

токов согласно формулам (2.4), (2.5) и (3.3) работы [2] следующей конфигурации токов:

$$j_x = -\frac{H}{1+H^2} \left( \varphi_0 - 1 + \frac{M^2}{M^2-1} \sin(\beta x) \right),$$

$$j_y = \frac{1}{1+H^2} \left( \varphi_0 - 1 + \frac{M^2}{M^2-1} \sin(\beta x) \right).$$

Поступило 13 VII 1971

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ватажин А. Б. Джоулевы потери в канале переменного сечения, обусловленные сжимаемостью газа. ПМТФ, 1968, № 4.
2. Корсун А. Г., Лёвин А. Л. Влияние формы электродов на распределение тока в магнитогидродинамическом канале. Изв. АН СССР, МЖГ, 1970, № 6.

УДК 621.315:536.2

### ЭЛЕКТРОКОНВЕКЦИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ В ПЕРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

В. В. ПУЯТ

(Пуя)

Рассматривается образование объемных зарядов в диэлектрических жидкостях при переменном электрическом поле с учетом зависимости электрической проводимости среды от температуры. Приводятся результаты экспериментальных исследований электроконвекции между плоскопараллельными электродами в переменном электрическом поле.

В экспериментальных исследованиях теплоотдачи в диэлектрических жидкостях от нагретой тонкой проволоки при больших напряжениях переменного электрического поля [1] установлено сильное увеличение коэффициента теплоотдачи. Полученные экспериментальные результаты, особенно в неполярных жидкостях, не удается объяснить воздействием электрострикционных сил. В некоторых случаях возникают эффекты переноса тепла в переменном электрическом поле намного превышающие значения, которые можно ожидать из-за изменений зависимости диэлектрической постоянной  $\epsilon$  от температуры.

Расчеты показали, что, учитывая зависимость электрической проводимости  $\sigma$  от температуры, в жидких технических диэлектриках с временем релаксации  $\epsilon_0 \epsilon / \sigma = 2$  сек уже при времени, которое соизмеримо с полупериодом промышленной частоты переменного поля, можно ожидать возникновения свободных объемных зарядов. В начальный момент времени после включения напряжения объемные заряды расположены так, что они способствуют возникновению электроконвекции.

При изменении параметров по гармоническому закону уравнение непрерывности заряда можно представить так:

$$j \epsilon_0 \epsilon \omega \rho^* + \sigma \nabla \cdot \mathbf{E}^* + \mathbf{E}^* \nabla \sigma = 0 \quad (1)$$

Здесь  $\mathbf{E}^*$  и  $\rho^*$  — комплексные амплитуды напряженности электрического поля и свободных объемных зарядов,  $\omega$  — круговая частота.

Учитывая, что  $\nabla \cdot (\epsilon_0 \epsilon \mathbf{E}^*) = \rho^*$  при постоянном  $\epsilon$  согласно (1) можно получить, что

$$\rho^* = -\frac{\epsilon_0 \epsilon \mathbf{E}^* \nabla \sigma}{j \epsilon_0 \epsilon \omega + \sigma} \quad (2)$$

Так как  $\rho^* = \rho_0 e^{i\omega t}$ , где  $\rho_0$  — модуль, и принимая, что  $E^* = E_0$  (считаем величину  $E_0$  вещественной), согласно (2) находим

$$\rho_0 = \epsilon_0 \epsilon \nabla \sigma E_0 (\sigma^2 + \epsilon_0^2 \epsilon^2 \omega^2)^{-1/2} \quad (3)$$

а угол сдвига по фазе

$$\text{tg } \varphi = -\epsilon_0 \epsilon \sigma^{-1} \quad (4)$$

После подстановки (2) — (4) в выражение  $\rho = \text{Re} (\rho^* e^{i\omega t})$  получаем

$$\rho = -\frac{\epsilon_0^2 \epsilon^2 \nabla \sigma E_0}{\sigma^2 + \epsilon_0^2 \epsilon^2 \omega^2} \left( \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon} \cos \omega t + \omega \sin \omega t \right) \quad (5)$$

Отсутствие механического равновесия в замкнутой системе электроизолирующей жидкости при наложении электрического поля возможно только при неравномерном распределении свободных объемных зарядов, так как только в этом случае существует ротор от объемной силы  $\text{rot} (\rho E) = E \times \nabla \rho$ . Из физических соображений следует, что в случае, когда неоднородность по электрической проводимости возникает из-за наличия тепловых потоков от электродов, т. е. когда векторы  $E$  и  $\nabla \rho$  коллинеарны, для возникновения неустойчивости необходимо, но не достаточно существование областей, где  $E \cdot \nabla \rho < 0$ . При  $E \cdot \nabla \rho > 0$  свободные объемные заряды расположены так, что они оказывают тормозящее воздействие на перемещение жидкости.

В установившемся режиме при переменном электрическом поле, когда длительность периода  $T \ll L/v$ , где  $L$  — линейный размер,  $v$  — скорость жидкости при перемешивании, для анализа возможности возникновения неустойчивости необходимо знать среднее значение величины  $E \cdot \nabla \rho$  за период колебаний. Согласно уравнению (5) в одномерном случае, если существует линейная зависимость электрической проводимости  $\sigma = \sigma_0 + \alpha x$  и если электрическое поле, вызванное свободными объемными зарядами, не велико по сравнению с внешним полем, среднее значение  $E \cdot \nabla \rho$  определяется так:

$$\frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} E_0 \cos(\omega t) \frac{\partial \rho}{\partial x} dt = \frac{1}{2} \alpha^2 \epsilon_0 \epsilon E^2 \frac{\sigma^2 - \epsilon_0^2 \epsilon^2 \omega^2}{(\sigma^2 + \epsilon_0^2 \epsilon^2 \omega^2)^2} \quad (6)$$

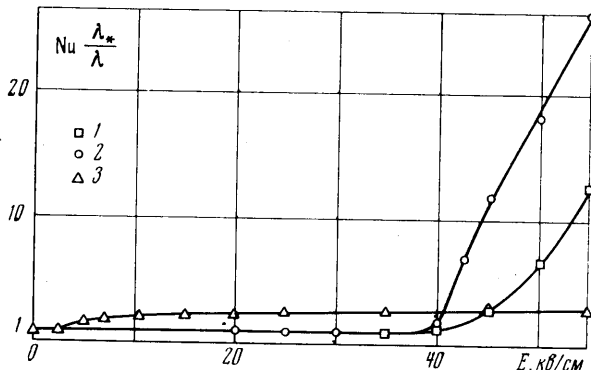
В этом приближении  $E \cdot \nabla \rho < 0$ , и тем самым неустойчивость, вызванная электрическим полем, возможна только при условии  $\sigma < \epsilon_0 \epsilon \omega$ , т. е. система может быть неустойчива при относительно высоких частотах и низких электрических проводимостях.

Для наглядного объяснения возможности возникновения электроконвекции при переменном электрическом поле рассмотрим возникновение объемных зарядов, когда  $\alpha > 0$ ,  $\sigma \ll \epsilon_0 \epsilon \omega$  и более холодный электрод имеет нулевой потенциал. В этом случае  $\varphi = \pi$ , и при подаче отрицательного напряжения согласно (5) образуются отрицательные свободные объемные заряды в основном у горячего (отрицательного) электрода. Появляется сила, которая при возникновении неустойчивости способствует перемещению более нагретой жидкости в область, где температура ниже. При подаче напряжений противоположной полярности, в основном из-за увеличения подвижности ионов с повышением температуры, возникают положительные объемные заряды в первую очередь в областях жидкости, где температура и, следовательно, подвижность ионов выше. Положительные носители зарядов компенсируют отрицательные, и в этом переходном процессе появляется объемная сила противоположного направления, среднее значение которой меньше. Так как положительные заряды образуются в первую очередь у горячего электрода, в среднем за полупериод на более горячую жидкость действует объемная сила, которая перемещает ее в направлении уменьшения температуры. Таким образом, в данных условиях на более горячую жидкость действует в среднем сила, стремящаяся перемещать ее в области, где температура ниже.

При анализе эффектов электроконвекции нужно учесть, что с повышением частоты и уменьшением электрической проводимости согласно (3) уменьшаются абсолютные значения объемных зарядов и тем самым уменьшаются силы, способствующие перемешиванию. Значения объемных зарядов увеличиваются с повышением напряженности электрического поля и разности электрической проводимости, которая зависит от перепада температуры.

Экспериментальные исследования электроконвекции при переменном электрическом поле промышленной частоты проводились на экспериментальной установке,

описанной в работе [2], которая состоит из плоскопараллельных медных электродов. Верхний электрод нагревается, нижний электрод охлаждается. Измерение теплового потока проводилось в центре электродов при помощи измерений перепада температуры в слое жидкости. Эффективность перемешивания определялась изменением теплового потока  $q$  и оценивалась соотношением  $\lambda_*/\lambda$ , где  $\lambda_* = ql / (t_1 - t_2)$  — относительный коэффициент теплопроводности. Проводились также визуальные наблюдения.



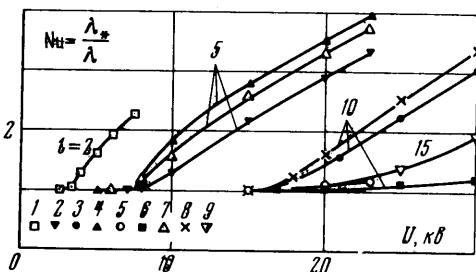
Фиг. 1

Оказалось, что в некоторых случаях при больших напряженностях переменного электрического поля можно достичь значительных эффектов перемешивания жидкостей. Это объясняется воздействием переменного электрического поля на свободные объемные заряды. На фиг. 1 представлены полученные экспериментальные значения числа Нуссельта в техническом трансформаторном масле при переменном и постоянном электрическом полях и расстоянии между электродами  $l = 2$  мм. Точки 1, 2 получены в экспериментах с переменным полем (средняя температура 65 и 75° С соответственно), точки 3 — в экспериментах с постоянным полем (средняя температура 78° С). Перемешивание масла начинается при напряженности переменного электрического поля  $E \approx 40$  кв/см. Эффекты перемешивания сильно увеличиваются с увеличением температуры. Это может быть вызвано увеличением электрической проводимости.

При высоких напряженностях электрического поля  $E > 40$  кв/см перемешивание при переменном напряжении намного сильнее перемешивания в постоянном поле. Это объясняется тем, что в рассмотренном выше механизме электроконвекции, когда носители зарядов образуются в основном в объеме жидкости и свободные объемные заряды определяются электрической проводимостью, при постоянном электрическом поле из-за термической неоднородности ионы располагаются так, что оказывают тормозящее воздействие на перемещение более холодной жидкости. Это воздействие увеличивается с увеличением напряженности поля. Однако при постоянном электрическом поле образуются носители зарядов в контакте жидкости с электродами, и это приводит к возникновению электроконвекции.

В опытах с трансформаторным маслом при переменном электрическом поле так же, как и при постоянном, в течение нескольких часов наблюдалось уменьшение числа Нуссельта  $Nu$  в зависимости от времени непосредственно после включения напряжения.

В касторовом масле, обладающем высокой электрической проводимостью, электроконвекция возникает уже при напряженности электрического поля  $E \approx 15$  кв/см. Зависимости числа  $Nu$  от разности потенциалов электродов  $U$  при различных расстояниях между электродами  $l$  (в мм) показаны на фиг. 2. Точки 1—9 отвечают опытам, в которых величина  $t_1 = 90, 90, 80, 90, 50, 43, 90, 80$  и  $90^\circ$  С, а величина  $t_2 = 49, 59, 50, 30, 20, 15, 31, 20$  и  $18^\circ$  С соответственно.



Фиг. 2

но. Подсчет средних значений движущих сил в линейных приближениях согласно (6) показывает, что при  $E = 15$  кв/см в касторовом масле возникают силы, сравнимые

по величине с гравитационными подъемными силами, которые имеют противоположное направление. Полученные экспериментальные результаты по перемешиванию не удается объяснить пондеромоторными силами, которые, как показали расчеты, невелики по величине.

Экспериментальные исследования с касторовым маслом проводились при различных температурах и различных расстояниях между электродами — от 2 до 15 мм. Полученные значения  $Nu_*$  повторимы. В течение нескольких часов непосредственно после наложения поля эффекты перемешивания не изменяются.

В работе [3] в случае совместного взаимодействия гравитационных и электростриктивных сил авторы предполагают, что число Нуссельта в электрическом поле  $Nu_* = f(GrPr) + g(EPr)$ , где  $EI$  — число Сенфлебена, и экспериментальные результаты обработаны согласно критериальному уравнению, где  $\Delta Nu = g(EIPr)$ . Здесь используется известная зависимость  $Nu = 0.105 (GrPr)^{0.3}$  [4] и предполагается, что  $\Delta Nu = Nu_* + Nu = f(R_*)$ , где критерий  $R_*$  является эквивалентным числом Рэлея  $R = (\rho_1 - \rho_2) g l^3 c_p / \lambda \nu$ . Если согласно (3)  $(\rho_1 - \rho_2) g l$  заменить на  $\epsilon_0 \epsilon E^2 (\sigma_1 - \sigma_2) (\bar{\sigma}^2 + \epsilon_0^2 \epsilon^2 \omega^2)^{-1/2}$ , получим, что

$$R_* = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2 (\sigma_1 - \sigma_2) l^2 c_p}{\sqrt{\bar{\sigma}^2 + \epsilon_0^2 \epsilon^2 \omega^2} \lambda \nu}$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  — электрические проводимости масла, соответствующие температуре электродов.

На фиг. 3 приведены зависимости чисел  $\Delta Nu$  от  $R_*$  на базе экспериментальных результатов, представленных на фиг. 2. При вычислениях  $R_*$  пользовались экспериментально полученными зависимостями электрической проводимости  $\sigma$  от температуры при постоянном электрическом поле.

Критериальная обработка экспериментальных результатов указывает, что эффекты электроконвекции в основном вызваны свободными объемными зарядами.

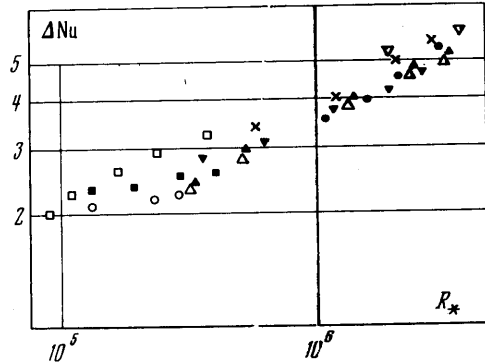
Электроконвективные явления в случае изолированных электродов можно объяснить рассмотренным выше механизмом возникновения зарядов при переменном электрическом поле.

Автор благодарит И. М. Кирко за ценные указания и обсуждение результатов.

Поступило 25 II 1971

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Семенов К. Н., Болога М. К. Теплоотдача при свободной конвекции диэлектрической жидкости в неоднородном электрическом поле. Электронная обработка материалов, 1967, № 6.
2. Пуятс В. О гидродинамической неустойчивости диэлектрических жидкостей в электрическом поле. Изв. АН ЛатвССР, Сер. физ.-техн. н., 1969, № 2.
3. Ahsmann G., Kronig R. Influence of electric fields on convection heat transfer in liquids. J. Appl. Sci. Res., 1950, Ser. A, vol. 2, No. 3, pp. 235—244.
4. Исаченко В. А., Осипова В. П., Сукомел А. С. Теплопередача. М., «Энергия», 1965.



Фиг. 3