

А.А. Яблонского. – М.: Высшая школа, 1978. 2. Носов В.М. Практическое использование САВ REDUCE (на примерах теоретической механики): Учеб. пособие.- Мн.: Технопринт, 2000. - 192 с. 3. Носов В.М. Программирование на персональных ЭВМ задач теоретической механики: Учеб. пособие. - Мн.: Технопринт, 1997. - 386 с. 4. Гецевич Э.Г., Ершов Г.Ф., Носов В.М., Тавгень И.А. Расчет элементов статически определимых конструкций с применением ЭВМ: Учебно- метод. пособие к курсовой работе по теоретической механике для студентов спец. Т.19.01 - «Промышленное и гражданское строительство» /Под ред. А.В.Чигарева. - Мн.: БГПА, 1996. - 175 с.

УДК 532.135:537.212

В.М. Носов

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОЧИХ СРЕД ДЛЯ РЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

При изучении ротационных эффектов непроводящих осесимметричных тел в электрических полях, на основании которых осуществляется разработка реоэлектрических двигателей подавляющее большинство работ, обзор которых приведен в [1], посвящено исследованию их скоростных характеристик. Однако реологические характеристики рабочих сред для реоэлектрических двигателей оказывают существенное воздействие на скоростные [2, 3] и моментные [4] характеристики вращения. В то же время их исследование не носило систематического характера. Постараемся в некоторой степени восполнить этот пробел.

Реологические характеристики рабочих сред измерялись на специальном ротационном реоэлектровязкозиметре РЭВИ-70 (рис.1) в ИТМО им. А.В.Лыкова НАН Б. Определение вязкости сводится к регистрации угла между вектором приложенного напряжения и ЭДС, индуцируемой обмотке статора синхронного микродвигателя 7. У синхронного двигателя в режиме холостого хода (роторная насадка 3 вязкозиметра вращается в воздухе) векторы индуцированной ЭДС и приложенного напряжения сдвинуты между собой на 180° . В жидкости ротор, не меняя своей скорости, отстает от вращающегося поля статора на угол, пропорциональный моменту гидродинамического сопротивления. На такой же угол, измеряемый фазочувствительным индикатором 10, по отношению к приложенному напряжению отстает и вектор ЭДС, индуцируемый в статоре двигателя. В качестве имитатора ЭДС, которую в замкнутой цепи

невозможно отделить от напряжения, применен синхронный микрогенератор 6, ротор которого жестко насажен на вал двигателя.

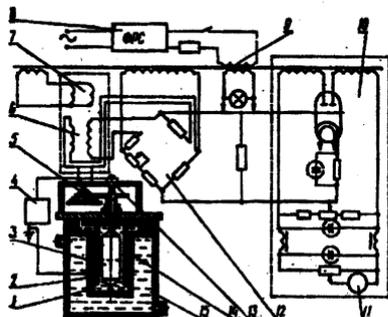


Рис. 1. Схема реоэлектровискозиметра РЭВИ-70

Прибор подключается к сети переменного тока 220В через феррорезонансный стабилизатор 8 и входной трансформатор 9, пять вторичных обмоток которого питают все элементы схемы. Синхронный двигатель 7 с микрогенератором 6, на валу которого крепится набор шестерен 5, вращает роторную насадку 3, помещенную в сменяемый наружный цилиндр 2. Электрореологическая суспензия 1 находится в корпусе 14 из оргстекла. Зазор между роторной насадкой 3 и наружным цилиндром мог изменяться в пределах 0,25—2 мм. Постоянное напряжение подводилось к насадке 3 от источника высокого напряжения 4 через контакт 13. Наружный цилиндр 2 заземлялся. Изотермические условия поддерживались прокачкой через кожух 15 теплоносителя от термостата. Индуцируемое в обмотке синхронного микрогенератора 6 напряжение пропорционально моменту на валу синхронной микромашины 7, соединенной с роторной насадкой 3. Он подается через мостовую схему 12 и фазочувствительный индикатор 10 на стрелочный измерительный прибор или автопотенциометр ЭПН-09 11.

В комплект установки входили также: источники высоковольтного напряжения типа ВС-23 и УПУ-1М (универсальная пробойная установка), киловольтметр С-96 и миллиамперметр типа М-1109 для измерения тока, протекающего в суспензии между электродами.

Диапазоны измерения и регулирования параметров: вязкости $0,2 \times 10^{-2}$ — $1,35 \times 10^{-2}$ Н с/м²; средней скорости сдвига 35—2090 с⁻²; напряженности электрического поля 3×10^6 В/м.

Началу измерений на реоэлектровискозиметре РЕВИ-70 предшествовали контрольные опыты по снятию кривых жидкостей с известными реологическими свойствами (масла костровые и индустриальное 50). Измеренные для них динамические вязкости хорошо согласовались с табличными значениями. Измерения на реоэлектровискозиметре (см. рис. 1). После установки выбранной синхронной микромашины 6, 7, роторной насадки 3 и наружного цилиндра 2 исследуемая электрореологическая суспензия 1 заливается в термостатируемый полый корпус 14, который крепится к основанию приборной стойки. Запускается синхронная микромашина, устанавливается сменная шестерня 5 и подается высокое напряжение. После выдерживания под напряжением в течение 30 с снимается показание прибора 11. Одновременно фиксируется и ток при данной напряженности для расчета удельной объемной проводимости суспензий. Выключается напряжение. Заменяется шестерня. Измерение повторяется снова. Кривая течения строится по 12 или 24 точкам (в зависимости от того, используется одна или две микромашины). Опыты повторяются три раза.

Зависимости напряжений сдвига от напряженности электрического поля можно построить, имея набор кривых течения для разных напряженностей электрического поля. Они были получены для различных концентраций твердой фазы, содержания активатора. Для этого при фиксированной скорости сдвига на электроды подавалось все возрастающее электрическое напряжение и измерялись соответствующие крутящие моменты. Кривые строились по семи точкам напряженности электрического поля E , 10^6 В/м: 0; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3. При реологическом исследовании суспензий определялись зависимости $M(n)$. Поскольку отношение величины зазора к диаметру ротора достаточно мало (0,024), консистентные величины касательного напряжения сдвига τ и градиента скорости сдвига γ подсчитывались с учетом среднего диаметра $D_{cp} = 1/2(D_1 + D_2)$ по формулам:

$$\tau = 2M/(\pi D_{cp}^2 L), \quad (1)$$

$$\gamma = \pi n D_{cp} / [30(D_2 - D_1)]. \quad (2)$$

Здесь L — высота рабочего зазора электровискозиметра. Таким образом получались графики зависимости $\tau = \tau(\gamma)$. По ним вычислялась эффективная вязкость $\eta = \tau/\gamma$ и строились кривые течения.

Наиболее сильное влияние на реологические характеристики оказывают напряженность электрического поля, концентрация твердой фазы и содержание активатора в системе, скорость сдвига, температура. Рассмотрим последовательно действие каждого фактора в отдельности.

Механическое поведение текучих систем при сдвиговом течении принято характеризовать зависимостью касательное напряжение — скорость сдвига (поперечный градиент скорости одноосного течения). Графики этих зависимостей получили

название реологических диаграмм (реограмм), или кривых течения. Реологические характеристики рабочих сред определяющим образом влияют на скоростные [2, 3] и моментные [4] характеристики вращения реоэлектрических двигателей, поэтому анализ указанных зависимостей необходим для выявления основных закономерностей изучаемого процесса.

Отметим сначала, что кривые течения электрореологических суспензий в отсутствие поля имеют вид прямых линий, с повышением концентрации отсекающих на оси напряжений небольшой начальный отрезок, равный τ_0 — предельному напряжению сдвига. Следовательно, высококонцентрированные электрореологические суспензии в отсутствие электрического поля могут быть отнесены к вязкопластичным жидкостям типа Шведова—Бингама.

На серии графиков (рис. 2, а—в) представлены результаты опытов в виде кривых стационарного одноосного течения при различных напряженностях электрического поля для некоторых видов твердой фазы и содержания активатора. С ростом напряженности электрического поля кривые течения смещаются вверх по оси напряжений. Наклон кривой к оси $\dot{\gamma}$ при этом изменяется сравнительно слабо, особенно при небольших содержаниях активатора. Таким образом, наложение поперечного электрического поля на сдвиговое течение электрореологических суспензий

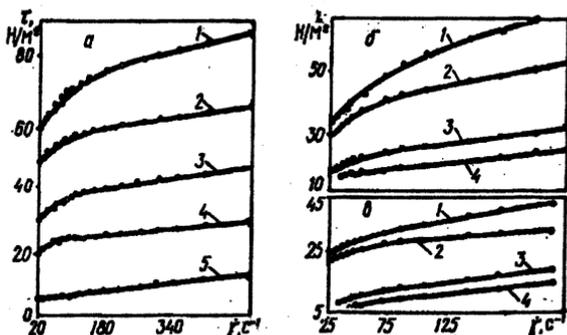


Рис.2. Кривые течения суспензий диатомита 7,5 мас.% влажностью 6,5% (а) и 5 мас.% (б, в) в трансформаторном масле: а — 1— $E=2,5 \cdot 10^6$ В/м; 2—2,0; 3—1,5; 4—1,0; 5— $E=0$; б, в — при напряженности электрического поля $E, 10^6$ В/м, равной 3,0 и 2,0 соответственно (содержание активатора диэтиламина составляет ϕ , % к массе диатомита: 1—6,6; 2—5,0; 3—2,3; 4—1,2)

довольно сильно изменяет пластический, т. е. Структурный фактор, что находит свое отражение в резком увеличении статического предела текучести. Эту зако-

номерность можно представить в виде $\tau_0 = K E^2$, где K — коэффициент пропорциональности предела текучести, зависящий от состава и свойств суспензии. По грубым оценкам для слабоконцентрированных суспензий его величина порядка 10^{-10} – 10^{-12} Н/В². Крутизна характеристики за пределами нелинейного участка изменяется слабо, т.е. электрическое поле в гораздо меньшей степени влияет на пластическую вязкость. Только для композиций порошка аэросила при росте напряженности электрического поля темп нарастания с увеличением скорости сдвига заметно выше. Кривая течения имеет нелинейный участок в области малых и умеренных скоростей сдвига, крутизна и ширина которого увеличиваются с повышением напряженности электрического поля (рис. 2, а—в). С дальнейшим ростом приложенного касательного напряжения (или скорости сдвига) все кривые течения становятся прямолинейными.

Из изложенного можно сделать вывод, что при воздействии электрического поля на электрореологические суспензии их механическое поведение при сдвиговом течении приобретает нелинейно-вязкопластичный характер.

Все использованные дисперсионные среды без добавок твердой фазы, как показали измерения, индифферентны по отношению к воздействию внешнего электрического поля. С ростом концентрации C появляется и усиливается зависимость реологических характеристик, в частности эффективной вязкости (рис. 3, а), от содержания дисперсной фазы при постоянной напряженности электрического поля. При небольших концентрациях зависимость эффективной вязкости от напряженности E близка к линейной, с ростом C она искривляется и увеличивается.

Относительно высокие значения напряжений сдвига, получаемые для соответствующих концентраций аэросила, дисперсность которого очень высока, потребовали изучения зависимости электрореологического эффекта от размеров частиц. С помощью седиментометрического анализа диатомит был фракционирован по размерам частиц, т.е. по их среднему радиусу. Для суспензий узких фракций диатомита в трансформаторном масле определялась эффективная вязкость. Как оказалось, размер частиц не изменяет характер ее зависимости от напряженности поля и скорости сдвига. Однако уменьшение размера частиц увеличивает эффективную вязкость (рис. 3, б). По-видимому, из более мелких частиц в электрическом поле образуются более однородные и плотные структуры. Возрастание концентрации твердой фазы повышает удельную объемную проводимость суспензии примерно пропорционально увеличению ее эффективной вязкости (рис. 3, б).

При постоянной напряженности поля повышение концентрации C смещает кривые течения вверх по оси напряжений, малое изменение наклона которых к оси скорости сдвига указывает на сильное изменение структурного фактора (см. рис.3). Исследования под микроскопом таких суспензий обнаружили интенсивные перемещения (осцилляции) частиц от электрода к электроду. При малых концентрациях твер-

дой фазы на электродах появляются отложения в виде зубцов и бугорков. С повышением концентрации они удлиняются и образуют между электродами мостики из частиц дисперсной фазы, непрерывное разрушение и перестройка которых приводит к образованию мощных структур.

Увеличение содержания дисперсной фазы в электрическом поле преобразует кривую течения электрореологических суспензий и делает ее нелинейной. Аналогичное влияние обнаруживают феррокомпозиции в магнитном поле.

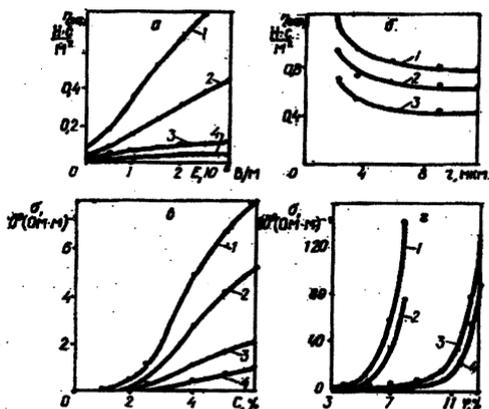


Рис 3. Зависимость эффективной вязкости суспензии диатомита влажностью 5,5% в трансформаторном масле от напряженности электрического поля E (а) при скорости сдвига $\gamma = 85,9 \text{ с}^{-1}$ (1- $C=10\%$; 2- 5,0; 3-2,5; 4- $C=1\%$) и от дисперсности частиц (б) при $C=5\%$, $E=3 \cdot 10^6 \text{ В/м}$ (1- $\gamma=53,7 \text{ с}^{-1}$; 2-71,6; 3- $\gamma=107,4 \text{ с}^{-1}$); зависимость удельной объемной проводимости суспензий от концентрации C , % (в) (1- $E=3 \cdot 10^6 \text{ В/м}$; 2-2,0; 3-1,0; 4- $E=0,5 \cdot 10^6 \text{ В/м}$), а также от влажности частиц ϕ , % (г) (1, 2 - $C=5\%$; 3, 4 - 2,5%; 1, 3 - $E=2,5 \cdot 10^6 \text{ В/м}$; 2, 4 - $1,5 \cdot 10^6 \text{ В/м}$)

Обращает на себя внимание сильная неньютоновость электрореологических суспензий, даже малоконцентрированных ($C=1\%$). С ростом концентрации зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига (псевдопластичность) прогрессивно увеличивается. Следовательно, такие суспензии в электрических полях ведут себя как псевдопластичные текучие системы, эффективная вязкость которых снижается с ростом скорости сдвига.

Одной из важных особенностей электрореологических суспензий является чувствительность их реологических характеристик к содержанию активатора на поверх-

ности частиц. Порошок диатомита, высушенный до постоянной массы или до влажности менее 2%, придает суспензии нечувствительность к воздействию внешнего электрического поля. Дальнейшее повышение содержания активатора очень сильно сказывается на сдвиговом течении электрореологических суспензий. Графики, изображенные на рис. 2 (б—в) показывают основные характерные особенности влияния активаторов на характер зависимости $\tau(\dot{\gamma})$. Различие реологического поведения исследуемых суспензий во внешнем электрическом поле при использовании разных активаторов одинаково и носит в основном количественный характер.

Возрастание содержания активатора на частицах твердой фазы действует сначала столь же сильно, как и повышение концентрации последней и напряженности E . Кривые течения смещаются вверх по оси напряжений с незначительным изменением наклона к оси $\dot{\gamma}$. Увеличение роли структурного фактора здесь можно объяснить интенсификацией межчастичного взаимодействия мостиковых образований. Это подтверждают измерения усилия отрыва двух крупных шариков из силикагеля. Силы их сцепления с ростом содержания активатора заметно увеличивались до некоторого предела. Дальнейший рост содержания активатора снижает темп смещения кривых течения по оси напряжений. Одновременно повышается удельная объемная проводимость. После достижения определенного для каждой концентрации активатора значения это увеличение становится лавинообразным (рис. 3, з). Такое поведение затрудняет изучение электрореологических суспензий в электрическом поле при критических влажностях из-за потери системой диэлектрических свойств и электрического пробоя.

При малых концентрациях дисперсной фазы величина удельной объемной проводимости с ростом содержания активатора повышается не так сильно; напряжения сдвига с дальнейшим нарастанием концентрации активатора сверх указанного предельного значения снижаются.

Кривая течения также нелинейна в области малых и умеренных скоростей сдвига. Кривизна и ширина участка нелинейности увеличивается с повышением содержания активатора.

Весьма сложную и интересную теплофизическую ситуацию создает совместное действие трех полей — электрического, сдвигового и температурного. В простейшем случае гомогенной ньютоновской жидкости нагрев воздействует на вынужденное течение в основном через снижение вязкости и соответственное повышение текучести в тех областях потока, в которых температура выше. Это приводит к определенной перестройке поля скорости и, следовательно, к воздействию на вынужденную конвекцию тепла. Кроме того, возникновение естественной гравитационной тепловой конвекции может также существенно влиять на этот процесс в зависимости от ориен-

тации тепловых потоков обоих видов конвекции. Если они сонаправлены, то неизотермичность будет интенсифицировать течение.

Играет роль и температурная зависимость коэффициента теплопроводности. Существенное значение этот фактор имеет в основном только в самом тонком пристенном слое вблизи обтекаемой поверхности, где процессы теплопроводности преобладают. Для электрореологических жидкостей влияние температурного фактора изучено слабо. По этой причине общепринято оценивать роль и вклад температурного поля в процессах течения исходя из конкретного опыта для выбранной текучей системы.

Рассмотрение кривых течения, изображенных на рис. 4, обнаруживает следующие наиболее важные особенности.

1. В отсутствие электрического поля кривые течения линейны и с нагревом становятся положе, т. е. напряжение трения при фиксированной скорости сдвига уменьшается.

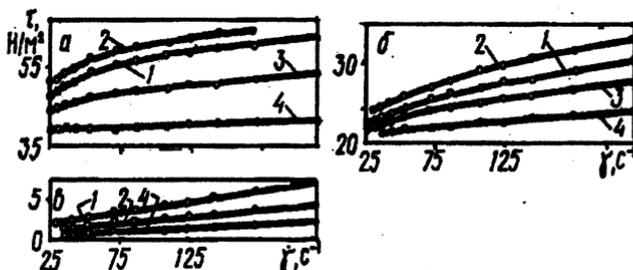


Рис. 4 Кривые течения суспензии диатомита в трансформаторном масле концентрации 5% и влажностью 6,5%, а — $E = 2,5 \cdot 10^6$ В/м; б — 1,5; в — $E = 0$; 1 — $T = 293$ К; 2 — 313; 3 — 333; 4 — $T = 363$ К

2. В электрическом поле нагрев суспензии до некоторого значения увеличивает напряжение сдвига при постоянной скорости деформации. При дальнейшем росте температуры эффективная вязкость системы и соответствующие ей напряжения сдвига начинают уменьшаться, кривые течения становятся значительно положе, т. е. происходит «деградация» реологического фактора. Такой характер зависимости обычно связывается с увеличением поляризации дисперсной фазы, снижением вязкости дисперсионной среды и поведением активатора на поверхности твердой фазы, а также с проявлением первого и второго электровязких эффектов, обычно имеющих место в дисперсионных системах с двойными электрическими слоями.

3. Ослабляется фактор нелинейности при нагреве суспензии в электрическом поле. Так, уже при 363 К кривая течения с самого начала линейна во всем рассмот-

ренном диапазоне скоростей сдвига при разных напряженностях электрического поля. Таким образом, устанавливается еще одна аналогия с родственным магнитореологическим эффектом, в котором нагрев ферросуспензии в магнитном поле также ослабляет нелинейный фактор.

ЛИТЕРАТУРА

1. З.П.Шульман, В.М.Носов. Вращение непроводящих тел в электрореологических суспензиях.—Мн.:Наука и техника, 1985.—112 с. 2. Z.P.Shulman and V.M.Nosov. Rotation of the Axisymmetric Bodies in Electrorheological Suspensions, in Proceedings of the 5TH International Conference Electro-Rheological Fluids, Magneto-Rheological Suspensions and Associated Technology.- Sheffield, 1995.- P. 72–84. 3. Z.P.Shulman and V.M.Nosov. Rotation of the Axisymmetric Bodies in Electrorheological Suspensions (ERS), in International Journal of Modern Physics B.- 1996.- Vol. 10.- № 23 & 24.- P. 2903–2915. 4. Носов В.М. Влияние момента сопротивления на механические характеристики вращения непроводящих тел в электрореологических суспензиях//Машиностроение.-Мн.,2000.-Вып. 16.-С. 263-266.

УДК 621.83.06

М.Ф. Пашкевич, В.М. Пашкевич, А.М. Пашкевич, С.А. Жигунов

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПЛАНЕТАРНОЙ РАДИАЛЬНО-ПЛУНЖЕРНОЙ ПЕРЕДАЧИ

*Могилевский государственный технический университет
Могилев, Беларусь*

Ранее [1] была решена задача математического моделирования работы радиально-плунжерной передачи с идеальными параметрами зацепляющихся деталей (без погрешностей изготовления) и определенными их действительными значениями, характеризующимися погрешностями изготовления. Эта задача была решена для передачи, выполненной в соответствии с шестой кинематической схемой передач первого класса [2].

Математическая модель работы передачи представляет собой совокупность уравнений, связывающих углы поворота ведущего вала с действительными значениями углов поворота ведомого вала. Поэтому определить кинематическую погрешность передачи можно на основе анализа математической модели, в которой кинематическая погрешность определяется отклонением фактического (или действительного) угла поворота ее ведомого вала от номинального, соответствующего равным уг-