

Численные результаты получены с помощью ЭВМ "Минск-32" при использовании алгоритмического языка "ФОРТРАН". Построен график зависимости частотного параметра от показателя степени изменения толщины и величины  $\alpha$  (рис. 2).

Приведенные результаты показывают, что показатель степени изменения толщины оболочки существенно влияет на частотный параметр, а следовательно

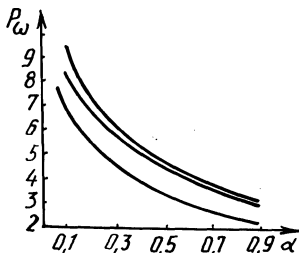


Рис. 2. Зависимость частотного параметра от показателя степени изменения толщины и величины  $\alpha$

но, и на собственную частоту осесимметрических колебаний. Следует отметить, что найденные точные аналитические решения могут быть использованы для оценки эффективности вариационных, численных и других приближенных методов определения спектра частот колебаний оболочки переменной толщины при любых граничных условиях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кан С.Н. Строительная механика оболочек. — М.: Машиностроение, 1966, с. 416—420.
2. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции. — М.: Наука, 1968, с. 178.
3. Косых Э.Г., Сейфер Д.В. Свободные колебания цилиндрических оболочек с линейным утолщением. — В кн.: Теоретическая и прикладная механика. Минск: Выш.шк., 1975, вып. 1, с. 64—69.

УДК 532.135.537.212

В.М. НОСОВ, канд.техн.наук (БПИ)

#### О РЕОЛОГИИ РАБОЧИХ СРЕД НА ОСНОВЕ АЭРОСИЛА

С точки зрения реологических характеристик до настоящего времени исследованию подвергались в основном суспензии диатомита в трансформаторном масле с активатором водой или диэтиламином [1—3]. Достаточно полный обзор работ по исследованию реоэлектрических преобразователей приведен в [4]. Другие известные в настоящее время слабозлектропроводные электро-реологические малоконцентрированные суспензии на основе аэросила [5], которые обладают значительно большей седиментационной устойчивостью (отсутствием расслоения компонентов в течение длительного времени), изучены еще недостаточно.

Сложность и разнообразие реологических свойств электро-реологических суспензий обусловлены существованием большого числа разнообразных фак-

торов, от которых зависит механическое поведение суспензий. К числу таких факторов относятся: напряженность электрического поля  $E$ , содержание твердой фазы  $C$  и активатора  $\varphi$  в системе, скорость сдвига  $\dot{\gamma}$ , температура  $t^0$ .

В работе [4] получена формула для скорости вращения диэлектрического ротора в однородном электрическом поле

$$\omega = \frac{\sigma^a + \sigma^b}{\epsilon^a + \epsilon^b} \sqrt{\frac{\epsilon^b (\sigma^a \epsilon^b - \sigma^b \epsilon^a)}{\eta_3 (\sigma^a + \sigma^b)^2}} E^2 - 1, \quad (1)$$

где  $\omega$  – скорость вращения;  $\sigma$  – удельная объемная электропроводность;  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость;  $\eta_3$  – эффективная вязкость суспензии, индексы  $a$  и  $b$  относят величины к соответствующим областям:  $a$  – рабочая среда,  $b$  – диэлектрический ротор.

До сих пор механизм возрастания эффективной вязкости суспензий в электрическом поле все еще неизвестен, отсутствуют хотя бы приближенные методы расчета эффективной вязкости от напряженности электрического поля и других параметров суспензий, в частности, электрофизических.

Это затрудняет создание математической модели, учитывающей в общем виде воздействие электрического поля на электрофизические параметры среды и ее вязкость, а также влияние на процесс вращения всех перечисленных в данной статье факторов и свойств материала диэлектрика. Поэтому недостающую теоретическую информацию приходится заимствовать из комплексного экспериментального исследования с конкретными электрореологическими суспензиями. Данная работа служит дальнейшим развитием этих исследований и имеет целью ликвидацию указанных пробелов.

Рабочими средами в опытах служили созданные нами слабо- и среднеконцентрированные суспензии на основе аэросила в вакуумном и вазелиновом маслах [5]. Активаторами, которые адсорбировались на поверхности твердых частиц, были вода и полиэтиленполиамин [3, 4]. Дисперсные системы стабилизировались поверхностно-активным веществом – моноолеатом глицерина.

Механическое поведение выбранных суспензий изучалось на специально модифицированном ротационном реоэлектровискозиметре РЭВИ-70, обеспечивающем снятие реологических характеристик суспензий в широких диапазонах изменений напряженностей поля, скоростей сдвига [6]. Отношение зазора к диаметру ротора было достаточно мало (0,025). Поэтому консистентные величины касательного напряжения сдвига и градиента скорости сдвига подсчитывались по среднему диаметру ( $D_{cp} = 1/2(D_1 + D_2)$ ) из соотношений:

$$\tau = \frac{2M}{\pi D_{cp}^3 L}; \quad \dot{\gamma} = \frac{\omega D_{cp}}{D_2 - D_1}. \quad (2)$$

Для данной работы не требовалось определять в каждом случае аналитический вид кривых течения. Вполне достаточно было ограничиться их графиками и зависимостями для эффективной вязкости, которая присутствует в теоретической формуле (1). Нами использовалось общепринятое определение

$$\eta_3 = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{2(D_2 - D_1)}{\pi D_{cp}^3 L} \frac{M}{\omega}, \quad (3)$$

где  $D_1$  и  $D_2$  — диаметр внутренний и внешний цилиндрического ротора вискозиметра;  $L$  — длина ротора;  $M$  — крутящий момент.

Для слабо- и умеренно концентрированных суспензий справедлива линейная связь  $M = A\omega$ , где коэффициент  $A$  зависит от состава суспензии и напряженности электрического поля. Следовательно,  $\eta_s$  определяется зависимостью

$$\eta_s = \frac{2(D_2 - D_1)}{\pi D_{cp}^3 L} A(C, E, \varphi). \quad (4)$$

Электрические свойства суспензий (диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь) изучались на ячейке с электродами различной длины, используя мост Шеринга для измерения емкости типа МЛЕ-1, электронно-лучевого указателя равновесия ЭЛУР-3, звукового генератора ЗГ-4 [6].

Внешнее электрическое поле радикальным образом влияет на эффективную вязкость (рис. 1) и сдвиговое течение электрореологических суспензий. Это находит свое отражение в характере зависимости  $\tau(\dot{\gamma})$ .

На графиках рис. 2 представлены результаты опытов в виде кривых стационарного одноосного течения при различных напряженностях электрического поля для рабочих сред на основе аэросила. Рассмотрим основные характерные особенности зависимостей  $\tau = \tau(\dot{\gamma}, E)$ .

С ростом напряженности электрического поля кривые течения смещаются вверх по оси напряжений. При этом наклон кривой к оси  $\dot{\gamma}$  изменяется слабо, особенно при небольшом содержании активатора твердой фазы. Таким образом, наложение поперечного электрического поля на сдвиговое течение электрореологических суспензий на основе аэросила очень сильно изменяет пластический (структурный фактор), что находит свое отражение в резком увеличении

статического предела текучести  $\tau_0$ . Резкое увеличение  $\tau_0$  можно представить в виде  $\tau_0 = aE^2$ , где  $a$  — коэффициент пропорциональности предела текучести, который зависит от параметров электрореологической суспензии. По приблизительным оценкам для слабо концентрированных суспензий его значение равно:  $10^{-10} - 10^{-12}$  Н/В<sup>2</sup> [6].

Вместе с тем за пределами нелинейного участка крутизна характеристики,

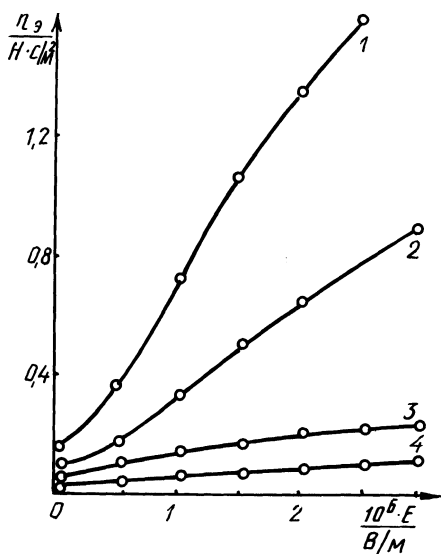


Рис. 1. Зависимость эффективной вязкости суспензий аэросила влажностью 5,5 % в вазелиновом масле от напряженности электрического поля  $E$  при скорости сдвига  $85,9 \text{ с}^{-1}$  и при массовых концентрациях  $C, \%$ .

1 — %; 2 — 3; 3 — 2; 4 — 1 %

изменяется слабо, т.е. электрическое поле в гораздо меньшей степени влияет на пластическую вязкость. Однако для рабочих сред на основе аэросила по сравнению с электрореологическими суспензиями на основе диатомита [3] при росте напряженности электрического поля крутизна кривой течения заметно возрастает с увеличением скорости сдвига.

Кривая течения имеет нелинейный участок в области малых и умеренных скоростей сдвига, кривизна и ширина которого увеличиваются с повышением напряженности электрического поля (рис. 2). С дальнейшим ростом прило-

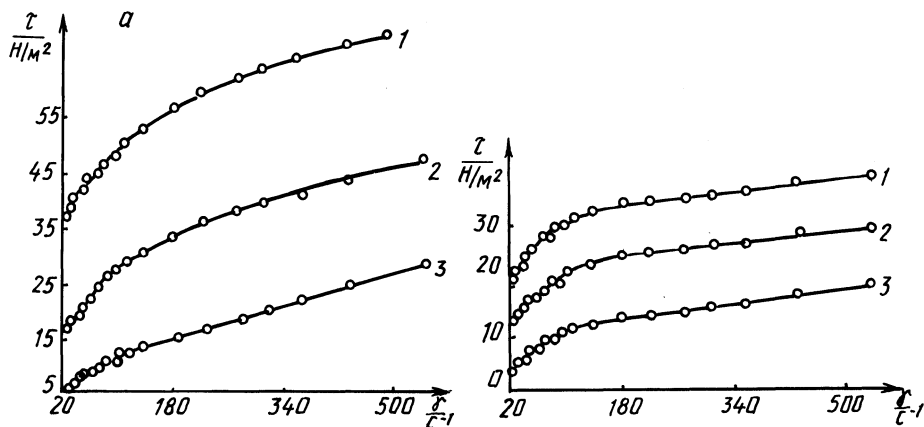


Рис. 2. Кривые течения суспензий аэросила влажностью 6,2 % в вазелиновом масле при напряженностях электрического поля  $E$ ,  $10^6$  В/м: 2,5 (а) и 1,5 (б) и массовых концентрациях аэросила:

1 — 3 %, 2 — 2,3 — 1 %

женного касательного напряжения (или скорости сдвига) все кривые течения становятся прямолинейными.

Вследствие изложенного можно сделать вывод, что электрическое поле воздействует на реологию электрореологических суспензий на основе аэросила таким образом, что их механическое поведение при сдвиговом течении имеет нелинейно-вязкопластичный характер.

Изучалось также влияние содержания активатора полиэтиленполиамина и частоты поля  $f$  на диэлектрическую проницаемость рабочих сред на основе аэросила.

Рост содержания частиц аэросила увеличивает диэлектрическую проницаемость сначала параболически, затем линейно, после чего преобладает тенденция к насыщению [4]. Характер этих кривых аналогичен зависимости эффективной вязкости (рис. 1) и удельной объемной проводимости суспензий [2] от концентрации в электрическом поле.

На рис. 3 представлены зависимости диэлектрической проницаемости от частоты поля для двухпроцентных суспензий аэросила 2 % с разным содержанием активатора полиэтиленполиамина. Диэлектрическая проницаемость электрореологических суспензий проявляет дисперсию по частоте. При низких

частотах (до 1 кГц) зависимости резко уменьшаются. Незначительное изменение частоты поля приводит к сильному изменению диэлектрической проницаемости. В дальнейшем (после 2,5 кГц) зависимость от частоты поля  $f$  ослабевает и кривые практически линейны с весьма малым наклоном к оси  $f$ . Зависимость от частоты поля проявляется сильнее при больших значениях содержания активатора полиэтиленполиамина ( $\varphi = 20$  и 30 % на рис. 3).

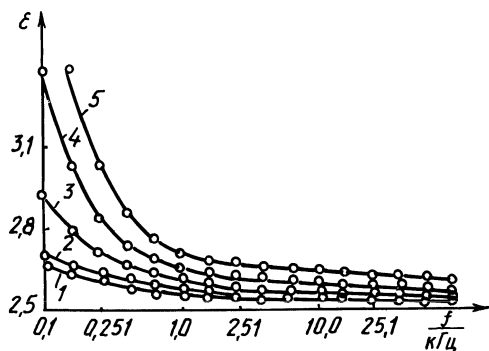


Рис. 3. Зависимость диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  от частоты  $f$  для суспензий аэросила концентрацией 2 мас. % в вакуумном масле ВМ-3 с содержанием моноолеата глицерина 200 % от массы аэросила при различном содержании активатора полиэтиленполиамина  $\varphi$  (% от массы аэросила):

1 - 5 %, 2 - 10, 3 - 15, 4 - 20, 5 - 30 %

Из сравнения полученных результатов с данными работы [4], в которой приведены аналогичные результаты для разных соотношений аэросила при постоянном содержании активатора полиэтиленполиамина, можно сделать следующие выводы.

Увеличение концентрации твердой фазы рабочих сред на основе аэросила при постоянном присутствии активатора приводит к более сильному росту абсолютных значений диэлектрической проницаемости по сравнению с содержанием активатора полиэтиленполиамина при постоянном значении аэросила. Особенно это наблюдается в области средних и высоких значений частоты поля.

Влияние активатора полиэтиленполиамина сильнее сказывается на дисперсии по частоте.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н о с о в В.М. О некоторых факторах, влияющих на вращение диэлектрика. - В кн.: Реофизические исследования. Минск: ИТМО АН БССР, 1974, с. 68-72.
2. Ш у л ь м а н З.П., Н о с о в В.М. О вращении диэлектрика в электрореологической суспензии под воздействием постоянного электрического поля. - Изв. АН БССР. Сер. физ.-энерг. наук, 1974, № 1, с. 67-70.
3. Ш у л ь м а н З.П., Н о с о в В.М. Вращение диэлектрических тел в электрореологических суспензиях. - В кн.: Проблема тепло- и массопереноса. Минск: ИТМО АН БССР, 1976, с. 145-167.
4. Ш у л ь м а н З.П., Н о с о в В.М. Реоэлектрические преобразователи. - В кн.: Электрореология: исследования и приложения. - Минск: ИТМО АН БССР, 1981, с. 3-26.
5. Н о с о в В.М. О некоторых факторах, влияющих на вращение диэлектрических тел. - В кн.: Нестационарные процессы реодинамики и тепло-массообмена. Минск: ИТМО АН БССР, 1983, с. 131-136.
6. Электрореологический эффект/Под ред. А.В. Лыкова. - Минск: Наука и техника, 1972. - 174 с.