

УДК 621.891:532.137.3

ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАТОРОВ ВЯЗКОСТИ НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СИНТЕТИЧЕСКИХ МАСЕЛ

Л. В. МАРКОВА^{а+}, В. М. МАКАРЕНКО^б, Х. КОНГ^в, Х.-Г. ХАН^в

Выполнено исследование влияния молекулярного веса и концентрации полимерной загущающей присадки ПММА (полиметилметакрилат), введённой в синтетическое базовое масло ПАО6, на его вязкость. Установлена эмпирическая зависимость вязкости загущённого масла от содержания присадок, определены коэффициенты загущающей способности присадки. Проведено экспериментальное исследование зависимости вязкости синтетических масел от скорости сдвига при различном содержании модификатора вязкости ПММА с различной молекулярной массой в базовой основе ПАО6. Определены диапазоны скоростей, при которых масло проявляет свойства неньютоновской жидкости. Показано, что с увеличением молекулярного веса ПММА присадки при одинаковой её концентрации в базовой основе неньютоновское поведение масла начинает проявляться на более низких скоростях сдвига. Установлено, что применение акустических средств оперативного контроля вязкости смазочных масел, основанных как на пьезоэлектрическом, так и на магнитоупругом взаимодействии является перспективным для оперативного контроля вязкости смазочных масел.

Ключевые слова: реологические свойства, синтетическое масло, индекс вязкости, модификатор вязкости, полиметакрилат.

Введение. Создание новой техники, работающей при экстремально высоких скоростях и нагрузках, привело к широкому использованию синтетических смазочных масел, которые в узлах трения в отличие от минеральных выдерживают более высокие рабочие температуры без заметного разложения и испарения и сохраняют подвижность при низких температурах.

Синтетические масла содержат смесь низкомолекулярных и высокомолекулярных углеводородов (полимеры или олигомеры, полученные методом синтеза из различных мономеров). Более одной трети всех синтетических масел составляют наиболее дешёвые полиальфаолефиновые масла (ПАО). Они отличаются универсальными смазочными свойствами, могут работать в широком интервале температур, обладают высоким индексом вязкости и стабильностью свойств на протяжении всего срока службы, не вызывают коррозии металлов, не образуют нагара и отложений, не оказывают отрицательного влияния на материалы прокладок и уплотнителей, хорошо смешиваются с минеральными маслами. ПАО масла в основном применяются для производства автомобильных универсальных, всесезонных моторных и трансмиссионных масел, гидравлических жидкостей, а также моторных масел для мощных дизельных среднескоростных двигателей судов и тепловозов.

К числу наиболее важных эксплуатационных показателей смазочных масел относятся их вязкостно-температурные свойства. Вязкость масла зависит (при одинаковой температуре и давлении) от химического состава и структуры углеводородов, из которых оно состоит.

а Белорусский национальный технический университет. Беларусь, 220013, г. Минск, просп. Независимости, 65.

б Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси. Беларусь, 246650, г. Гомель, ул. Кирова, 32а.

в Корейский институт науки и технологии. Южная Корея, г. Сеул.

+ Автор, с которым следует вести переписку. e-mail: lvmark@mail.ru

С целью расширения температурного диапазона, при котором может использоваться данный смазочный материал, что является очень важным свойством для всесезонных масел, способных надёжно работать в широком температурном интервале, применяются полимерные присадки (модификаторы вязкости) или, загустители, улучшающие индекс вязкости, т. е. вязкостно-температурные характеристики смазочных материалов.

Повышение индекса вязкости масел при введении модификаторов обусловлено тем, что загущённые масла при высоких температурах имеют более высокую, а при низких температурах более низкую вязкость по сравнению с обычными (незагущёнными) маслами. Это объясняется тем, что в холодном масле макромолекулы, будучи свёрнуты в “клубки”, не изменяют его вязкость, а распрямляясь при нагревании, увеличивают вязкость загущённого масла по сравнению с базовым [1].

Модификаторы вязкости представляют собой различные высокомолекулярные соединения, в частности, полиизобутилен, полиметакрилаты, поливинилалкиловые эфиры и др. с молекулярной массой от 10000 до 1000000 а.е.м. [2].

Одной из важных характеристик полимерных присадок является снижение их вязкости при сдвиге, т. е. они проявляют свойства неньютоновских жидкостей — уменьшение вязкости с увеличением скорости сдвига. Снижение вязкости может проявляться при скоростях сдвига от 10^2 до 10^6 с^{-1} . В двигателях внутреннего сгорания (ДВС) такие скорости развиваются в масляных магистралях, цилиндро-поршневой группе, подшипниках скольжения коленчатого вала при запуске и работе на высоких оборотах. Практический интерес к этому явлению обусловлен тем, что способность масла временно снижать вязкость при сдвиге позволяет снизить потери мощности на трение в ДВС, следовательно, и расход топлива (по разным оценкам на 2—5%). Лучшая подвижность масла обеспечивает более быстрое его поступление к трибосопряжениям двигателя, что способствует снижению пускового износа [2, 3].

Для описания поведения неньютоновских жидкостей разработан ряд моделей. Так, широко используется “степенная” модель зависимости вязкости η от градиента скорости вдоль оси, перпендикулярной к плоскости сдвига слоёв жидкости (скорости сдвига $\dot{\gamma}$), которая описывается уравнением [4]:

$$\eta = k\dot{\gamma}^{n-1}, \quad (1)$$

где n — показатель поведения жидкости, причём $n < 1$; k — коэффициент густоты потока.

Цель работы — исследование влияния молекулярной массы и концентрации модификатора на основе полиметакрилата (ПММА) на вязкостные свойства синтетического масла ПАО6, а также влияния модификатора ПММА на реологические свойства масла при различных скоростях сдвига.

Материалы и методы. Для исследований использовались четыре присадки (ACLUBE 806T, ACLUBE 823, ACLUBE 517 и ACLUBE 702, которые обозначены в табл. 1 — ПММА-1, ПММА-2, ПММА-3 и ПММА-4, соответственно) компании Sanyo Chemical Industries, Ltd с различными молекулярными массами (в диапазоне от 40311 до 530537 а.е.м.). Молекулярные массы присадок, значения которых приведены в табл. 1, были измерены с использованием метода гель-проникающей хроматографии на хроматографической системе HLC-8320GPCecoSEC) при температуре 40 °С.

Для исследования влияния концентрации модификаторов вязкости на основе полиметакрилата на реологические свойства масла были приготовлены пробы масла ПАО6 с введёнными ПММА присадками с концентрациями 3, 6 и 9 вес. %.

Кинематическая вязкость приготовленных проб измерялась капиллярным стеклянным вискозиметром Канон-Фреске (Cannon-FenskeViscometer) стандартным методом по ГОСТ 33-2000 при температурах 40 °С и 100 °С.

С целью экспериментальной оценки изменения реологических свойств синтетического масла ПАО6 с введёнными модификаторами вязкости ПММА при высоких скоростях сдвига применя-

лись портативные акустические вискозиметры — твердотельный датчик вязкости ViSmart (Vectron Int.) и магнитоупругий вискозиметр для контроля состояния смазочного масла, работа которых основана на возбуждении в жидкости упругих волн сжатия (акустических волн) и измерении их параметров. Вискозиметры могут использоваться для оперативной оценки вязкости как в лабораторных и полевых условиях, так и встраиваться в систему циркуляции масла.

Таблица 1. Кинематическая вязкость синтетического масла ПАОб с модификаторами вязкости

Модификатор	Условное обозначение модификатора	M, а.е.м.	$\nu, \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ при 40 °С				K
			C = 0 вес. %	C = 3 вес. %	C = 6 вес. %	C = 9 вес. %	
ACLUBE 806T	ПММА-1	40311	30,40	34,18	38,16	42,62	
ACLUBE 823	ПММА-2	60795	30,40	33,40	37,14	41,78	
ACLUBE 517	ПММА-3	155259	30,40	34,40	39,04	44,55	
ACLUBE 702	ПММА-4	530537	30,40	33,31	37,16	42,42	
$\nu, \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ при 100 °С							
ACLUBE 806T	ПММА-1	40311	5,98	6,68	7,54	8,47	1,68
ACLUBE 823	ПММА-2	60795	5,98	6,68	7,54	8,60	1,75
ACLUBE 517	ПММА-3	155259	5,98	7,04	8,34	9,94	2,45
ACLUBE 702	ПММА-4	530537	5,98	7,15	8,67	10,50	2,72

ν — кинематическая вязкость; M — молекулярная масса; C — концентрация присадки; K — коэффициент загущающей способности присадки

Датчик вязкости ViSmart состоит из тонкого диска кварца АТ-среза с двумя круговыми электродами, нанесёнными на торцевые поверхности. Приложение напряжения между электродами вызывает деформацию сдвига кристалла. Изменяя частоту приложенного напряжения, находят механический резонанс резонатора, погруженного в масло. Смещение резонансной частоты и изменение амплитуды колебаний дают информацию о свойствах масла [5]. Рабочие частоты датчика 5...6 МГц.

В настоящее время наряду с твердотельными датчиками на акустических волнах разрабатываются магнитоупругие датчики вязкости, имеющие более низкие рабочие частоты [6]. Так, в Институте механики металлополимерных систем (ИММС) НАН Беларуси совместно с Корейским институтом науки и технологии (КИНТ, Республика Корея) разработан магнитоупругий вискозиметр для контроля состояния смазочного масла [7]. Датчик вискозиметра включает в себя преобразователь вязкости — чувствительную магнитоупругую пластину, помещённую в контролируемую вязкую жидкость, и электромагнитную катушку, которая предназначена одновременно для создания сигнала возбуждения механических колебаний пластины и измерения сигнала, наводимого колебаниями пластины, затухающими вследствие их демпфирования вязким маслом. Определение вязкости основано на поиске резонанса колебаний пластины, погруженной в контролируемое масло, и анализе параметров полученного сигнала. Рабочие частоты датчика < 30 кГц.

Выходным параметром акустических датчиков является значение “акустической вязкости”, которая представляет собой произведение динамической вязкости η масла на его плотность ρ [8]: а.в. = $\eta\rho$.

Измерение вязкости приготовленных образцов выполнено капиллярным, магнитоупругим и твердотельным вискозиметрами при 40 °С. По результатам определения кинематической вязкости капиллярным методом рассчитывались значения динамической вязкости как $\eta = \nu\rho$. По значениям акустической вязкости, измеренной магнитоупругим и твердотельным вискозиметрами, и плотности масла определялись значения динамической вязкости по формуле:

$$\eta = \frac{\text{а.в.}}{\rho} \quad (2)$$

Плотность масла измерялась стандартным методом ASTM D 891-09.

Скорость сдвига при измерении капиллярным вискозиметром Каннон-Фенске определяется по формуле

$$\dot{\gamma} = \frac{4V}{\pi r^3 t}, \quad (3)$$

где V — объем масла при истечении; r — радиус капилляра; t — время истечения.

Скорость сдвига, определённая по формуле 3, при измерении вязкости ПАО-6 составляет около 10^2 с^{-1} .

При измерении вязкости твердотельным акустическим датчиком и магнитоупругим датчиком скорость сдвига можно оценить по формуле:

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial u}{\partial y} \approx \frac{\vartheta}{\delta}, \quad (4)$$

где u — скорость течения (относительная скорость перемещения слоёв жидкости); ϑ — скорость подвижного элемента вискозиметра, $\vartheta = U/T = Uf$, (U и f — амплитуда и частота колебаний подвижного элемента); δ — глубина проникновения акустической волны в масло (т. е. расстояние от перемещающейся поверхности до неподвижного слоя масла), определяемая по формуле $\delta = (\eta/\pi r f)^{1/2}$.

Результаты исследований и их обсуждение. В табл. 1 представлены результаты измерений, отражающие зависимости кинематической вязкости (ν) от молекулярной массы (M) и концентрации (C) модификатора при температурах $40 \text{ }^\circ\text{C}$ и $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

С увеличением концентрации модификаторов вязкость масла, измеренная при температуре 40 и $100 \text{ }^\circ\text{C}$, как и ожидалось, увеличивается.

Зависимость кинематической вязкости масла, измеренной при температуре $100 \text{ }^\circ\text{C}$, от концентрации модификатора ПММА с различными молекулярными массами представлена на рис. 1.

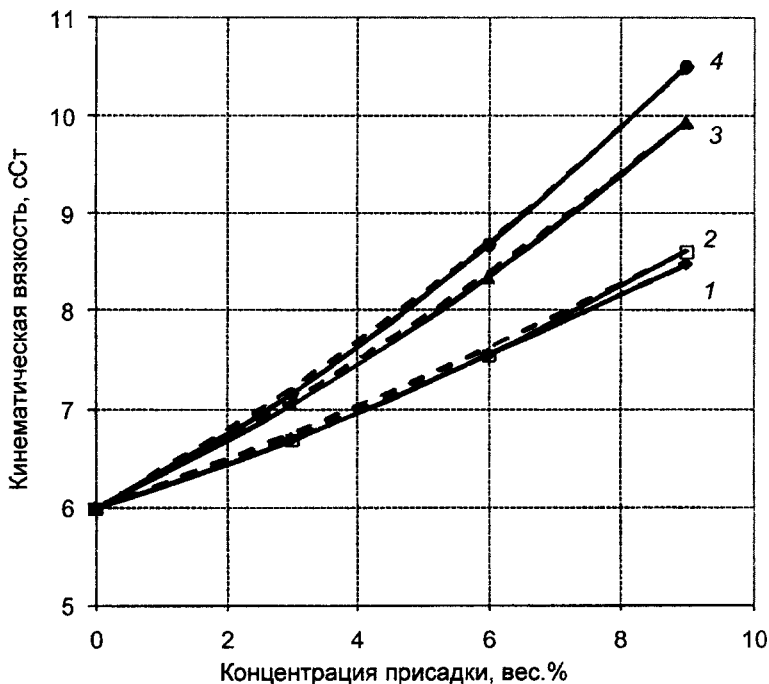


Рис. 1. Экспериментальные и аппроксимирующие зависимости вязкости загущённого масла от содержания модификаторов вязкости ПММА с различными молекулярными весами при температуре $100 \text{ }^\circ\text{C}$: 1 — ПММА-1; 2 — ПММА-2; 3 — ПММА-3; 4 — ПММА-4; пунктирные линии — аппроксимация;

Анализ полученных графиков показал, что зависимость вязкости загущённого масла от содержания модификатора выражается следующим эмпирическим уравнением [9]:

$$\lg v_{100} = \lg v_{0,100} + KC, \quad (5)$$

где v_{100} и $v_{0,100}$ — вязкость загущённого и исходного масел при 100 °С; K — коэффициент загущающей способности модификатора; C — содержание модификатора.

На рис. 1 зависимости (1) для масел с присадками ПММА-1, ПММА-2, ПММА-3 и ПММА-4 показаны пунктирными линиями.

Из уравнения (5) определены значения коэффициентов загущающей способности: для ПММА-1 коэффициент загущающей способности модификатора $K = 1,68$; для ПММА-4 коэффициент $K = 2,72$ в масле ПАОб. Зная коэффициент загущающей способности модификатора, можно оценивать изменение вязкости масла при изменении концентрации введённого модификатора.

На основании данных, приведённых в табл. 1, определены индексы вязкости (VI) анализируемых проб масел согласно ГОСТ 25371-97 по формуле:

$$VI = \frac{10^N - 1}{0,00715} \cdot 100,$$

где $N = \frac{\log(H) - \log(v_{40})}{\log(v_{100})}$; v_{40} — вязкость при 40 °С; H — кинематическая вязкость при 40 °С

нефтепродукта с индексом вязкости $VI = 100$, обладающего той же кинематической вязкостью при 100 °С, что и испытуемый нефтепродукт. Значение H определяется по таблице, приведённой в ГОСТ 25371-97.

На рис. 2 представлены экспериментальные зависимости индекса вязкости от молекулярной массы модификатора, введённого в базовое масло при концентрациях 3, 6 и 9 вес.%. Видно, что между индексом вязкости и молекулярной массой модификатора существует логарифмическая зависимость. Точность аппроксимации (R^2) результатов измерений логарифмической зависимостью выше 0,997.

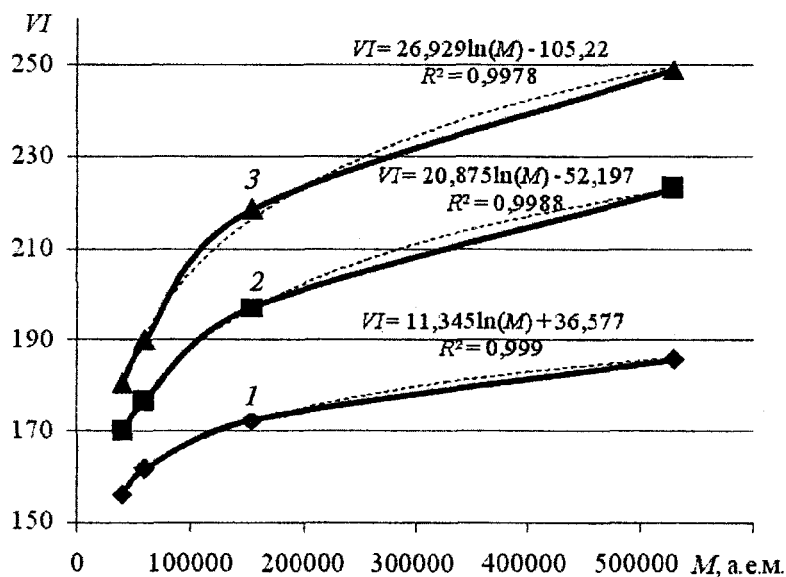


Рис. 2. Экспериментальные и аппроксимирующие зависимости индекса вязкости от молекулярной массы модификатора при его концентрации: 1 — $C = 3$ вес.%; 2 — 6; 3 — $C = 9$ вес.%. Пунктирные линии — аппроксимация

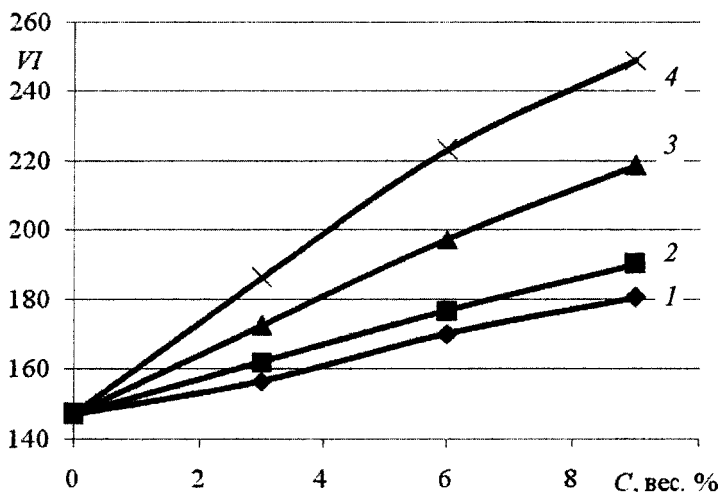


Рис. 3. Зависимость индекса вязкости от концентрации модификаторов с различной молекулярной массой:
 1 — $M = 40311$ а.е.м.; 2 — $M = 60795$ а.е.м.; 3 — $M = 155259$ а.е.м.; 4 — $M = 530537$ а.е.м.

Экспериментальные зависимости индекса вязкости от концентрации модификаторов, имеющих различные молекулярные массы, приведены на рис. 3. Повышение индекса вязкости масел с увеличением концентрации модификатора можно объяснить следующим образом. В разбавленных растворах вязкостных присадок макромолекулы менее зависят друг от друга в своём тепловом движении, поэтому вязкость мало зависит от температуры, и загущённые масла имеют высокий индекс вязкости. С увеличением концентрации модификатора вязкости в масле расстояние между макромолекулами быстро сокращается, появляется межмолекулярное взаимодействие, влияющее на тепловое движение макромолекул, что определяет зависимость вязкости от температуры. Поэтому для данного модификатора существует определённое значение концентрации, при котором наблюдается максимум индекса вязкости [9]. Очевидно, что чем выше молекулярная масса модификатора, тем при более низких концентрациях достигается максимум индекса вязкости.

Исследование влияния модификатора ПММА на реологические свойства масла при различных скоростях сдвига. Одной из важных характеристик полимерных присадок является снижение их вязкости при сдвиге, т.е. они проявляют свойства неньютоновских жидкостей — уменьшение вязкости с увеличением скорости сдвига. Снижение вязкости может проявляться при скоростях сдвига от 10^2 до 10^6 с⁻¹. В двигателях внутреннего сгорания (ДВС) такие скорости развиваются в масляных магистралях, цилиндро-поршневой группе, подшипниках скольжения коленчатого вала при запуске и работе на высоких оборотах. Практический интерес к этому явлению обусловлен тем, что способность масла временно снижать вязкость при сдвиге позволяет снизить потери мощности на трение в ДВС, следовательно, и расход топлива (по разным оценкам на 2—5%). Лучшая подвижность масла обеспечивает более быстрое его поступление к трибосопряжениям двигателя, что способствует снижению пускового износа [3, 8].

Для описания поведения неньютоновских жидкостей разработан ряд моделей. Так, широко используется “степенная” модель зависимости вязкости η от градиента скорости вдоль оси, перпендикулярной к плоскости сдвига слоёв жидкости (скорости сдвига $\dot{\gamma}$), которая описывается уравнением [9]:

$$\eta = k\dot{\gamma}^{n-1}, \quad (2)$$

где n — показатель поведения жидкости, причём $n < 1$; k — коэффициент густоты потока.

С целью экспериментальной оценки изменения реологических свойств синтетического масла ПАОб с введёнными модификаторами вязкости ПММА при высоких скоростях сдвига применялись портативные акустические вискозиметры — твердотельный датчик вязкости ViSmart (Vectron

Int.) и магнитоупругий вискозиметр для контроля состояния смазочного масла, работа которых основана на возбуждении в жидкости упругих волн сжатия (акустических волн) и измерении их параметров. Вискозиметры могут использоваться для оперативной оценки вязкости как в лабораторных и полевых условиях, так и встраиваться в систему циркуляции масла.

Датчик вязкости ViSmart состоит из тонкого диска кварца АТ-среза с двумя круговыми электродами, нанесёнными на торцевые поверхности. Приложение напряжения между электродами вызывает деформацию сдвига кристалла. Изменяя частоту приложенного напряжения, находят механический резонанс резонатора, погруженного в масло. Смещение резонансной частоты и изменение амплитуды колебаний дают информацию о свойствах масла [10]. Рабочие частоты датчика 5...6 МГц.

В настоящее время наряду с твердотельными датчиками на акустических волнах разрабатываются магнитоупругие датчики вязкости, имеющие более низкие рабочие частоты [11]. Так, в Институте механики металлополимерных систем НАН Беларуси (ИММС НАН Беларуси, Гомель) совместно с Корейским институтом науки и технологии (КИНТ, Сеул) разработан магнитоупругий вискозиметр для контроля состояния смазочного масла [12]. Датчик вискозиметра включает в себя преобразователь вязкости — чувствительную магнитоупругую пластину, помещённую в контролируемую вязкую жидкость, и электромагнитную катушку, которая предназначена одновременно для создания сигнала возбуждения механических колебаний пластины и измерения сигнала, наводимого колебаниями пластины, затухающими вследствие их демпфирования вязким маслом. Определение вязкости основано на поиске резонанса колебаний пластины, погруженной в контролируемое масло, и анализе параметров полученного сигнала. Рабочие частоты датчика < 30 кГц.

Выходным параметром акустических датчиков является значение “акустической вязкости”, которая представляет собой произведение динамической вязкости η масла на его плотность ρ [13]: а.в. = $\eta\rho$.

Измерение вязкости приготовленных образцов выполнено капиллярным, магнитоупругим и твердотельным вискозиметрами при 40 °С. По результатам определения кинематической вязкости капиллярным методом рассчитывались значения динамической вязкости как $\eta = \nu\rho$. По значениям акустической вязкости, измеренной магнитоупругим и твердотельным вискозиметрами, и плотности масла определялись значения динамической вязкости по формуле:

$$\eta = \frac{\text{а.в.}}{\rho} \quad (6)$$

Значения плотности масла измерялись стандартным методом ASTM D 891-09 [14].

Скорость сдвига при измерении капиллярным вискозиметром Каннон-Фенске определяется по формуле

$$\dot{\gamma} = \frac{4V}{\pi r^3 t}, \quad (7)$$

где V — объем масла при истечении; r — радиус капилляра; t — время истечения.

Скорость сдвига, определённая по формуле 7, при измерении вязкости ПАО-6 составляет около 10^2 с^{-1} .

При измерении вязкости твердотельным акустическим датчиком и магнитоупругим датчиком скорость сдвига можно оценить по формуле:

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial u}{\partial y} \approx \frac{\vartheta}{\delta}, \quad (8)$$

где u — скорость течения (относительная скорость перемещения слоёв жидкости); ϑ — скорость подвижного элемента вискозиметра, $\vartheta = U/T = Uf$, (U и f — амплитуда и частота колебаний по-

движного элемента); δ — глубина проникновения акустической волны в масло (т. е. расстояние от перемещающейся поверхности до неподвижного слоя масла), определяемая по формуле $\delta = (\eta / \pi \rho f)^{1/2}$.

В измеряемом диапазоне вязкостей $(25...35) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ скорость сдвига в твердотельном акустическом вискозиметре составляет около $1 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, а в магнитоупругом — $1,5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$.

На рис. 4 представлены результаты измерения зависимости вязкости масла от концентрации модификаторов с различными молекулярными массами ПММА-1, ПММА-2, ПММА-3, ПММА-4, введенных в базовое масло ПАОб, при различных скоростях сдвига (при измерении капиллярным методом, магнитоупругим и твердотельным вискозиметрами). В измеряемом диапазоне вязкостей $(25...35) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ скорость сдвига в твердотельном акустическом вискозиметре составляет около $1 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, а в магнитоупругом — $1,5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$.

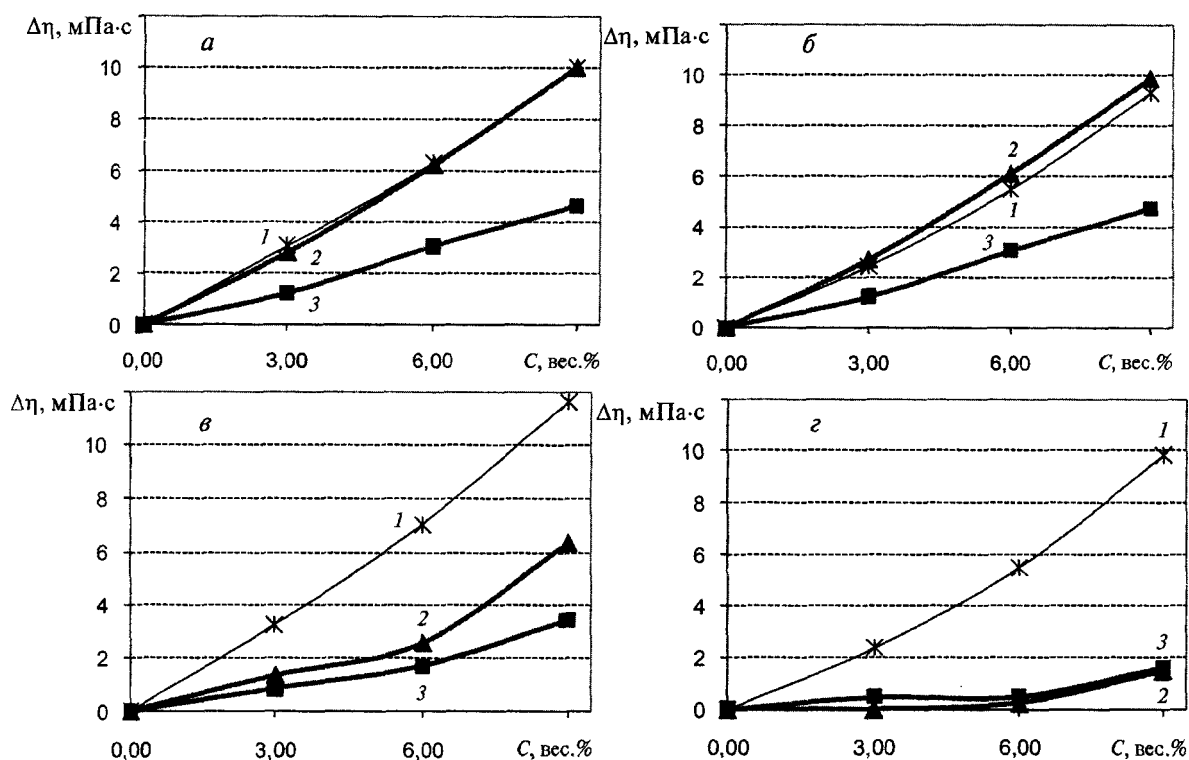


Рис. 4. Изменение вязкости масла от концентрации модификаторов ПММА-1 (а), ПММА-2 (б), ПММА-3 (в), ПММА-4 (z) с различными молекулярными массами, введенных в базовое масло ПАОб, при измерении капиллярным методом (1), магнитоупругим (2) и твердотельным (3) вискозиметрами

Экспериментальные зависимости вязкости масла от скорости сдвига при различном содержании (3, 6 и 9 вес.%) и различной молекулярной массой модификаторов вязкости ПММА-1, ПММА-2, ПММА-3 и ПММА-4 в базовой основе ПАОб показаны на рис. 5. На рис. 5, в, z представлены также степенные зависимости, аппроксимирующие экспериментальные результаты исследований модификаторов вязкости ПММА-3 и ПММА-4.

Анализ результатов измерений, представленных на рис. 4, а, б и рис. 5, а, б показывает, что при тестировании масла с введенными присадками ПММА-1 и ПММА-2 с концентрациями 3, 6 и 9 вес.% значения абсолютной вязкости, определённые на основе данных капиллярного вискозиметра (скорость сдвига 10^2 с^{-1}), совпадают с данными магнитоупругого датчика (скорость сдвига $1,5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$). То есть, пробы масел сохраняют свойства ньютоновской жидкости при скорости сдвига $< 1,5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ (при рабочей частоте магнитоупругого вискозиметра $< 30 \text{ кГц}$). Значения вязкости этих проб, измеренные микроакустическим твердотельным датчиком, значительно ниже значений, полученных на капиллярном и магнитоупругом вискозиметрах. Это свидетельствует о том, что на ра-

бочей частоте микроакустического датчика 5,3 МГц (скорость сдвига около 10^4 c^{-1}) синтетическое масло ПАОб с модификаторами вязкости проявляет свойства неньютоновской жидкости, которое характеризуется снижением вязкости при увеличении скорости сдвига.

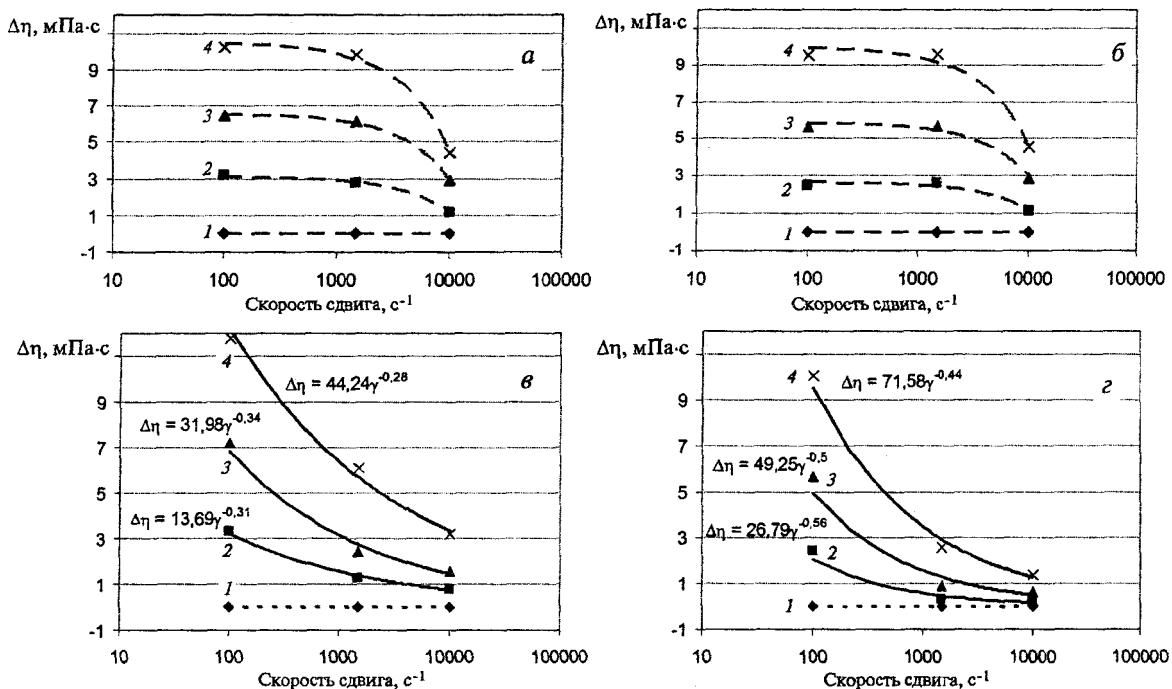


Рис. 5. Зависимость вязкости масла от скорости сдвига при различном содержании модификатора вязкости ПММА-1 (а), ПММА-2 (б), ПММА-3 (в), ПММА-4 (г) с различной молекулярной массой в базовой основе ПАОб: 1 – $C = 0$ вес.%; 2 – 3; 3 – 6; 4 – $C = 9$ вес.%. Сплошные линии – степенные зависимости

С увеличением молекулярного веса присадки (ПММА-3), неньютоновское поведение проб масел, как видно из рис. 4, в и рис. 5, в, начинает проявляться уже при скорости сдвига $1,5 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$. При дальнейшем увеличении молекулярного веса вводимой присадки (ПММА-4), как следует из рис. 4, г и рис. 5, г, при скоростях сдвига $1,5 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ и 10^4 c^{-1} значения вязкости масел совпадают и близки к значениям вязкости базового масла без присадок.

Как видно из рис. 5, в, г, неньютоновское поведение масла с высокой достоверностью ($> 0,92$) описывается “степенной” моделью зависимости изменения вязкости $\Delta\eta$ от $\dot{\gamma}$, (формула 1). Значения коэффициента густоты потока (k), показателя поведения масла (n) и достоверности аппроксимации (R^2) сведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры “степенной” модели неньютоновского поведения масла

Модификатор вязкости	M , а.е.м.	C , %	k	n	R^2
ПММА-3	155259	3	13,69	0,686	0,99
		6	31,98	0,664	0,98
		9	44,24	0,720	0,99
ПММА-4	530537	3	26,80	0,420	0,92
		6	49,25	0,500	0,94
		9	71,58	0,562	0,99

Из таблицы видно, что с увеличением молекулярной массы модификатора вязкости растёт коэффициент густоты потока, а показатель поведения масла n указывает на более выраженный характер зависимости вязкости от скорости в случае использования модификатора ПММА-3.

Заключение. Исследование влияния модификаторов ПММА на реологические свойства масел показало, что с увеличением молекулярного веса модификаторов при одинаковой их концентрации в синтетической базовой основе неньютоновское поведение масла начинает проявляться на более низких частотах измерения вязкости. При увеличении молекулярной массы вводимой присадки до $M = 530537$ а.е.м. значения вязкости масел при скоростях сдвига $1,5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ и 10^4 с^{-1} совпадают и близки к значениям вязкости базового масла без присадок. Полученные результаты коррелируют с выводами работы G. W. Stachowiak, A. W. Batchelorand [10], в которых показано, что масла, являясь ньютоновскими жидкостями при низких скоростях, при скоростях выше 10^5 – 10^6 с^{-1} , часто имеющих место в узлах трения машин, ведут себя как неньютоновские жидкости.

Очевидно, что для корректного выбора смазочного масла с учётом прогнозирования его реологического поведения в трибоконтакте и контроля его свойств в процессе эксплуатации целесообразно проводить измерение вязкости при скоростях сдвига близкими к используемым в трибосопряжении. В частности, актуальной является оценка вязкости масел при средних скоростях сдвига (10^3 – 10^4 с^{-1}) при низких температурах и высоких скоростях сдвига (10^6 – 10^7 с^{-1}) при высокой температуре для максимального приближения к условиям работы двигателя. Для выполнения таких измерений могут быть использованы портативные акустические вискозиметры, реализующие средние и высокие скорости сдвига.

Обозначения

ν — кинематическая вязкость; M — молекулярная масса; C — концентрация модификатора; ν_{100} и $\nu_{0,100}$ — вязкость загущённого и исходного масел при $100 \text{ }^\circ\text{C}$; K — коэффициент загущающей способности модификатора; VI — индекс вязкости; ν_{40} — вязкость при $40 \text{ }^\circ\text{C}$; H — кинематическая вязкость при $40 \text{ }^\circ\text{C}$ нефтепродукта с индексом вязкости $VI = 100$; R^2 — точность аппроксимации результатов измерений; η — динамическая вязкость; $\dot{\gamma}$ — скорость сдвига; n — показатель поведения жидкости; k — коэффициент густоты потока; а.в. — акустическая вязкость; ρ — плотность масла; V — объем масла при истечении; r — радиус капилляра; t — время истечения; u — скорость течения (относительная скорость перемещения слоёв жидкости); ϑ — скорость подвижного элемента вискозиметра; U и f — амплитуда и частота колебаний подвижного элемента, соответственно; δ — глубина проникновения акустической волны в масло.

Литература

1. Nehal S. Ahmed and Amal M. Nassar. Lubricating Oil Additives / Tribology — Lubricants and Lubrication / ed. by Chang-Hung Kuo. — In Tech. — 2011, 249—268
2. Holtzinger J., Green J.H., Lamb G. D., Atkinson D., and Spikes H. A. Influence of Viscosity Modifiers on Hydrodynamic Friction // 17th International Colloquium Tribology 2010: Solving Friction and Wear Problems. January 19—21, 2010. Esslingen, Stuttgart-Ostfildern, Germany. — 2010, 171—177
3. Леванов И. Г. Обзор реологических моделей моторных масел, используемых при расчётах динамики подшипников скольжения коленчатого вала // Вестник ЮУрГУ. — 2010 (10), 54—62
4. Hewson R. W., Kapur N., and Gaskell P. H. Analytical and Numerical Solutions of Thin Lubricating films for Differing Shear-Thinning Viscosity Models // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. — 2007 (221), 355—356
5. Agoston A, Otsch C, and Jakoby B. Viscosity Sensors for Engine Oil Condition Monitoring — Application and Interpretation of Results // Sensors and Actuators. — 2005 (121), 327—332
6. Маркова Л. В., Макаренко В. М., Семенюк М. С., Зозуля А. П. Оперативный контроль вязкости смазочных масел // Трение и износ. — 2010 (31), № 6, 569—581
7. Маркова Л. В., Макаренко В. М., Семенюк М. С., Зозуля А. П., Конг Х., Хан Х.-Г. Магнитоупругий вискозиметр для оперативного контроля вязкости смазочных масел // Трение и износ. — 2011 (32), № 1, 54—63

8. **Durdag K.** Solid State Acoustic Wave Sensors for Real-Time in-Line Measurement of Oil Viscosity// Sensor Review. — 2008 (28), no. 1, 68—73
9. **Кулиев А.М.** Химия и технология присадок к маслам и топливам. — Л.: Химия. — 1985
10. **Stachowiak G. W. and Batchelor A. W.** Engineering Tribology. 3rd ed. — Butterworth-Heinemann. — 2005

Поступила в редакцию 20.05.14.

Markova L. V., Makarenko V. M., Kong H, and Khan H.-G. **Influence of Viscosity Modifiers on the Synthetic Oil Rheological Properties.**

Influence of molecular weight and density of PMMA (polymethylmethacrylate) thickening additive in synthetic base oil PAO 6 on its viscosity is studied. The empirical dependence of solidified oil viscosity on additives and the coefficient of additive thickening efficiency are determined. The experimental study of dependence of synthetic oil viscosity on shear rate with various viscosity modifier content and with various molecular weight of the PAO 6 is carried out. The velocity ranges in which the oil does not show the properties of Newtonian liquid is determined. It is shown that non-Newtonian behavior starts at lower shear rates when additive molecular weight increases with the same concentrations in the base oil. It is established that the use of acoustic equipment, based on piezoelectric or magnetoelastic interaction, is a promising for on-line inspection of lubricant viscosity.

Keywords: rheological properties, synthetic oil, viscosity index, viscosity modifier, polymethacrylate .