

Ф. Р. Исмагилов, Р. К. Фаттахов, Т. А. Волкова

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЭНЕРГИИ В КАЧЕСТВЕ ПЕРЕМЕШИВАТЕЛЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ

Рассматривается возможность применения электростатического преобразователя в качестве перемешивателя диэлектрических жидкостей, исследуется влияние электрического поля на свойства жидкости и на качество перемешивания различных жидкостей, анализируется зависимость глубины проникновения электрического поля в различные диэлектрические жидкости от величины приложенного напряжения. *Электростатический преобразователь; перемешиватель; диэлектрические жидкости; механизм поляризации; бесконтактное перемешивание*

ВВЕДЕНИЕ

Перемешивание – важнейший процесс, применяемый в химической, фармацевтической и пищевой промышленности. Именно поэтому к качеству перемешивания предъявляются высокие требования, одним из которых является чистота полученного продукта. Создание устройства для перемешивания жидких агрессивных диэлектрических сред, способного обеспечить чистоту перемешивания, является актуальной задачей.

В настоящее время в практике перемешивания жидкостей используется целый ряд методов: механический, пневматический, магнитный, ультразвуковой, вибрационный и пульсационный, которые в равной степени могут быть применены для перемешивания в зависимости от объемов перемешиваемых жидкостей, их свойств и технологических задач самого перемешивания, таких как: увеличение скорости течения химической реакции, ускорение процессов нагревания и охлаждения, обеспечение стабильности температуры по всему объему жидкости, обеспечение равномерного распределения жидкости в жидкости или твердых частиц в жидкости. Наиболее распространенными устройствами для перемешивания являются механические мешалки с вращательным движением перемешивающих частей. К ним относятся лопастные, боковые и пропеллерные мешалки, а также блендеры, миксеры и мешалки с центробежными насосами. Каждый из перечисленных типов перемешивающих устройств имеет свои специфические недостатки и определенную область применения. Лопастные мешалки самые простые по устройству и, соответственно, самые дешевые, но они плохо перемешивают вязкие жидкости и не обеспечивают выравнива-

ние концентрации вещества или температуры по высоте аппарата. Вибрационные мешалки представляют собой диски с отверстиями, которые совершают возвратно-поступательное движение, тем самым достигается интенсивное перемешивание. Однако они подходят только для маловязких сред. Пропеллерные и турбинные мешалки предназначены для перемешивания больших объемов сырья, нефтепродуктов и нефтехимических жидкостей. Их недостатками являются большие габариты и большое потребление мощности.

Интересен и способ перемешивания с помощью индуктивного преобразователя, принцип действия которого основан на вращении металлических шариков, погруженных в сосуд с жидкой средой. Вследствие действия на них электромагнитных сил, шарики приводятся в движение, ухватывая за собой молекулы жидкости, таким образом осуществляя перемешивание.

Известно и пневматическое перемешивание, которое осуществляется методом барботирования и заключается в следующем. С помощью трубок с отверстиями, расположенных на дне перемешивателя, через всю массу обрабатываемой жидкости пропускается воздух, который и приводит смешиваемые вещества в движение. Использование пневматического перемешивания приводит к относительно большим расходам энергии, а также к окислению и испарению продукта.

Общим недостатком для всех перечисленных выше устройств является невозможность бесконтактной работы. Под действием свойств агрессивной жидкой среды рабочая часть перемешивателя, погруженная в эту среду, либо выделяет ионы, что загрязняет жидкость и влияет на чистоту процесса перемешивания, либо подвергается коррозии и, следовательно, быстро выходит из строя.

Цели работы:

- создать и исследовать устройство для перемешивания жидких агрессивных диэлектрических сред, имеющего возможность бесконтактной работы;
- выделить свойства жидкости, влияющие на работу преобразователя, и определить это влияние;
- получить картину распределения электрического поля внутри преобразователя с различными диэлектрическими жидкостями в качестве его подвижного элемента;
- получить математическую модель движения жидкости под действием приложенного электрического поля и определить среднюю скорость жидкости в некоторой точке.

Электростатический преобразователь с жидкостным ротором [1] удовлетворяет требованию бесконтактного перемешивания, к тому же обладает простой конструкцией и представляет собой устройство, которое содержит диэлектрический подвижный элемент, металлические электроды, подключенные к источнику питания, а также дополнительный нагревательный элемент. На электроды подается напряжение от высоковольтного источника напряжения переменного или постоянного тока. В результате в рабочем пространстве емкостного двигателя возникает вращающееся электрическое поле, под действием которого возникает индуцированный дипольный электрический момент в жидком диэлектрике, заставляющий двигаться молекулы жидкости в определенном направлении. Его упрощенная схема предлагается на рис. 1.

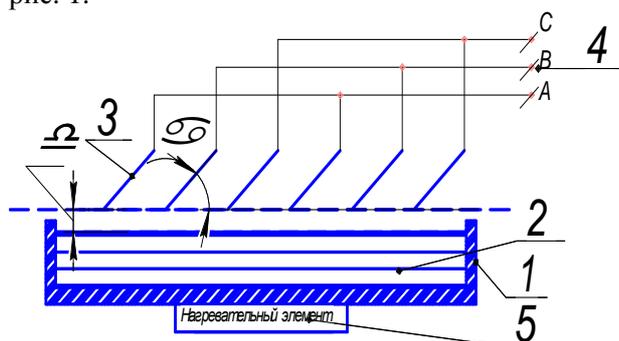


Рис. 1. Электростатический преобразователь энергии с жидкостным ротором: α – угол наклона электродов относительно поверхности жидкости; δ – воздушный зазор; 1 – стеклянный сосуд; 2 – подвижный элемент – трансформаторное масло; 3 – электроды; 4 – источник питания высоковольтного напряжения любого рода тока; 5 – нагревательный элемент

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВОЙСТВ ЖИДКОСТИ НА РАБОТУ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

На работу преобразователя оказывают существенное влияние свойства диэлектрической жидкости, такие как вязкость, электрическая плотность, диэлектрическая проницаемость, механизм поляризации и электрическая проводимость диэлектриков.

К диэлектрическим жидкостям относятся жидкости, величина электрической плотности которых составляет 250–350 кВ/см, а удельное сопротивление не превышает 10^{-12} Ом·см. Это, например, нефтяные, силиконовые масла, органические растворители: бензол, бензин, керосин, четыреххлористый углерод, толуол, ксилол, синтетические соединения и дистиллированная вода [2].

Величина диэлектрической проницаемости вещества ϵ характеризует его диэлектрические свойства, т. е. реакцию вещества на воздействие электрического поля. Диэлектрическая проницаемость существенно зависит от электрической плотности среды и от внешних условий, таких как температура, давление и т. д. Вследствие зависимости диэлектрической проницаемости жидкости от ее плотности, пондеромоторные силы, возникающие в диэлектрике под влияния поля, сводятся к давлению в перпендикулярном полю направлению. Электрострикционные силы вызывают изменение гидростатического давления и плотности диэлектрика. Если несжимаемая жидкость находится в равновесном состоянии, то электрострикционные силы уравновешиваются силами гидростатического давления [3].

Вязкость – это свойство жидкости оказывать сопротивление перемещению одной ее части относительно другой. Вязкость жидкости зависит от химической структуры молекул. Коэффициент вязкости определяется по формуле [4]:

$$\mu = 0,30967\rho V\lambda,$$

где ρ – плотность, V – среднее значение скорости движения молекул, установленное на основании закона Максвелла о распределении скоростей, λ – длина свободного пробега молекул.

Зависимости силы вязкости от относительной скорости частиц и расстояния между ними выражается следующей формулой:

$$\tau = \mu \frac{\partial V}{\partial n}.$$

Одним из важнейших параметров диэлектрика является механизм его поляризации. Рассмотрим отдельно работу электростатического

преобразователя с двумя различными диэлектрическими жидкостями, имеющими различные значения диэлектрической проницаемости, вязкости и обладающими разными механизмами поляризации, а именно – с трансформаторным и касторовым маслами. Для начала рассмотрим электростатический преобразователь, подвижным элементом которого является трансформаторное масло, теплопроводность которого при 20–90 °С составляет 0,0015–0,0021 Вт/(см·К), теплоемкость $1,8 \div 2,4 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К).

Как известно, трансформаторное масло является неполярным диэлектриком, для которого свойственен электронный механизм поляризации. Вектор поляризации диэлектрика P пропорционален напряженности внешнего электрического поля E и поляризуемости диэлектрика χ . Последняя величина является константой для неполярных диэлектриков [5]

$$P = \varepsilon_0 \chi E.$$

Величина поляризованности идентична электрическому дипольному моменту единицы объема диэлектрической жидкости

$$\vec{T} = |\vec{\mu}| \cdot |\vec{E}| \cdot \sin \Theta = [\vec{\mu} \cdot \vec{E}],$$

где T – вращающий момент, μ – диполь. Этот момент стремится повернуть диполь в направлении поля.

Между диэлектрической проницаемостью и поляризуемостью молекул существует определенное соотношение, описываемое уравнением Клаузиуса-Мосотти:

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = \frac{4}{3} \pi n \alpha = P_{уд},$$

где $P_{уд}$ – удельная поляризация; n – число молекул в единице объема жидкости; α – их электронная поляризуемость, ε – диэлектрическая проницаемость жидкости.

Для трансформаторного масла величину поляризации можно во внимание не принимать. Экспериментально доказано, что в интервале температур +20–100 °С поляризация трансформаторного масла не происходит [6]. Однако если трансформаторное масло нагреть до температуры 100–400 °С, то механизм поляризации будет играть важнейшую роль во всех происходящих процессах. Вследствие поляризации, которая вызывается смещением зарядов и поворотом диполей, возникают диэлектрические потери, тангенс угла которых:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{(\varepsilon_c - \varepsilon_0) \omega \tau}{\varepsilon_c + \varepsilon_0 (\omega \tau)^2}.$$

Величина локального поля (поля Лоренца), действующего на молекулу в неполярной жидкости [6]:

$$E_l = E_m + \frac{4}{3} \pi P.$$

В неполярных жидкостях величина ε составляет 2–3 единицы и локальное поле несколько больше среднего.

Отличие от трансформаторного масла полярное касторовое масло обладает ориентационным или дипольным механизмом поляризации. Это замедленный тип поляризации, который выражается в частичном упорядочении ориентаций молекул-диполей при приложении внешнего электрического поля, причем на фоне продолжения их хаотического теплового движения. Величина поляризованности возрастает по экспоненте и приближается к максимуму, а при исчезновении внешнего поля также по экспоненте уменьшается до нуля, причем в показателе экспоненты входит так называемое время релаксации τ , за которое поляризованность уменьшается в ε раз

$$P(t) = P_{\max} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}),$$

$$P(t) = P_{\max} e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Для сравнения в табл. 1 приведены основные учитываемые характеристики исследуемых масел.

Таблица 1

Сравнительные характеристики масел

Физические свойства	Касторовое масло	Трансформаторное масло
Механизм поляризации	Ориентационный	Электронный
Кинематическая вязкость, м ² /с	110·10 ⁻⁶	9·10 ⁻⁶
Динамическая вязкость, Па·с	0,0053	0,02
Диэлектрическая постоянная	4–4,5	2,2

ПОЛУЧЕНИЕ КАРТИНЫ ПОЛЯ

На рис. 2 приведена картина распределения поля в трансформаторном и касторовом маслах при различных приложенных напряжениях. Распределение поля было получено с помощью прикладного программного пакета Comsol Multiphysics, который является интерактивной средой для моделирования задач, основанных на дифференциальных уравнениях в частных про-

изводных, и рассчитывает электрическое поле методом конечных элементов Галеркена [5]. Электроды поочередно подключены к положительному и отрицательному полюсам источника постоянного тока (слева направо, соответственно). Белые пятна на рисунке показывают более высокое напряжение (более 2 кВ по модулю), такой диапазон изменения напряженности электрического поля (от минус 2 кВ/м до плюс 2 кВ/м) был выбран для наглядности изображения. По рисунку видно, что электрическое поле слабее проникает в касторовое масло, обладающее более высокой величиной диэлектрической проницаемости.

На рис. 3 показаны графики зависимости глубины проникновения электрического поля в касторовое и трансформаторное масла от величины приложенного напряжения.

Таким образом, чем выше величина диэлектрической проницаемости, тем слабее поле, действующее внутри жидкости, следовательно, меньше скорость движения молекул жидкости. Это известный факт, однако, с увеличением приложенного напряжения, картина распределения поля в разных жидкостях различна, а именно различна глубина проникновения напряженности поля в жидкость. Для вычисления диэлектрической проницаемости смеси неполярных жидкостей можно пользоваться формулой:

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = \frac{4}{3} \sum_{i=1}^{i=l} n_i \alpha_{si}.$$

Пусть электрическое поле со временем изменяется по закону

$$E(t) = E_m \sin \omega t,$$

тогда удельная поляризация смеси:

$$P(t) = \frac{\varepsilon_0 - 1}{4\pi} E_m \sin \omega t + \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_0}{4\pi} E_m \int_{-\infty}^t \sin \omega t_i e^{-\frac{t-t_i}{\tau}} dt_i,$$

$$P(t) = \frac{\varepsilon_0 - 1}{4\pi} E_m \sin \omega t + \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_0}{4\pi} E_m \times \\ \times \frac{1}{1 + (\omega\tau)^2} (\sin \omega t - \omega\tau \cos \omega t),$$

$$P(t) = P_m \sin \omega t = \frac{\varepsilon_c - 1}{4\pi} E(t).$$

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ЖИДКОСТНЫМ РОТОРОМ

Итак, зная поведение жидкости под воздействием электрического поля, можно составить математическую модель электростатического

преобразователя с жидкостным ротором. Принимаем следующие допущения:

- течение жидкости – ламинарное;
- жидкость не сжимается;
- не учитываются поверхностные и краевые эффекты.

В жидкости взаимодействие частиц характеризуется напряжениями, т.е. силами, отнесенными к единице площади соприкосновения частиц:

$$p_n = \lim \frac{\Delta P}{\Delta \sigma_n},$$

где p_n – вектор напряжения на площадке $\Delta \sigma_n$ с нормалью n .

Уравнение движения:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (V\Delta)V = -\frac{1}{\rho} \text{grad} p + \nu \Delta^2 V + \\ + \left(\frac{\eta}{\rho} + \frac{\nu}{3}\right) \text{grad} \text{div} V,$$

где $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ – кинематическая вязкость; μ – динамическая сдвиговая вязкость; η – динамическая объемная вязкость.

Дифференциальные уравнения движения среды в цилиндрических координатах в компонентах напряжений:

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\phi}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \phi} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_\phi^2}{r} = \\ = F_r + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial p_{r\phi}}{r \partial \phi} + \frac{\partial p_{rz}}{\partial z} + \frac{p_{rr} - p_{\phi\phi}}{r} \right), \\ \frac{\partial v_\phi}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\phi}{\partial r} + \frac{v_\phi}{r} \frac{\partial v_\phi}{\partial \phi} + v_z \frac{\partial v_\phi}{\partial z} + \frac{v_r v_\phi}{r} = \\ = F_\phi + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p_{\phi r}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial p_{\phi\phi}}{\partial \phi} + \frac{\partial p_{\phi z}}{\partial z} + \frac{2p_{r\phi}}{r} \right), \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\phi}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \phi} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = \\ = F_z + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p_{zr}}{\partial r} + \frac{\partial p_{z\phi}}{r \partial \phi} + \frac{\partial p_{zz}}{\partial z} + \frac{p_{rz}}{r} \right).$$

Уравнение неразрывности, которое связывает изменение плотности исследуемой жидкости и изменение скорости ее движения:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho V) = 0.$$

Уравнение несжимаемости:

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\phi}{\partial \phi} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0.$$

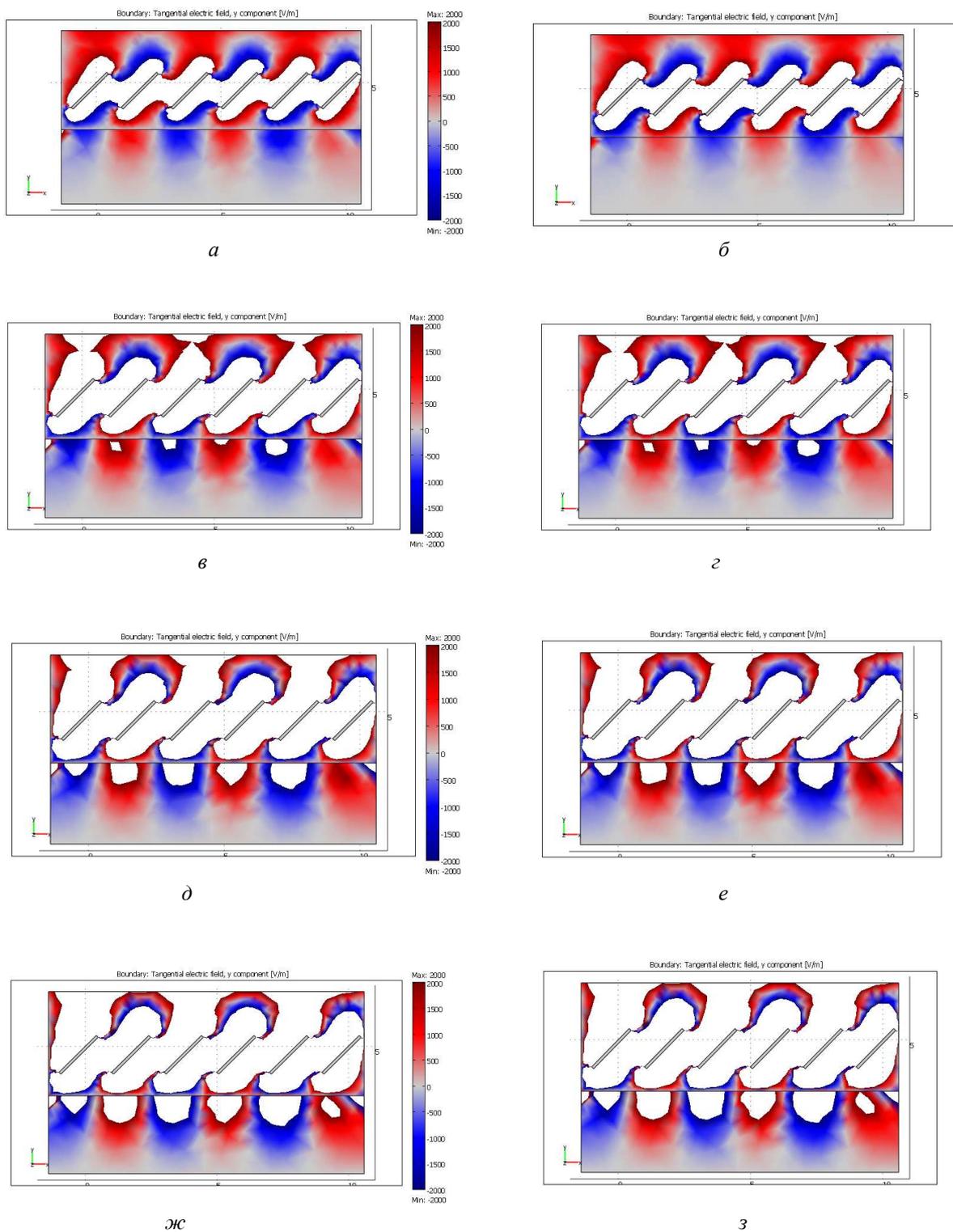


Рис. 2. Распределение напряженности электрического поля в: *a* – трансформаторном масле при $U = 5$ кВ; *б* – касторовом масле при $U = 5$ кВ; *в* – трансформаторном масле при $U = 10$ кВ; *г* – касторовом масле при $U = 10$ кВ; *д* – трансформаторном масле при $U = 15$ кВ; *е* – касторовом масле при $U = 15$ кВ; *ж* – трансформаторном масле при $U = 20$ кВ; *з* – касторовом масле при $U = 20$ кВ

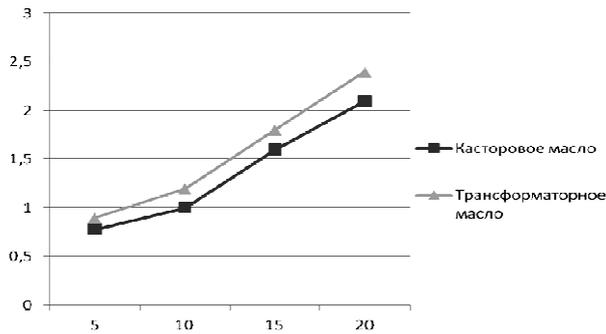


Рис. 3. Зависимость глубины проникновения электрического поля от величины приложенного напряжения в касторовом и трансформаторном маслах

Обобщенная гипотеза Ньютона для несжимаемой вязкой жидкости в цилиндрических ординатах:

$$p_{rr} = -p + 2\mu \frac{\partial v_r}{\partial r}, \quad p_{\phi\phi} = -p + 2\mu \left(\frac{v_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\phi}{\partial \phi} \right),$$

$$p_{zz} = -p + 2\mu \frac{\partial v_z}{\partial z}, \quad p_{r\phi} = \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \phi} + \frac{\partial v_\phi}{\partial r} - \frac{v_\phi}{r} \right),$$

$$p_{\phi z} = \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \phi} + \frac{\partial v_\phi}{\partial z} \right), \quad p_{rz} = \mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right).$$

Дифференциальные уравнения движения вязкой и несжимаемой жидкости, представленные через составляющие вектора скорости в цилиндрических координатах:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\phi}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \phi} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_\phi^2}{r} = \\ & = F_r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left(\Delta v_r - \frac{v_r}{r^2} - \frac{2\partial v_\phi}{r^2 \partial \phi} \right), \\ & \frac{\partial v_\phi}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\phi}{\partial r} + \frac{v_\phi}{r} \frac{\partial v_\phi}{\partial \phi} + v_z \frac{\partial v_\phi}{\partial z} + \frac{v_\phi v_r}{r} = \\ & = F_\phi - \frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \phi} + \nu \left(\Delta v_\phi - \frac{v_\phi}{r^2} + \frac{2\partial v_r}{r^2 \partial \phi} \right), \\ & \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\phi}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \phi} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = \\ & = F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \Delta v_z. \end{aligned}$$

где оператор Лапласа:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

По теореме Гельмгольца движение частицы несжимаемой жидкости может быть составлено из двух движений:

- поступательного движения, совпадающего с движением центра частицы;
- вращательного движения вокруг мгновенной оси, проходящей через центр частицы, с угловой скоростью, равной вихрю вектора скорости центра.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Движение частицы, центр инерции которой в момент времени t расположен в элементе объема $\delta\omega$, характеризуется скоростью V его центра тяжести и угловой скоростью вращения Ω [7].

Угловая скорость вращения элемента объема жидкости равна

$$\Omega = \frac{1}{2} \text{rot} V_f.$$

Средняя скорость вращения жидкости в точке M :

$$[\Omega_f] = \frac{1}{\delta\omega} \iiint_{\delta\omega} \frac{1}{2} \text{rot} V_f d\omega,$$

где $\delta\omega = (1-c)\delta\omega$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Чистота перемешивания двух диэлектрических жидкостей под действием электрического поля в электростатическом преобразователе с жидкостным ротором обеспечивается благодаря возможности его бесконтактной работы. Однако при исследовании работы преобразователя необходимо учитывать свойства перемешиваемых жидкостей, которые влияют на скорость движения молекул жидкостей. Определив зависимости глубины проникновения поля в жидкость от значения приложенного напряжения и влияние указанных выше свойств жидкости, можно установить наилучшие параметры преобразователя. Имея математическое описание работы преобразователя, можно определить скорость движения молекул жидкостей, а следовательно, и скорость перемешивания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емкостный двигатель – перемешиватель / Ф.Р. Исмагилов [и др.]. Заявка на патент на изобретение РФ № 2010133361. От 09.08.2010 г. Решение о выдаче патента от 30.01.2012 г.
2. Губкин А. Н. Физика диэлектриков. М.–Л.: Энергия, Т. 1. 1971. 288 с.

3. Теория диэлектриков / Н. П. Богородицкий [и др.]. М.–Л.: Энергия, 1965. 344 с.

4. **Бэтчелор Дж.** Введение в динамику жидкости. М.: Мир, 1973. 778 с.

5. **Ошовский В. В., Охрименко Д. И., Сысов А. Ю.** Использование компьютерных систем конечно-элементного анализа для моделирования гидродинамических процессов. Донецк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2010. В. 15 (163). С. 163–173.

6. **Исмагилов Ф. Р., Максудов Д. В.** Разрядные процессы в диэлектриках в электрических и магнитных полях. М.: Машиностроение, 2010. 180 с.

7. **Липштейн Р. А., Шахнович М. И.** Трансформаторное масло. М.: Энергия, 1968. 352 с.

ОБ АВТОРАХ

Исмагилов Флюр Рашитович, проф., зав. каф. электромеханики, проректор УГАТУ. Дипл. инж.-элетромех. (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по элементам и устройствам управления (УГАТУ, 1998). Иссл. в обл. электромеханических преобразователей энергии.

Фаттахов Рамиль Касымович, доц. той же каф. Дипл. горный инженер-электрик (УНИ, 1988). Канд. техн. наук по элементам и устройствам вычислительной техники и систем управления (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. электростатических электромеханических преобразователей энергии.

Волкова Татьяна Александровна, асп. той же каф. Дипл. магистр техники и технологий (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. электростатических электромеханических преобразователей энергии.