

Электровязкостный эффект в переменном электрическом поле

© А.А. Остапенко

Научно-исследовательский институт радиофизики Санкт-Петербургского государственного университета, 198904 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 28 октября 1998 г. В окончательной редакции 20 октября 1999 г.)

Рассматриваются экспериментальные зависимости изменения относительной динамической вязкости жидких диэлектриков от приложенного переменного напряжения и частоты этого напряжения. Диапазон частот используемого напряжения изменялся от 20 Hz до 2 kHz. Изменение вязкости может быть следствием изменения структуры жидкости, причем центрами ионно-молекулярных групп являются ионы, возникшие из-за инжекции заряда с электрода. Изменение режима инжекции приводит к изменению вязкости.

В ранее опубликованных работах указывалось на существование электровязкостного эффекта в поперечных относительно потока диэлектрика электрических полях [1,2]. Причинами изменения вязкости полагали передачу момента количества движения в результате электрофореза ионов, возникновение электрогидродинамических течений, образование в близких приэлектродных зонах ион-дипольных кластеров [3]. В некоторых работах указывали на отсутствие электровязкостного эффекта в неполярных жидкостях, но при малых добавках в них полярных примесей эффект наблюдался [1]. Введение полярных добавок в неполярную жидкость может существенно менять проводимость среды. Действительно, в ряде работ (например, [1,2]) замечено влияние проводимости на величину электровязкостного эффекта. Помимо полярных добавок существенным фактором, влияющим на величину электровязкостного эффекта, является наличие инжектирующего электрода. Процесс, называемый инжекцией заряда в среду, конкретно не рассматривается. Речь идет о следствии инжекции заряда с электрода в жидкость. В [2] было показано, что процессы инжекции заряда играют весьма важную роль при проявлении электровязкостного эффекта в постоянном электрическом поле. Возникновение ионов и иономолекулярных комплексов может приводить к изменению структуры жидкой диэлектрической среды и заметно влиять на наблюдаемую в электрическом поле вязкость. Одним из способов изменения режима инжекции заряда с электрода в среду является воздействие на межэлектродный промежуток переменного электрического поля.

В данной работе рассматривается характер изменения наблюдаемой вязкости полярных жидких диэлектриков как функции частоты внешнего переменного поля. Необходимо отметить, что ранее [1] проводились работы по исследованию влияния частоты прикладываемого поля на вязкость диэлектрической жидкости, но диапазон частот состоял лишь из двух (50 и 1000 Hz), поэтому характер влияния частоты на вязкость оставался неясен. В других работах и вовсе указывали на отсутствие такого влияния. Все эти противоречивые результаты не нашли приемлемого толкования до настоящего времени.

Для реализации приэлектродных процессов, обуславливающих инжекцию заряда (электрохимических ре-

акций), необходимо, чтобы в приэлектродной области аккумулировался заряд. Изменение режима зарядообразования из-за изменения частоты внешнего электрического поля может изменить скорость накопления заряда или же предотвратить вовсе. Если стоять на позиции общепринятой модели приэлектродного двойного слоя, то для инжекции необходимо накопить заряд, по крайней мере равный полному заряду двойного слоя,

$$q = C_{dl}\Phi, \quad (1)$$

где C_{dl} — емкость двойного слоя, Φ — падение напряжения на двойном слое. По грубым оценкам, емкость двойного слоя для указанных сред составляет $\sim 10 \mu\text{F}/\text{cm}^2$, а падение напряжения на нем $\sim 1 \text{V}$ [4]. В переменном поле разряд и заряд такого двойного слоя осуществляется в течение полупериода ($T/2$) каждого цикла изменения напряжения. Поэтому, чтобы реализовать инжекцию, заряд q должен быть накоплен в слое по крайней мере за четверть периода подаваемого напряжения, т. е.

$$q \leq \int_{T/4}^{T/2} i(t) dt, \quad (2)$$

где $i(t) = \sigma E_0 \sin 2\pi ft$, σ — удельная электропроводность жидкости, E_0 — амплитудная напряженность внешнего поля, f — частота. Отсюда можно получить выражение для критической частоты при превышении которой в двойном слое не сможет накопиться заряд:

$$f_{cr} = \frac{\sigma U_{max}}{2\pi d}, \quad (3)$$

где U_{max} — амплитуда приложенного напряжения, d — величина межэлектродного промежутка.

При $f > f_{cr}$ инжекция заряда нет, при $f < f_{cr}$ инжекция реализуется. В эксперименте использовалась описанная ранее [2] установка, которая представляла собой канал прямоугольного сечения длиной 20 mm, шириной 3.5 mm. Верхняя и нижняя стенки канала представляли собой металлические пластины и являлись электродами. Межэлектродное расстояние (высота канала) составляло 200 μm . Время прохождения жидкости

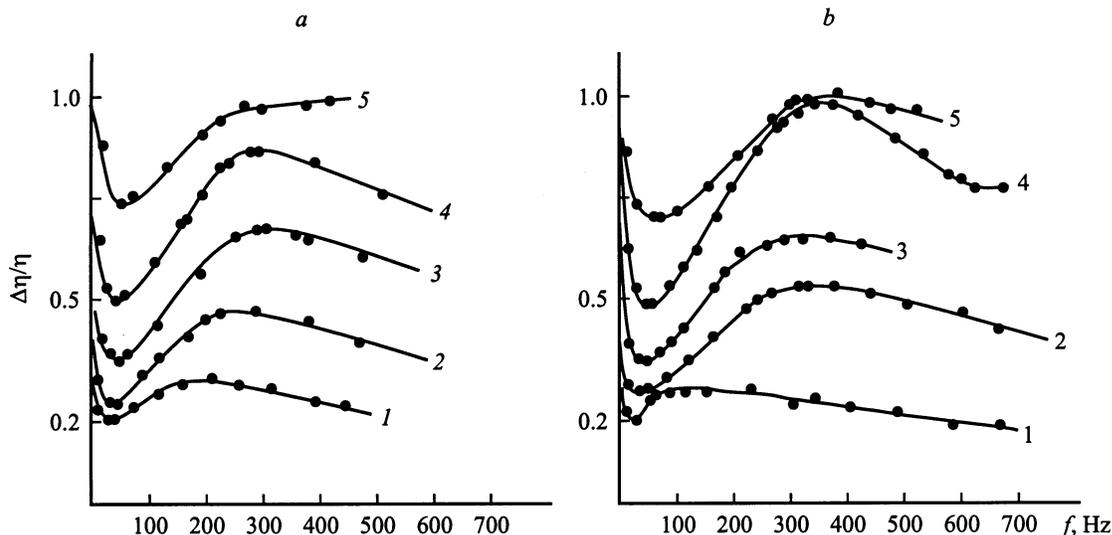


Рис. 1. Относительное изменение вязкости в зависимости от частоты приложенного переменного напряжения в ацетоне (а), нитробензоле (б): 1 — 10, 2 — 20, 3 — 30, 4 — 40, 5 — 50 kV/cm.

между метками на капилляре измерялось с помощью фоторегистрирующего прибора с точностью до 0.1 s. На электроды экспериментальной ячейки подавалось переменное напряжение от специального источника питания. Погрешность в определении частоты не превышала 3%. Участок капилляра перед ячейкой подбирался такой длины, чтобы по всей длине ячейки течение носило установившийся характер. Так как динамическую вязкость можно представить $\eta = A\Delta P/\Delta Q$, где A — аппаратная константа; ΔP — перепад давления, обеспечивающий расход $\Delta Q = V_0/t$ (V_0 — объем истекающей жидкости), то изменение наблюдаемой вязкости $\Delta\eta/\eta = (\eta_{el} - \eta)/\eta = (t_{el} - t)/t$, где η_{el} — наблюдаемая вязкость при подаче напряжения на ячейку; t_{el} — время истечения жидкости при подаче поля, t — время истечения жидкости без электрического поля.

В качестве объектов исследования использовались полярные жидкости с высоким значением диэлектрической проницаемости ($\epsilon \sim 36-20$) и для сравнения неполярная жидкость — декан ($\epsilon \approx 1.2-1.4$). Эти жидкости являются типичными представителями жидких диэлектриков. В результате эксперимента были получены зависимости изменения вязкости (времени протекания жидкости через ячейку) от частоты приложенного напряжения при различных величинах этого напряжения и для разных жидкостей. Все полученные кривые для полярных жидкостей (рис. 1, 2) имеют несколько сходных участков: на низких частотах с ростом подаваемой частоты наблюдается быстрый спад величины относительной вязкости, достижение некоего минимума и последующий быстрый рост. Далее, с ростом частоты, происходит малое изменение вязкости с тенденцией к уменьшению. Так, в ацетоне (рис. 1, а) при амплитуде подаваемого напряжения 10 kV, относительная вязкость при частоте 400 Hz имеет ту же величину, что и при ~ 60 Hz. Зна-

чение же минимума изменения относительной вязкости $(\Delta\eta/\eta)_{\min}$ растет с ростом приложенного напряжения. Так, значение $(\Delta\eta/\eta)_{\min}$ при $E = 40$ kV/c, почти в три раза больше, чем при $E = 10$ kV/cm (для всех кривых) (рис. 1, 2).

Можно предположить, что минимум на кривых исследуемых зависимостей связан с достижением критической частоты для режима накопления заряда в двойном приэлектродном слое. Действительно, сравнивая значения частоты, на которой наблюдается минимум $(\Delta\eta/\eta)_{\min}$, с рассчитанной по (3) критической частотой (см. таблицу) можно видеть, что они близки по

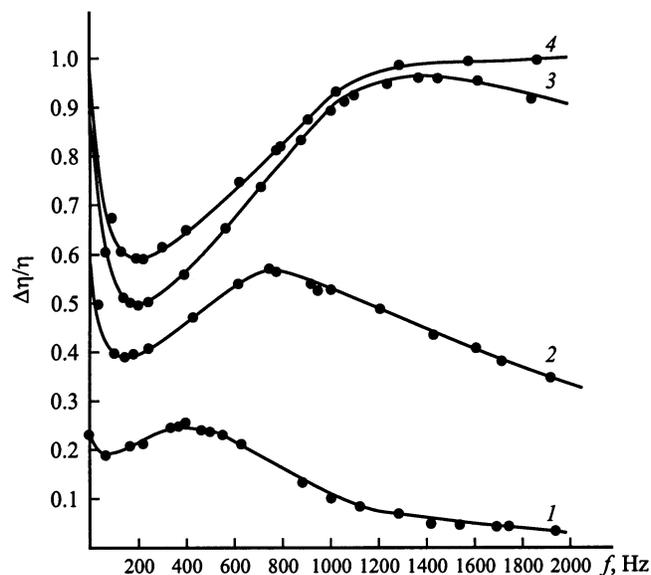


Рис. 2. Относительное изменение вязкости от частоты приложенного напряжения в нитрометане: 1 — 10, 2 — 20, 3 — 30, 4 — 40 kV/cm.

E , kV/cm	Нитробензол		Нитрометан		Ацетон		Декан	
	f_{cr} , Hz	f_{min} , Hz (эксперимент)	f_{cr} , Hz	f_{min} , Hz (эксперимент)	f_{cr} , Hz	f_{min} , Hz (эксперимент)	f_{cr} , Hz	f_{min} , Hz (эксперимент)
10	16	12	80	60	10	10	$1.6 \cdot 10^{-6}$	—
20	32	25	160	120	20	15	$3.2 \cdot 10^{-6}$	—
30	48	42	240	180	32	26	$4.8 \cdot 10^{-6}$	—
40	64	60	320	260	40	35	$6.4 \cdot 10^{-6}$	—
50	80	75	400	350	53	48	$8.0 \cdot 10^{-6}$	—

величине. Надо отметить, что критические частоты всех исследованных жидкостей лежат в диапазоне 10–500 Hz, т. е. в относительно низкочастотной области. Для такой жидкости, как декан, которая является неполярной, подобный минимум на использованных частотах не наблюдается (рис. 3). С ростом частоты относительная вязкость в декане уменьшается. Так, при изменении частоты прикладываемого напряжения в сто раз относительная вязкость падает на $\sim 30\%$, а с ростом величины приложенного напряжения величина ($\Delta\eta/\eta$) изменяется менее чем в 1.5 раз. Надо отметить, что при наложении постоянного напряжения на проточную ячейку с неполярными жидкостями значение ($\Delta\eta/\eta$) также относительно слабо менялось с ростом напряжения [2].

В таблице приведены величины критической частоты, вычисленной по (3) (f_{cr}) и полученные из эксперимента ($f_{min\text{ exp}}$). Видно, что частоты, соответствующие минимуму для кривых на рис. 1, 2, хорошо согласуются с частотой, вычисленной по (3). Для декана же критической частоты в эксперименте не наблюдалось. Из расчета (3) критическая частота декана при напряженности 10 kV/cm будет $\sim 10^{-2}$ Hz, т. е. в далекой низкочастотной области, что тоже согласуется с экспериментом.

После ”отключения” инъекции наблюдаемая вязкость несколько растет с ростом частоты и имеет слабовыраженный максимум, после чего медленно уменьшается. Подобные изменения могли бы быть обусловлены объемной проводимостью жидкости в результате диссоциации молекул примеси.

Таким образом, исследования показали, что наличие в жидкой среде объемного электрического заряда, об-

условленного инъекцией, играет важную роль в механизме электровязкостного эффекта. Предотвращение инъекции либо путем изоляции электрода от жидкой среды [2], либо изменением режима инъекции путем изменения частоты приложенного напряжения приводит к снижению относительной вязкости. Это может быть результатом того, что с уменьшением инъекции заряда в жидкость уменьшается количество иономолекулярных комплексов, т. е. инжектируемый заряд является центром образования иономолекулярного комплекса. Укрупнение структурных элементов жидкости и приводит к росту вязкости, а для определенных условий — к проявлению иных электрогидродинамических эффектов.

Список литературы

- [1] Соколов П.Е., Сосинский С.Л. // ДАН СССР. 1939. Т. 4. № 127. С. 1037–1042.
- [2] Остапенко А.А. // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 1. С. 40–43.
- [3] Рычков Ю.М., Лиона В.А. и др. // Электрон. обраб. материалов. 1994. № 5. С. 34–37.
- [4] Gosse B. // Electroanalchem. and Interfacial Electrochem. 1975. Vol. 61. P. 265–270.

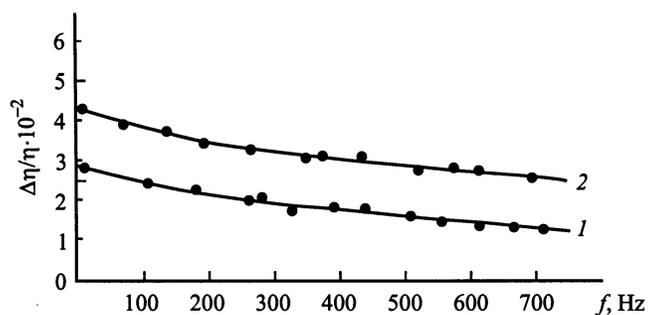


Рис. 3. Относительное изменение вязкости от частоты в декане: 1 — 20, 2 — 40 kV/cm.