновых масел происходит путём прилипания и отрыва отдельных структурных фрагментов между соседними молекулами, и энергия активации течения таких масел определяется энергией разрушения временных узлов, образованных взаимодействием структурных фрагментов соседних молекул. Учитывая, что количество атомов углерода в молекулярной цепи самых вязких смазочных масел, как правило, не превышает 38 – 40, можно предположить, что для масел величина такого фрагмента значительно меньше, чем размер сегментов, указанный в источнике [16].

Существование вертикальной асимптоты 2 на рис. 6 указывает, по мнению авторов, на то, что для сравнительно низкомолекулярных масел, у которых размеры молекул меньше размера вышеупомянутых структурных фрагментов, энергия активации вязкого течения определяется количеством пар взаимодействующих метиленовых групп $-\text{CH}_2-$. Можно предположить, что в этом случае значения энергии активации обусловлены энергией, необходимой для сдвига молекул как единого целого относительно друг друга на определенное расстояние, подобно тому, как в случае ионной кристаллической решетки происходит миграция ионов по дефектам (вакансиям) кристаллической решетки. Соответственно энергия будет определяться суммарной энергией связей между молекулами при их относительном сдвиге, а также геометрическими факторами.

Известно, что при равном количестве атомов углерода в молекуле вязкость циклических углеводородов выше, чем линейных: энергия межмолекулярных связей, как показано для димеров, возрастает в ряду «линейные углеводороды — циклические — ароматические» слева направо [17]. Присутствие большего количества боковых ответвлений в молекулах минеральных масел по сравнению с полиальфаолефиновыми маслами, наоборот, вязкость снижает [18]. Однако разность (Δ) ординат точек (см. рис. 6), лежащих на двух зависимостях, при одинаковом значении вязкости обусловлена именно большим количеством боковых ответвлений в молекулах минеральных масел, так как углеводороды линейного строения показывают более низкую энергию активации по сравнению с разветвленными [19].

Заключение

Наиболее важным фактором, влияющим на изменение вязкости от температуры, является непосредственно сама вязкость. Для разных масел существует единая зависимость $d\eta/dt$ от вязкости η , которую можно аппроксимировать единой функцией, близкой к линейной, что следует из термофлуктуационной природы вязкого течения масел. Вместе с тем, по мнению авторов, для синтетических полиэфирных и силиконовых масел зависимость $d\eta/dt$ от вязкости η может быть иной. Это объясняется тем, что в данном диапазоне температур для синтетических жидкостей не происходит значительных структурных изменений, обуславливающих уменьшение сил межмолекулярного взаимодействия между полярными функциональными группами этих жидкостей.

Высоко- и низковязкие масла имеют разный механизм вязкого течения. Энергия активации вязкого течения сравнительно вязких масел определяется энергией разрушения временных узлов

между молекулами, образующихся прилипанием их небольших участков — структурных фрагментов, которые являются кинетически самостоятельными структурными элементами масла. Энергия активации вязкого течения сравнительно низкомолекулярных масел, т. е. низковязких, определяется силами Ван-дер-Ваальса и зависит от количества атомов углерода в молекулярной цепи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мышкин Н. К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н. К. Мышкин, М. И. Петроковец. — М.: Физматлит, 2007. — 368 с.
2. Камерон А. Теория смазки в инженерном деле / А. Камерон. — М.: Mashgiz, 1962. — 296 с.
3. Чичинадзе А. В. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / А. В. Чичинадзе, Э. Д. Браун, Н. А. Буше [и др.]; под общ. ред. А. В. Чичинадзе. — М.: Машиностроение, 2001. — 664 с.
4. Queimada A. J. Viscosity and liquid density of asymmetric n-alkane mixtures: measurements and modeling / A. J. Queimada, I. M. Marrucho, J. A. P. Coutinho, E. H. Stenby // International Journal of Thermophysics. — 2005. — Vol. 26. — Is. 1. — Pp. 47–61. DOI: 10.1007/s10765-005-2352-4.
5. Kamila S. Hetero-molecular associations in different polar and non-polar binary mixtures/ S. Kamila, G. D. Natraj // Turkish Journal of Physics. — 2012. — Vol. 36. — Is. 3. — Pp. 422–429. DOI: 10.3906/fiz-1201-2.
6. Dikko A. B. Investigations on the Effect of Temperature Change on Activation Energy and Infinite Viscosity of Some Liquids / A. B. Dikko, A. D. Ahmed // International Journal of Science and Research. — 2014. — Vol. 3. — Is. 10. — Pp. 828–831.
7. Haj-Kacem R. B. Contribution to modeling the viscosity Arrhenius-type equation for some solvents by statistical correlations analysis / R. B. Haj-Kacem, N. Ouerfelli, J. V. Herráez, M. Guettari, H. Hamda, M. Dal-lel // Fluid Phase Equilibria. — 2014. — Vol. 383. — Pp. 11–20. DOI: 10.1016/j.fluid.2014.09.023.
8. Messaâdi A. A New Equation Relating the Viscosity Arrhenius Temperature and the Activation Energy for Some Newtonian Classical Solvents / A. Messaâdi, N. Dhoubi, H. Hamda, F. B. M. Belgacem, Y. H. Adbelkader, N. Ouerfelli, A. H. Hamzaoui // Journal of Chemistry. — 2015. — Vol. 2015. DOI: 10.1155/2015/163262.
9. Беллами Л. Инфракрасные спектры сложных молекул / Л. Беллами. — М.: ИЛ, 1963. — 590 с.
10. Larkin P. J. Infrared and Raman spectroscopy: principles and spectral interpretation / P. J. Larkin. — Elsevier, 2011. — 230 p.
11. Gooss W. New method of chemical composition on modern automotive lubricant base-oils / W. Gooss, A. Korn // 2nd World TRIBOLOGY Congress. — Vienna, Austria: The Austrian Tribology Society, 2001.
12. Шрамм Г. Основы практической реологии и реометрии / Г. Шрамм. — М.: КолосС, 2003. — 312 с.
13. Czechowski G. The Viscous Properties of Diols I. The Homologous Series of 1, 2- and 1, n-Alkanediols / G. Czechowski, J. Jadzyn // Zeitschrift für Naturforschung A. — 2003. — Vol. 58. — Is. 5 – 6. — Pp. 317–320. DOI: 10.1515/zna-2003-5-612.
14. Lee S. H. Viscosity and Diffusion Constants Calculation of n-Alkanes by Molecular Dynamics Simulations / S. H. Lee, T. Chang // Bulletin of Korean Chemical Society. — 2003. — Vol. 24. — Is. 11. — Pp. 1590–1598.
15. Тагер А. А. Физико-химия полимеров / А. А. Тагер. — М.: Научный мир, 2007. — 573 с.
16. Бартнев Г. М. Реологические свойства полиизобутилена / Г. М. Бартнев, Л. А. Вишницкая // Высокомолекулярные соединения. — 1964. — Т. VI. — № 4. — С. 751–757.
17. Premkumar J. R. Quantifying dispersion interaction: A study of alkane and alkene dimers / J. R. Premkumar, D. Umavedi, G. N. Sastry // Indian Journal of Chemistry. — 2014. — Vol. 53A. — Pp. 985–991.
18. Advances in Engineering Fluid Mechanics: Multiphase Reactor and Polymerization System Hydrodynamics / edited by N. P. Cheremisinoff. — Houston: Gulf Publishing Company, 1996. — 772 p.
19. Бартнев Г. М. Определение энергии активации вязкого течения полимеров по экспериментальным данным / Г. М. Бартнев // Высокомолекулярные соединения. — 1964. — Т. VI. — № 2. — С. 335–340.

REFERENCES

1. Myshkin, N. K., and M. I. Petrokovets. *Trenie, smazka, iznos. Fizicheskie osnovy i tekhnicheskie prilozheniya tribologii*. M.: Fizmatlit, 2007.
2. Kameron, A. *Teoriya smazki v inzhenernom dele*. M.: Mashgiz, 1962.
3. Chichinadze, A. V., E. D. Braun, N. A. Bushe, et al. *Osnovy tribologii (trenie, iznos, smazka)*. Edited by A. V. Chichinadze. M.: Mashinostroenie, 2001.

4. Queimada, António J., I. M. Marrucho, J. A. P. Coutinho, and E. H. Stenby. "Viscosity and liquid density of asymmetric n-alkane mixtures: measurement and modeling." *International journal of thermophysics* 26.1 (2005): 47–61. DOI: 10.1007/s10765-005-2352-4.
5. Kamila, Susmita, and Ganesh Durgachalam Natraj. "Hetero-molecular associations in different polar and non-polar binary mixtures." *Turkish Journal of Physics* 36.3 (2012): 422–429. DOI: 10.3906/fiz-1201-2.
6. Dikko, A. B., and A. D. Ahmed. "Investigations on the Effect of Temperature Change on Activation Energy and Infinite Viscosity of Some Liquids." *International Journal of Science and Research* 3.10 (2014): 828–831.
7. Haj-Kacem, R. Ben, N. Ouerfelli, J.V. Herráez, M. Guettari, H. Hamda, and M. Dallel. "Contribution to modeling the viscosity Arrhenius-type equation for some solvents by statistical correlations analysis." *Fluid Phase Equilibria* 383 (2014): 11–20. DOI: 10.1016/j.fluid.2014.09.023.
8. Messaâdi, Aymen, N. Dhoubi, H. Hamda, F. B. M. Belgacem, Y. H. Abdelkader, N. Ouerfelli, and A. H. Hamzaoui. "A new equation relating the viscosity Arrhenius temperature and the activation energy for some Newtonian classical solvents." *Journal of Chemistry* 2015 (2015). DOI: 10.1155/2015/163262.
9. Bellami, L. *Infrakrasnye spektry slozhnykh molekul*. M.: IL, 1963.
10. Larkin, P. J. *Infrared and Raman spectroscopy: principles and spectral interpretation*. Elsevier, 2011.
11. Gooss, W., and A. Korn. "New method of chemical composition on modern automotive lubricant base-oils." *2nd World TRIBOLOGY Congress*. Vienna, Austria: The Austrian Tribology Society, 2001.
12. Shramm, G. *Osnovy prakticheskoi reologii i reometrii*. M.: KolosS, 2003.
13. Czechowski, Grzegorz, and Jan Jadżyn. "The Viscous Properties of Diols. I. The Homologous Series of 1, 2-and 1, n-Alkanediols." *Zeitschrift für Naturforschung A* 58.5-6 (2003): 317–320. DOI: 10.1515/zna-2003-5-612
14. Lee, Song Hi, and Taihyun Chang. "Viscosity and diffusion constants calculation of n-alkanes by molecular dynamics simulations." *Bulletin-Korean Chemical Society* 24.11 (2003): 1590–1598.
15. Tager, A. A. *Fiziko-khimiya polimerov*. M.: Nauchnyi mir, 2007.
16. Bartenev, G. M., and L. A. Vishnitskaya. "Reologicheskie svoistva poliizobutilena." *Vysokomolekulyarnye soedineniya* VI.4 (1964): 751–757.
17. Premkumar, J. Richard, Deivasigamani Umadevi, and G. Narahari Sastry. "Quantifying dispersion interaction: a study of alkane and alkene dimers." *Indian Journal of Chemistry* 53A (2014): 985–991.
18. Cheremisinoff, Nicholas P., ed. *Advances in Engineering Fluid Mechanics: Multiphase Reactor and Polymerization System Hydrodynamics*. Houston: Gulf Publishing Company, 1996.
19. Bartenev, G. M. "Opredelenie energii aktivatsii vyazkogo techeniya polimerov po eksperimental'nym dannym." *Vysokomolekulyarnye soedineniya* VI.2 (1964): 335–340.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Цветков Юрий Николаевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: yuritsvet@mail.ru, ZvetkovUN@gumrf.ru
Власов Михаил Юрьевич —
кандидат химических наук
ООО «Люмэкс-маркетинг»
199178, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
пр. Малый В.О., 58а
e-mail: VlasovMY@lumex.ru
Дехтярь Леонид Иванович — аспирант
Научный руководитель:
Цветков Юрий Николаевич
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: dekhtyar.l@bk.ru, kaf_tsr@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tsvetkov, Yuriy N. —
Doctor of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: yuritsvet@mail.ru, ZvetkovUN@gumrf.ru
Vlasov, Michail Yu. —
PhD
Lumex-marketing Ltd
58a Malyy V.O. Avenue, St. Petersburg, 199178,
Russian Federation
e-mail: VlasovMY@lumex.ru
Dekhtyr, Leonid I. — Postgraduate
Supervisor:
Tsvetkov, Yuriy N.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: dekhtyar.l@bk.ru, kaf_tsr@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 4 сентября 2017 г.
Received: September 4, 2017.