

На правах рукописи

ТОКАРЕВ Андрей Николаевич

**ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ
ВЯЗКОСТИ ДЛЯ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ**

Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной
техники и систем управления

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва –2005

[illegible]



1765697

Токарев А.Н. Электрогидрод

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Вязкость является важным показателем, характеризующим качество получаемой продукции в производстве полимеров, пластических масс, нефтепродуктов, синтетических смол, красок, смазочных материалов. У каждого типа топлива имеется некоторое оптимальное значение вязкости, при котором достигается наибольший КПД, уменьшается износ механических частей двигателей, а также улучшаются экологические показатели отработанных газов, кроме того, внедрение в современное производство каплеструйных технологий требует поддержания в узких пределах вязкости рабочей жидкости. В связи с этим к современным устройствам измерения вязкости предъявляются следующие требования:

- 1) Обеспечение непрерывного автоматического измерения;
- 2) Наличие массогабаритных параметров приборного класса;
- 3) Высокая чувствительность при малом изменении вязкости;
- 4) Стабильность характеристик при влиянии внешних факторов;
- 5) Высокая точность и быстродействие;
- 6) Наличие электрического сигнала на выходе преобразователя.

Такие преимущества различных разновидностей каплеструйной печати, как возможность многокрасочной печати, высокое разрешение и скорость печати, отсутствие контакта с разнообразным запечатываемым материалом, низкий уровень шума и низкая стоимость чернил, способствуют эффективному применению данной технологии в различных областях: скоростной бесшумный вывод алфавитно-цифровой и графической информации в АСНИ, САПР, АРМ, АСТПП; получение черно-белых и цветных изображений в полиграфии; создание гибких автоматических электрокаплеструйных модулей для различных целей.

Рабочими средами для реализации каплеструйной технологии являются чернила. Анализ литературных и патентных источников, показал, что большинство композиций чернил имеет следующие характеристики: вязкость не превышает 10 мПа·с; величина поверхностного натяжения варьируется от 25 до 60 мН/м; концентрация красящего компонента не превышает 5 масс.%; концентрация связующих компонентов не превышает 10 масс.%.

К основным параметрам, обеспечивающих функционирование электрокаплеструйных композиций относят: вязкость, удельное объемное сопротивление, поверхностное натяжение, дисперсный состав, однородность и стабильность. Все типы чернил в свою очередь подразделяются на два подтипа: растворимые и пигментные. По степени адгезии (проникновению чернил в слой маркируемой поверхности) разделяют чернила с повышенной адгезией (от 3 до 5 мкм), с хорошей (от 1 до 3 мкм) и удовлетворительной (до 1 мкм).

Среди контролируемых параметров качества чернил вязкость занимает особое место. Для обеспечения процесса печати чернила должны иметь строго определенную вязкость и оставаться стабильно-однородными как при хранении, так и в различных условиях эксплуатации, поскольку от её значения зависит целый набор эксплуатационных показателей, и главный из них - размер и форма капли. Кроме того, незначительное отклонение вязкости от нормы в процессе печати может вызвать заметное отклонение от траектории полета капли, неточности её позиционирования, изменение цвета на оттиске.

Плотность чернил варьируется в зависимости от состава и назначения чернил в очень небольших пределах: от 1,01 до 1,20 г/мл, и при колебаниях температуры или влажности изменения плотности будут ничтожными, неощутимыми при печати. Гораздо важнее такая характеристика, как динамическая вязкость, а именно сила сопротивления, возникающая при относительном перемещении слоев чернил по каналам (от резервуара до печатающей головки) с заданной скоростью при печати. Например, вязкость воды при 20,2 °C составляет 1,000 сП, а при 10 °C - 1,308 сП, т.е. больше в 1,3 раза. С органическими растворителями зависимость ещё более ощутима: для глицерина при 20°C вязкость составляет 1480 сП, при 10 °C - 3950 сП (больше в 2,67 раза).

Существующие преобразователи вязкости не удовлетворяют полностью современным требованиям, предъявляемым к этим устройствам, как элементам систем управления по быстродействию, простоте конструкции и надежности. Существует необходимость проведения исследований в области измерительной техники с целью использования различных физических явлений и новых материалов в качестве основы вновь создаваемых преобразователей вязкости.

Одним из перспективных направлений является использование электрогидродинамических явлений (ЭГД) явлений в разработке устройств для контроля вязкости жидких диэлектриков. Теоретические и экспериментальные работы по ЭГД технологиям в диэлектрических жидкостях создали предпосылки для реализации ЭГД - преобразователя вязкости диэлектрических жидкостей, работа которого основана на использовании эффектов электрогидродинамики.

Цель работы разработка и исследование электрогидродинамического преобразователя вязкости для жидких диэлектриков, обеспечивающего необходимые показатели систем управления вязкостью жидких диэлектриков.

Методы и средства исследования базируются на использовании методов теории автоматического управления, численных методов расчёта электростатических полей (метод Зейделя), электрофлюидного метода преобразования рода энергии сигналов, основанного на использовании эффектов электрогидродинамики. Оптимизация конструкции электрогидродинамического преобразователя вязкости (ЭГД ПВ) проведена методом планирования эксперимента. Экспериментальные исследования проведе-

ны на специально разработанной установке и экспериментальном образце ЭГД ПВ с использованием методов и средств электротехнических измерений, программных продуктов MATHCAD и ELCUT и методов математической статистики.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. На основе проведенного анализа существующих измерителей вязкости жидкостей предложена обобщенная классификация вискозиметров.

2. Теоретически обосновано использование для измерения вязкости электрогидродинамического эффекта.

3. Получена математическая модель ЭГД ПВ, обоснованная системой уравнений электрогидродинамики, с применением методов аналитического и имитационного моделирования для исследования электростатических и гидродинамических процессов, включающей моделирование электростатического поля в системе электродов "игла-трубка".

4. Разработаны варианты реализации макетного образца ЭГД ПВ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Электрогидродинамический преобразователь вязкости для жидких диэлектриков.

2. Математическая модель ЭГД ПВ с методом расчета электростатического поля в системе электродов "игла-трубка".

3. Результаты экспериментальных исследований ЭГД ПВ.

4. Методика инженерного расчета и система контроля вязкости чернил каплеустройного маркиратора с ЭГД ПВ в качестве элемента обратной связи.

Практическая ценность и реализация результатов работы. Создан макетный образец ЭГД ПВ с двумя системами электродов, и токовым сигналом на выходе, способный измерять вязкость жидких диэлектриков с достаточной точностью в широком диапазоне, тем самым, расширяющий возможности систем управления вязкостью. Разработанный электрогидродинамический преобразователь вязкости в качестве элемента обратной связи рекомендован к внедрению в ОАО "Турбoreмонт - ВКК".

Научные и практические результаты работы использованы в плановых госбюджетных научно - исследовательских работах, выполненных на кафедре "Управление и информатика в технических системах" Балаковского института техники, технологии и управления СГТУ в 1999-2005г.г., а также по гранту Минпромнауки России №ИП-2064.2003.8.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 4-й, 5-й, 6-й Международной научной конференции "Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей"(г.Санкт-Петербург, 1996,1999,2003 гг.); 1-й Международной конференции "Предмет, объекты и проблемы энергетики векторного взаимодействия потоков в системах с распределенными параметрами"(г. Балаково, 1997г.); 4-й, 5-й Российской научной конференции. "Векторная энергетика в технических, биологических и со-

циальных системах"(г. Балаково, 2001-2002гг.); 7-й Международной научно-технической конференции по динамике технологических систем "ДТС-2004" (г.Саратов, 2004г.);семинарах кафедры "Управление и информатика в технических системах" БИТТУ СГТУ в 1999-2005гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы из 105 наименований , 6 приложений. Работа содержит 143 страницы основного текста, включая 72 рисунка, 13 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, дана общая характеристика результатов исследований, представлены основные научные положения и результаты работы, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены задачи повышения качества маркировки изделий, исследованы области перспективного применения капле-струйных технологий. Представлены результаты сравнительного анализа устройств ведущих мировых производителей.

Основными причинами изменения вязкости композиций при хранении и работе являются механизмы переноса, циркуляции чернил, испарения наиболее летучих компонентов, взаимодействие ПАВ с красителем или их растворение в диспергирующей среде, входящих в состав дисперсной фазы. Поэтому необходимо контролировать вязкость чернил и на основании коллигативного уравнения вязкости композиций добавлять рассчитанное количество летучего компонента.

Вопрос невидимости растровой, точечной структуры изображений, получаемых при использовании струйной технологии печати, до сих пор является актуальной проблемой. В современных высокоскоростных флексографских машинах скорость печати достигает 600 об/мин, и по данным Brookfield Engineering Laboratories, изменение вязкости всего на 1 с может увеличить расход чернил на 25%. Такое изменение обусловлено тесной связью расхода, вязкости и уровня pH. И каждый раз для коррекции используются соответствующие добавки. Это является одной из причин непредсказуемого изменения цвета и уменьшения оптической плотности.

Известные измерители вязкости жидкости не учитывают свойств измеряемой жидкости. Проведена классификация гидравлических преобразователей вязкости слабпроводящих сред и с граничной проводимостью. Несмотря на большое разнообразие методов, и средств измерения вязкости все они в той или иной степени реализуют один общий принцип,

основанный на "ньютоновском" определении вязкости, т.е. для измерения вязкости необходимо каким-либо образом воздействовать на слои жидкости с последующим измерением реакции жидкости на это воздействие.

На основании проведенного патентного и литературного анализа сделан вывод, что известные методы измерения вязкости и конструкции вискозиметров не удовлетворяют высоким требованиям, предъявляемым к приборам. С наибольшей точностью вязкость измеряют капиллярные вискозиметры, в которых реализуется поток Хаген - Пуазейля. Силовое воздействие в таких вискозиметрах осуществляется созданием перепада давления на концах капилляра. а вязкость может быть определена двумя взаимоисключающими способами: она пропорциональна перепаду давления на входе и выходе капилляра при постоянном расходе через капилляр; или же, она пропорциональна расходу при постоянном перепаде давления на концах капилляра.

Сделан вывод, что использование в конструкции двух капилляров является наиболее перспективным и рациональным способом измерения вязкости жидкости, поскольку исключается влияния внешних факторов, повышается чувствительность и диапазон измерений. Использование второго капилляра с эталонной жидкостью позволяет не только повысить точность, но и автоматизировать процесс измерения.

Проведенные исследования показали, что для создания надёжных и быстродействующих электрогидравлических преобразователей с хорошими статическими и гидравлическими характеристиками наиболее пригоден электрогидродинамический метод управления, основанный на использовании эффектов электрогидродинамики. При этом подвижные механические и электромеханические элементы в электрогидродинамических преобразователях не используются.

При разработке нового преобразователя вязкости должна быть предусмотрена его реализация на одной базовой конструкции, обеспечивающей использование принципов блочно-модульного проектирования и согласование с современной микропроцессорной техникой и автоматическими системами контроля.

Доказана возможность разработки нового быстродействующего электрогидравлического преобразователя для измерения вязкости жидких диэлектриков, работающего на основе электростатического способа с использованием электрогидродинамического принципа измерения.

Во второй главе рассмотрены физические основы ЭГД ПВ, описаны особенности воздействия электростатических полей на диэлектрические жидкости в узких капиллярах, при внесении в поток диэлектрической среды объемного электрического заряда. Особенность подобного преобразования состоит в том, что используются кулоновские силы, создаваемые на молекулярном уровне непосредственным приложением сильных электрических полей к рабочим средам преобразователя, а также сопутствующие им явления.

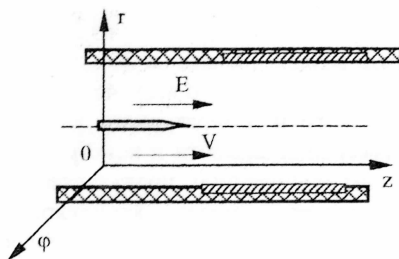


Рис.1 Создание электростатического поля в капилляре с электродами "игла-трубка"

Жидкие диэлектрики в зависимости от приложенного напряжения не только притягиваются к тонкому электроду, но и могут отталкиваться от него. Причиной отталкивания является кулоновская сила, действующая на объемный заряд, вызванный протеканием тока в неоднородно проводящей жидкости. При этом получаемая сила отталкивания, которая с ростом напряжения увеличивается

в определенный момент становится больше поляризационной силы притягивания диэлектрика к электроду.

Давление потока зависит от силы отталкивания, которая определяется радиусом острия электрода и величиной объемного заряда. Радиус электрода влияет на неоднородность электрического поля. Величина объемного заряда зависит от первоначальной концентрации носителей заряда, то есть от природы и состава диэлектрической жидкости, а также от степени ионизации в неоднородном электрическом поле, которая, в свою очередь, зависит от напряженности электрического поля.

Операции создания электрического поля и внесения свободных зарядов в жидкость объединены в одну и наиболее просто осуществляются с помощью создания разряда типа коронного в жидком диэлектрике между высоковольтными электродами "игла-трубка" (Рис1.). Область высокой напряженности поля (коронирующий слой) сужается до десятых и даже сотых долей миллиметра. В отличие от свободных потоков течения в каналах испытывают тормозящее действие стенок, которое не позволяет игнорировать вязкостные свойства жидкостей, и в результате управляющих воздействий режим течения не изменяется, оставаясь ламинарным.

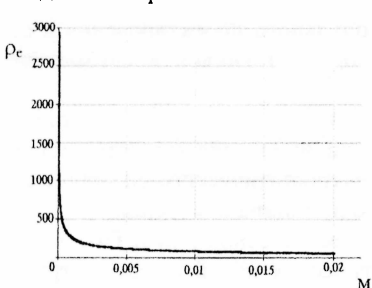


Рис.2 Зависимость плотности заряда ρ_c от продольной координаты

Для узкого канала поперечные течения и токи несущественны, под действием поля, адсорбированного стенками заряда, наибольшая плотность заряда жидкости наблюдается вдоль оси канала. При этом плотность заряда на оси канала оценивается выражением (1)

$$\rho_{ec} = \frac{\rho_{e0}}{1 - \frac{b\pi^2 U_0 h^2 \sin(\frac{\pi x}{l})}{6Dl^2}} \quad (1)$$

Плотность распределения заряда резко снижается при удалении от зоны короны, и при $l=0,002\text{м}$ уменьшается в 10^3 раз (Рис.2.).

Динамику вязкой несжимаемой жидкости можно описать с помощью уравнения Навье-Стокса (2).

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + (\bar{V} \nabla) \bar{V} = \frac{1}{\rho} \bar{F} - \frac{1}{\rho} \Delta P + \nu \Delta \bar{V} \quad (2)$$

Под действием пондеромоторных сил происходит перемещение диэлектрика и таким образом реализуется преобразование электрического сигнала в изменение профиля распределения скорости жидкости. В основу построения ЭГД ПВ положено явление возникновения пондеромоторных сил в однофазном, заряженном диэлектрике ($\nabla \varepsilon = 0$, $\partial \varepsilon / \partial \rho = 0$) при приложении к нему электростатического поля. С учетом того, что поле между электродами ЭГД ПВ является резко неоднородным, и с помощью коронного разряда в жидкости сообщаем объему диэлектрика заряд, можем записать выражение для объемной плотности пондеромоторных сил (3). Анализ уравнения полного тока позволил оставить две составляющие: проводимостную и конвективную (4).

$$\bar{F} = -\bar{\nabla} P - \rho_e \bar{E} \quad (3) \quad \bar{j} = \rho_e b \bar{E} + \rho_e \bar{V} \quad (4)$$

Так как в диэлектрических жидкостях максимальная плотность униполярного заряда не превышает 1 Кл/м^3 , а в резко неоднородном поле коэффициент диффузии жидкости $D \approx 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$. Ток смещения принимаем равным нулю, так как поле в межэлектродном пространстве - электростатическое.

Таким образом, возможно использовать электрогидродинамический эффект для создания электрогидродинамического преобразователя вязкости жидких диэлектриков, в котором информационным параметром вязкости является конвективная составляющая полного тока.

В третьей главе проведено теоретическое исследование электрогидродинамического преобразователя вязкости для жидких диэлектриков. Выполнено обоснование выделения двух систем электродов: измерительной и генераторной. На основе исходных уравнений электрогидродинамики получены математические зависимости, описывающие процессы в ЭГД ПВ (5,6).

$$\frac{\partial P_1}{\partial z} = \eta_1 \left(\frac{\partial^2 V_{z1}}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 V_{z1}}{\partial \varphi^2} \right) + \rho_{e1} E_{z1} \quad (5) \quad j_{z1} = \rho_{e1} V_{z1} \quad (6)$$

Во втором параграфе проведено численное решение электростатической задачи в измерительном канале ЭГД ПВ. Конструкция ЭГД ПВ позволяет получить резко неоднородное поле для вноса заряда с одновременным воздействием на слои жидкости в генераторной системе электродов, и уменьшить практически до нуля влияние проводимостной составляющей в зоне измерения. Для расчета был использован метод сеток, который широко используется при численных расчетах электростатических полей. Он применяется в тех

часто встречающихся в инженерной практике случаях, когда в силу тех или других причин не удается отыскать точное или приближенное аналитическое решение задачи. Метод сеток основан на замене частных производных, входящих в уравнение Лапласа, соответствующими им отношениями конечных разностей, заданная область разбивается сеткой таким образом, чтобы на границе области определялись значения искомого потенциала во всех внутренних узлах сетки. В рассматриваемой модели игла представляет собой гиперболический цилиндр, трубка в виду конструктивного исполнения вырождается в тонкостенный цилиндр (рис.3).

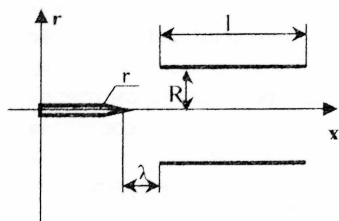


Рис.3 Аналитическое представление системы «игла-трубка» в цилиндрической системе координат

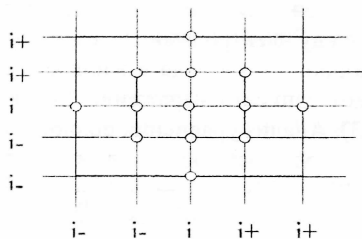


Рис.4 Шаблон задачи МКЭ 13 узлов

Для решения использовался итерационный метод Зейделя. Сетка W очевидно состоит из точек пересечения прямых $x=x(i)$ и $y=y(j)$. Рассчитан шаблон задачи - тринадцатиточечный, то есть на каждом шаге в разностном уравнении участвуют 13 точек (узлов сетки). (Рис.4).

С учетом краевых условий было получено уравнение модели (7)

$$\begin{aligned} & \left[-\frac{U_{i-2j}^{(k+1)}}{h_y^4} - \frac{2U_{i-1j-1}^{(k+1)}}{h_x^2 h_y^2} + \left(\frac{4}{h_x^4} + \frac{4}{h_x^2 h_y^2} \right) U_{ij-1}^{(k+1)} - \frac{2U_{i+1j-1}^{(k+1)}}{h_x^2 h_y^2} - \frac{U_{i-1j}^{(k+1)}}{h_x^4} + \left(\frac{4}{h_x^4} + \frac{4}{h_x^2 h_y^2} \right) U_{i-1j}^{(k+1)} \right] - \\ & - \left[\left(\frac{4}{h_x^4} + \frac{4}{h_x^2 h_y^2} \right) U_{i+1j}^{(k)} - \frac{2U_{i-1j+1}^{(k)}}{h_x^2 h_y^2} - \frac{U_{i+2j}^{(k)}}{h_x^4} + \left(\frac{4}{h_x^4} + \frac{4}{h_x^2 h_y^2} \right) U_{ij+1}^{(k)} - \frac{2U_{i+1j+1}^{(k)}}{h_x^2 h_y^2} - \frac{U_{ij+2}^{(k)}}{h_y^4} \right] + f_{ij} = (7) \\ & = \left(\frac{6}{h_x^4} - \frac{8}{h_x^2 h_y^2} + \frac{6}{h_y^4} \right) U_{ij}^{(k+1)} \end{aligned}$$

Метод конечных элементов реализован в программном продукте «ELCUT 4.2». Получена спектрограмма напряженности (Рис.5).

Для осуществления с помощью системы электродов "игла-трубка" коронного разряда необходимо подавать напряжение в пределах $2+20$ кВ, при этом не нарушается характер протекания ЭГД- процесса, а напряженность поля не превосходит максимально возможного значения пробоя (для диэлектрических жидкостей $E_{пр} = 10^8$ В/м).

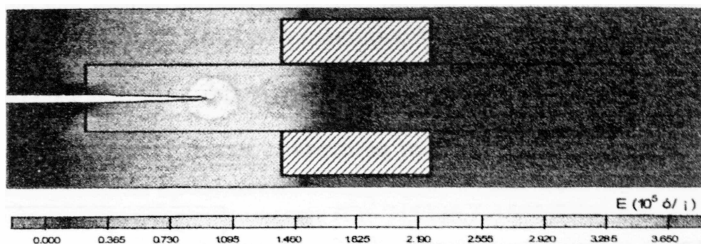


Рис.5 Спектрограмма напряженности при $\lambda=5 \cdot 10^{-4}$ м, $R=3 \cdot 10^{-4}$ м, $l=1 \cdot 10^{-3}$ м,
 $r_0=2 \cdot 10^{-6}$ м, $U_{\text{н}}=-1000$ В

Длина трубки l является самым оптимальным параметром для снижения напряженности E на конце трубки, при этом изменение данного параметра оказывает самое слабое воздействие на ЭГД – процесс. Анализ характера распределения E по длине трубки (Рис.6) позволил сделать вывод, что при длине электрода-трубки более двух ее диаметров, напряженность электростатического поля на ее конце стремится к нулевому значению.

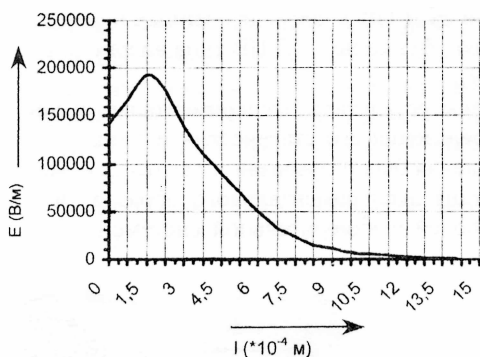


Рис.6 График зависимости E от l по оси трубки, от кончика иглы до конца трубки

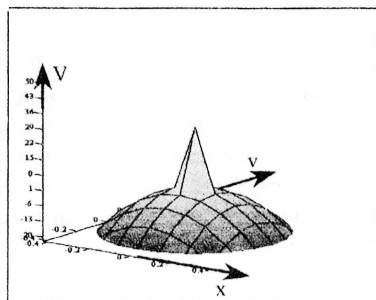


Рис.7 Профиль распределения скорости при $E = 1.7 \cdot 10^6$ В/м.

Оценка точности расчета методом конечных элементов в программной среде «Mathworks Matlab release 13» показала, что максимальная относительная погрешность алгоритма метода конечных элементов, в сравнении с аналитическим решением по методу Фурье при заданном количестве узлов, не превысила 5,1 %. При измельчении расчетной сетки и приближении треугольного конечного элемента по форме к равностороннему, численное решение, как правило, стремиться к уточнению.

Для получения расчетного выражения для статической характеристики ЭГД ПВ был рассмотрен процесс изменения профиля скорости и токов, происходящих в ходе работы ЭГД ПВ. Так как в зоне измеритель-

ного электрода $E=0$, то с учетом осесимметричной задачи для одного канала было получено(8).

$$j_1 = \int_0^r \int_{-\varphi_0}^{\varphi_0} \int_z^z \rho_{ez} \frac{\Delta P}{4\eta l} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \partial z \partial \varphi \partial r \quad (8), \text{ где } \rho_{e \max} = \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon E_{\max}}{r_0} \text{ при } \rho_c = k\rho_{e \max}.$$

(k -коэффициент, зависящий от расстояния между генераторным и измерительным электродами).

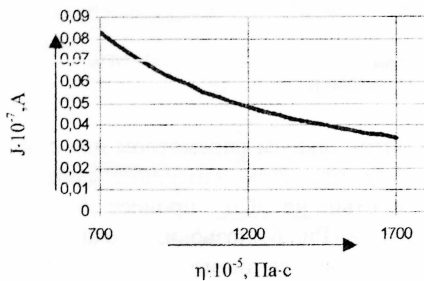


Рис.8 Расчетная статистическая характеристика ЭГД

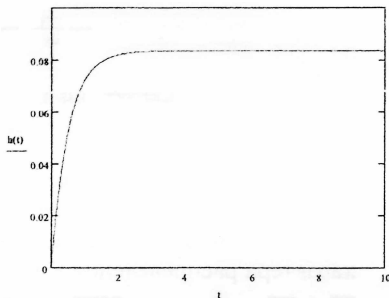


Рис.9 Переходная функция ЭГД ПВ

Теоретическая характеристика представлена на рис.8. Теоретический анализ динамических свойств ЭГД ПВ в сосредоточенных параметрах позволяет оценить передаточную функцию ЭГД ПВ типа аperiodического звена первого порядка (Рис.9).

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований ЭГД ПВ с целью определения его статических и динамических характеристик. Для их проведения был разработан и изготовлен экспериментальный стенд. Конструкция экспериментального образца ЭГД ПВ включает себя капилляр с рабочей и измерительной системой электродов (Рис.10).

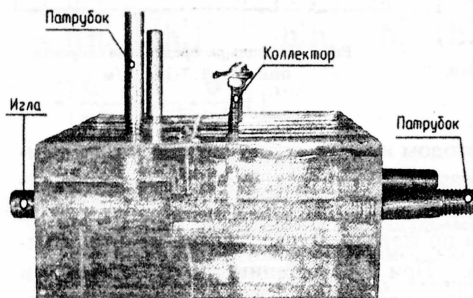


Рис.10 Конструкция ЭГД ПВ

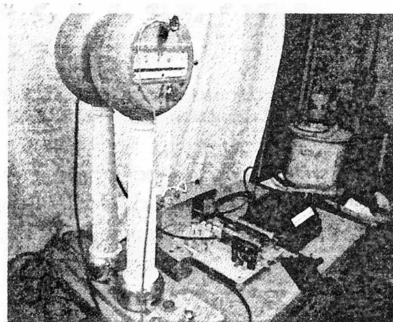


Рис.11 Экспериментальный стенд

ЭГД ПВ – устройство, позволяющее получать данные о величине вязкости в виде токового сигнала.

С целью оценки влияния электрофизических свойств диэлектрических жидкостей на статическую характеристику ЭГД ПВ были проведены экспериментальные исследования их вольтамперных характеристик в специальной измерительной ячейке (кювете), при этом, 35%-ое падание тока происходит за 2,5 мин, т.е. эффект электроочистки можно не учитывать.

Эксперименты проводились с индустриальными маслами И-30А, И-40А и с трансформаторным маслом (ГК-215225, Т-1500, ГКп) при изменении управляющего напряжения (0...25кВ) межэлектродного расстояния λ от 0,1...5 мм. Для ЭГД ПВ с одной системой электродов полученные вольт-амперные характеристики, на основании которых был сделан вывод, что межэлектродное расстояние λ должно быть установлено не менее 0,5мм и не более 2мм, напряжение между электродами "игла-трубка" должно варьироваться в пределах (5÷20кВ).

При дальнейших исследованиях была оценена степень влияния изменения скорости жидкости на величину полного тока между рабочим электродом "игла" и измерительным "трубка", после чего был сделан вывод о доминировании проводимостной составляющей полного тока над конвективной в ЭГД ПВ с одной системой электродов, и необходимости выделения зоны измерительного электрода, в которой напряженность электростатического поля равна нулю.

Вольтамперная характеристика генераторной пары электродов "игла-трубка" описывается полиномиальным уравнением вида: $y = 0,0601x^2 - 0,3546x + 0,2707$ с достоверностью аппроксимации $R^2 = 0,996$, а ВАХ измерительного электрода-трубки: $y = 0,057x - 0,1378$ с достоверностью аппроксимации $R^2 = 0,9605$.

Получены ВАХ генераторного и измерительного электродов (Рис.12).

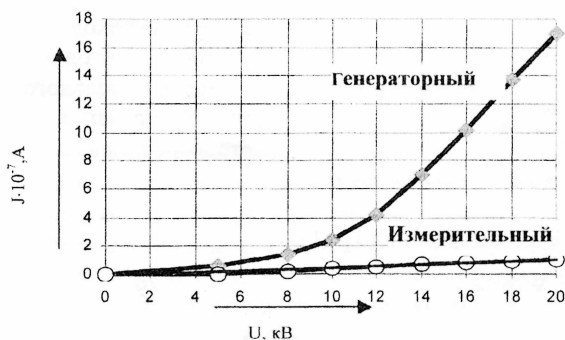


Рис.12 ВАХ ЭГД ПВ

Таким образом, в отличие от ВАХ генераторной пары, ВАХ измерительного электрода является линейной, что может быть объяснено отсутствием влияния проводимостной составляющей на величину полного тока при увеличении напряжения на рабочих электродах.

На рис.13 представлены статические характеристики ЭГД ПВ с измерительным электродом "стержень" при различных напряжениях на генераторном электроде. При использовании логотрической схемы измерения получены соответствующие зависимости (рис.14), коэффициент крутизны которых, в конечном итоге, будет зависеть от степени расхождения вязкости эталонной и измеряемых жидкостей. Для повышения эффективности исследований и надежности полученных результатов проведено планирование эксперимента.

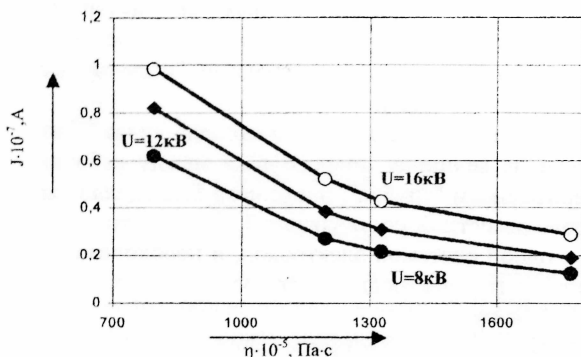


Рис. 13 Статическая характеристика ЭГД ПВ

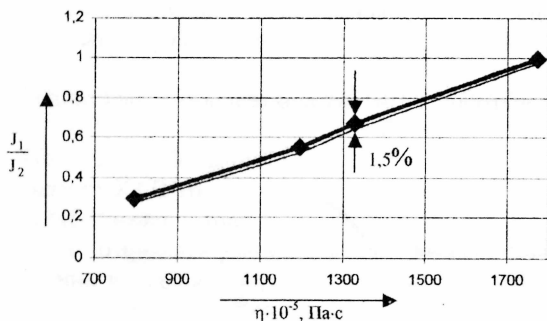


Рис. 14 Зависимость отношения токов от изменения вязкости

Контрольные замеры величин вязкости проводились с помощью капиллярного вискозиметра ВПЖ-4 (паспорт №349). Токи на выходе преобразователя измерялись микроамперметром М95 класса 1,5 с нижним пределом 0,01 мкА.

Идентификация передаточной функции ЭГД ПВ как элемента системы управления проводилась экспериментальным путем по двум переходным функциям методами последовательного логарифмирования и методом Орманса.

Рассчитана передаточная функция $W(p)=k/(Tp+1)$:

$$W(p) = \frac{0,94}{0,4185p + 1} \quad (9)$$

При использовании ЭГД ПВ как элемента обратной связи в СУ он является инерционным звеном первого порядка с постоянной времени $T=0,4185\text{с}$.

По результатам теоретических и экспериментальных исследований разработан и изготовлен ЭГД ПВ с оптимальными параметрами. Стати-

стические расчеты показали, что при вероятности 0,95 доверительный интервал составляет $0,22 \cdot 10^{-7} \text{ А}$.

В пятой главе синтезирована САК за приготовлением чернил каплеструйного маркиратора "Этикетка-3М", представлена методика инженерного расчета с учетом экспериментальных данных. Эта методика позволяет получить необходимые режимные параметры преобразователя вязкости при заданных конструктивных размерах, или наоборот, зная требования к характеристикам измеряемой жидкости, можно определить конструктивные параметры ЭГД ПВ.

Автоматический контроль вязкости в системе приготовления чернил каплеструйного маркиратора осуществляется на базе ЭГД ПВ в локальном контуре, выделенном из силового контура подачи чернил к печатающей головке. На основе рассогласований подается токовый сигнал в блок управления гидросистемой (БУГС) маркиратора. В случае если вязкость чернил в норме, то не каких действий с клапаном и насосом БУГС не производит. Передаточная функция дискретной системы:

$$W(z) = \frac{3,024 \cdot 10^{-3} \cdot z}{z - e^{-185,9}} \cdot \frac{4,355 \cdot 10^{-2} \cdot z}{z - e^{-76,88}} \cdot \frac{2,022 \cdot z}{z - e^{-5,9}} \cdot \frac{1,634 \cdot z^2 - 3,616 \cdot z}{(z-1)^2} \quad (10)$$

Проверка устойчивости локальной системы регулирования с учетом ЭВМ выполнена на основании критерия устойчивости Шур - Кона, который позволяет анализировать устойчивость дискретных и дискретно-непрерывных систем. С учетом желаемых показателей система получена передаточная функция корректирующего устройства, реализованного программным способом в БУГС:

$$W_{\text{КУ}}(z) = \frac{7,951 \cdot z^4 + 15,3 \cdot z^3 + 3,8 \cdot z^2 - 7,282 \cdot z - 3,735}{1,07 \cdot z^4 + 4,13 \cdot z^3 + 5,997 \cdot z^2 + 4,13 \cdot z - 1,94} \quad (11)$$

Соответствующее разностное уравнение в реальном масштабе времени имеет вид:

$$U_k(t) = -0,55 \cdot \tilde{U}_{k-1} - 2,13 \cdot \tilde{U}_{k-2} - 3,1 \cdot \tilde{U}_{k-3} + 2,13 \cdot \tilde{U}_{k-4} - 15,4 \cdot U_{k-1} - 29,7 \cdot U_{k-2} - 7,4 \cdot U_{k-3} + 14,3 \cdot U_{k-4} + 7,246 \cdot U_{k-5} \quad (12)$$

ЭГД ПВ в САРВ может быть использован для поддержания постоянства вязкости топлив в тепловых двигателях. Применение не традиционно, но по экспертным оценкам позволит улучшить процессы сгорания топлива и приведет, в конечном итоге к 15 % экономии топлива. ЭГД ПВ в медицине приведет к возможности стабилизировать параметры физиологических растворов, в том числе и донорской крови при проведении длительных операций. По литературным данным это снизит риск при проведении операций с нежелательным исходом с 7÷12 % до 3÷7 %. ЭГД ПВ в пищевой промышленности снизит расход дорогостоящих ингредиентов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Новые системы контроля за приготовлением чернил определяют ассортимент унифицированных рабочих сред каплеструйных маркеров при заданных технологических ограничениях. Электрогидродинамический преобразователь вязкости позволяет выдержать в заданных величинах целый набор эксплуатационных показателей.

2. Существующие преобразователи вязкости не удовлетворяют всем требованиям, предъявляемым к приборам данного класса, как элементам систем автоматического управления, поэтому перспективной является разработка электрогидродинамического преобразователя вязкости, принцип действия которого основан на взаимодействии механических сил, возникающих в сильных электрических полях с соизмеримыми с ними гидродинамическими силами, обеспечивающего достаточно высокое быстродействие, низкий порог чувствительности и простоту эксплуатации.

3. Для конструктивной реализации электрогидродинамического преобразователя вязкости для жидких диэлектриков рекомендуется использование системы электродов "игла-трубка" для оказания воздействия на слои жидкости с одновременным вносом в нее заряда и второй системы электродов, собственно снимающих этот заряд в функции от вязкости жидкости.

4. Построенная математическая модель ЭГД ПВ на основе уравнений электрогидродинамики устанавливает связь между напряженностью электростатических полей, скоростью движения жидкости и токами на выходе преобразователя вязкости, при этом получена математическая модель электростатического поля, создаваемое электродами "игла-трубка". Проведен анализ поведения электростатического поля по направлению движения жидкости, сделан вывод о необходимых геометрических соотношениях между диаметром генераторного электрода-трубки и его длиной для нормального функционирования ЭГД ПВ. Разработанная математическая модель позволяет рассчитывать статическую характеристику электрогидродинамического преобразователя вязкости.

5. Проведенные экспериментальные исследования показали, что электрогидродинамический преобразователь вязкости наиболее эффективен для слабопроводящих диэлектрических жидкостях в широком диапазоне вязкостей, обеспечивая коэффициент крутизны статической характеристики 0,94. Постоянная времени составляет 0,418с, а относительная погрешность ЭГД ПВ $\pm 0,95\%$.

6. Разработанная методика инженерного расчета ЭГД ПВ позволяет определить статическую характеристику с точностью не ниже 10%, а применение логометрической схемы измерения с эталонной жидкостью увеличивает диапазон измерения вязкости и повышает чувствительность. Система автоматического контроля за приготовлением вязкости капле-

руйного маркиратора с ЭГД ПВ в качестве элемента обратной связи, обладает сравнительно лучшими показателями быстродействия и качества.

7. Разработанный электрогидродинамический преобразователь вязкости жидких диэлектриков в качестве элемента обратной связи рекомендован к внедрению ОАО "Турбормонт - ВКК", внесен в реестр внедряемых научных работ МАН ВЭ, внедрен в учебный процесс по специальности 210100 УИГ БИТТУ в учебных курсах "ЭУСУ" и "РЭУ СУ".

Основные результаты диссертации изложены в следующих 13 печатных работах (из общего количества 15 публикаций).

1. Токарев А.Н. Электрогидродинамический измеритель вязкости. //Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: Межвуз. науч. сб. –Саратов, 2004.-С.150-156.

2. Токарев А.Н., Власов В.В. Экспериментальное определение динамических свойств электрогидродинамического преобразователя вязкости //Динамика технологических систем: Сб. трудов 7-й Междунар. науч.-техн. конф. -Саратов, 2004.-С.341-346.

3. Токарев А.Н., Власов В.В. Анализ гидродинамики ЭГД - вискозиметра//Векторная энергетика в технических, биологических и социальных системах: Сб. докл. 6-й Всерос. науч. конф. -Саратов, 2003. -С.65-71

4. Токарев А.Н., Власов В.В К вопросу стабилизации режимных параметров потока при измерении вязкости капиллярным методом// Балаковский институт бизнеса и управления. -Балаково, 2004.-8с. (Деп. в ВИНТИ 14.01.05 №34-В-2005).

5. Токарев А.Н., Власов В.В. ЭГД – вискозиметр//Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей: Сб. докл. 6-й Междунар. науч. конф.- СПб., 2003.- С.266-271.

6. Токарев А.Н., Власов В.В. Анализ электростатики генераторной системы электродов электрогидродинамического преобразователя вязкости// Балаковский институт бизнеса и управления. -Балаково, 2004.-14с. (Деп. в ВИНТИ 14.01.05 № 32-В-2005).

7. Токарев А.Н., Власов А.В. Электрогидродинамический вискозиметр в электрогидравлических усилителях мощности//Векторная энергетика в технических, биологических и социальных системах: Сб. докл. 4-й Всерос. науч. конф. –М., 2001.-С.105-110.

8. Токарев А.Н. Экспериментальные исследования статической характеристики ЭГД – вискозиметра//Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: Межвуз. науч. сб. –Саратов, 2005.-С.176-182

Власов В.В., Токарев А.Н. Классификация измерителей вязкости жидких сред // Сарат. гос. техн. ун-т.- Саратов, 1998 - 33с. (Деп. в ВИНТИ 19.05.98, № 1512-В98).

10.Власов В.В., Токарев А.Н Применение статических электрофлюидных преобразователей для измерения вязкости жидких нефтепродуктов

//Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей: Сб. докл. 5-й Междунар. науч. конф.-СПб., 2000. -С.241-242.

11.Токарев А.Н., Власов А.В. Результаты экспериментальных исследований ЭГД-вискозиметра //Векторная энергетика в технических, биологических и социальных системах: Сб. докл. 5-й Всерос. науч. конф. – Саратов, 2002.-С.131-137.

12.Токарев А.Н., Власов В.В. Результаты экспериментальных исследований статической характеристики ЭГД - вискозиметра с изменяемой геометрией проточной части //Балаковский институт бизнеса и управления. -Балаково, 2004 -8с. (Деп. в ВИНТИ 14.01.05 № 33-В-2005).

13.Власов В.В., Виштак О.В., Токарев А.Н. Применение ЭГД метода для непрерывного измерения вязкости жидких нефтепродуктов//Предмет, объекты и проблемы энергетики векторного взаимодействия потоков в системах с распределенными параметрами: Сб. докл. 1-й Всерос. конф. –М., 1997. -С.38-39.