

О ТЕЧЕНИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ

Д. В. Еремченко

(Москва)

Исследована природа сил действующих на жидкий диэлектрик в электрическом поле при наличии температурного градиента. Показано, что электрические силы, обусловленные неоднородностью электропроводности среды, могут вызвать гидродинамическое течение.

В ряде экспериментальных работ [1-5] изучалось поведение диэлектрической жидкости в электростатическом поле между горизонтально установленными плоскопараллельными электродами при наличии температурного градиента $\partial T / \partial z$ (ось z направлена вверх). Установлено, что независимо от полярности источников электрического поля в столбе жидкости между электродами наблюдается гидродинамическое течение сверху вниз. Общего мнения о физической природе наблюдаемого электрогидродинамического явления не существует. Попытки объяснить опытные данные движением заряженных частиц и неоднородностью диэлектрических свойств среды [4-6] не дали удовлетворительных результатов.

В данной работе рассмотрено влияние температурного градиента $k = \partial T / \partial z = \text{const} > 0$ ($\partial T / \partial x = \partial T / \partial y = 0$) на неоднородность напряженности электрического поля $E(z)$ и показано, что электрическая сила, обусловленная этой неоднородностью, по абсолютной величине и направлению согласуется с экспериментальными данными.

В области $k \neq 0$ электропроводность жидкого диэлектрика в небольшом интервале температур ($\sim 20^\circ \text{C}$) можно описать экспонентой [7]

$$(1) \quad \sigma = \sigma_0 \exp \{ \alpha (T - T_0) \} = \sigma_0 \exp \{ \alpha k z \}$$

где σ_0 — электропроводность при температуре T_0 , α — постоянная, характеризующая зависимость $\sigma(T)$ в заданном интервале температур. При установившихся пространственных токах в среде с неоднородной проводимостью появляются сторонние заряды [3-6], которые создают неоднородность электрического поля. Пользуясь уравнением непрерывности для стационарного тока

$$(2) \quad \text{div} \sigma E = 0$$

и выражением (1), можно найти

$$(3) \quad E(z) = E_0 \exp \{ -\alpha (T - T_0) \} = E_0 \exp \{ -\alpha k z \}$$

где E_0 — напряженность поля при T_0 . Без учета диэлектрической неоднородности $\partial \epsilon / \partial T$ плотность электрических сил, действующих на диэлектрическую среду принимает вид [8]

$$(4) \quad F = [(\epsilon - 1) / 8\pi] \nabla E^2$$

Подставляя в это выражение формулу (3), получим

$$(5) \quad F(z) = - [(\epsilon - 1) / 4\pi] \alpha k E_0^2 \exp \{ -2\alpha k z \}$$

Из (5) следует, что вычисленная сила F направлена в сторону понижения температуры, т. е. направление F соответствует направлению наблюдаемого гидродинамического течения. Вследствие сильной зависимости электропроводности жидких диэлектриков от температуры (для трансформаторного масла $\alpha \sim 0.06 \text{ град}^{-1}$) абсолютная величина F превышает силы, вызванные неоднородностью диэлектрических свойств [4].

Установить соответствие между величиной F и наблюдаемой в эксперименте интенсивностью течения жидкости трудно, так как в процессе гидродинамического движения, как правило, нарушаются условия стационарности температурного поля и электрического тока, используемые при выводе формулы (5). Представляется возможным сделать оценки, используя результаты работы [2]. Эксперимент поставлен следующим образом. За время $\tau_0 \sim 10 \text{ сек}$ нагревался верхний электрод. Затем включалось электрическое поле $E \sim 15 \text{ кВ/см}$ и через $\tau = L / v_* \ll L^2 / a$ фиксировалось появление нагретой жидкости у нижнего электрода. Здесь $L = 1 \text{ см}$ — расстояние между электродами, a — коэффициент температуропроводности исследуемой жидкости (трансформаторного масла). При указанных значениях параметров экспериментальное значение скорости $v_* \sim 10 \text{ см/сек}$.

При нагревании верхнего электрода в нагретом слое жидкости возникает температурный градиент $k \sim (T - T_0) / l$ ($T - T_0 \sim 20^\circ \text{C}$, $l \sim \sqrt{a\tau_0} \sim 0.1 \text{ см}$). Силу, действующую на столб жидкости между электродами в начале движения жидкости,

можно оценить величиной

$$(6) \quad \pi R^2 \int_0^l F(z) dz$$

где R — радиус электрода. Сила (6) приложена в области больших температур. В ненагретой части столба жидкости неоднородность поля не успевает устанавливаться вследствие того, что время релаксации $\epsilon / 4\pi\sigma \gg \tau \sim 0.1$ сек.

Во время движения границы горячей жидкости интегральная величина (6) меняется слабо, так как уменьшение градиента k компенсируется увеличением верхнего предела (области приложения сил). Следовательно, силу, действующую на столб жидкости, можно считать приближенно сохраняющейся.

Если допустить, что нагретая жидкость достигает нижнего электрода за счет течения под действием силы (6), то оценки с подстановкой численных значений параметров, использованных в работе [2], дают $v_* \sim 30$ см/сек. Этот результат по порядку величины согласуется с экспериментальным и показывает, что в указанных электрогидродинамических явлениях электрическая сила F , обусловленная неоднородностью электропроводности среды, может играть основную роль.

Поступила 9 II 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. *Остроумов Г. А.* Некоторые гидродинамические явления, сопровождающие прохождение тока через изолирующие жидкости. ЖЭТФ, 1956, т. 30, вып. 2.
2. *Байбулатов Ф. Х., Минин В. Ф., Смирнов А. В.* О теплообмене в диэлектрической жидкости. ПМТФ, 1972, № 1.
3. *Плауде К. К., Грислис В. Я., Пуятс В. В., Мейерс А. Э.* Теплообмен в непроводящих жидкостях в однородном электростатическом поле. Изв. АН ЛатвССР, Сер. физ. и техн. н., 1968, № 6.
4. *Пуятс В. В.* О гидродинамической неустойчивости диэлектрических жидкостей в электростатическом поле. Изв. АН ЛатвССР, Сер. физ. и техн. н., 1969, № 2.
5. *Остроумов Г. А.* К вопросу о гидродинамике электрических разрядов. Ж. техн. физ., 1954, т. 24, вып. 10.
6. *Gross M. J., Porter J. E.* Electrically induced convection in dielectric liquids. Nature, 1966, vol. 212, No. 5068.
7. *Сканави Г. И.* Физика диэлектриков. М.—Л., Гостехиздат, 1949.
8. *Тамм И. Е.* Основы теории электричества. М., «Наука», 1966.

УДК 620.178.7 : [669.14/.15 + 669.71]

О КОЛИЧЕСТВЕННОМ ОПИСАНИИ ОТКОЛЬНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Б. А. Тарасов

(Москва)

Экспериментальные данные по отколу в оргстекле и алюминии АМг-6, полученные при ударном нагружении образца, представляются в виде приближенной аналитической зависимости, связывающей степень повреждения с величиной приложенного напряжения в прямоугольном импульсе и временем его действия.

В твердом теле, подвергшемся кратковременному интенсивному нагружению ударом или взрывом, возникают растягивающие напряжения, приводящие к его разрушению. Наблюдаемая в опытах степень повреждения зависит от амплитуды и длительности приложенной нагрузки [1,2]. С уменьшением времени приложения нагрузки возрастает разница между значением напряжения, вызывающего образование локальных очагов разрушения, и напряжения, образующего откол.

В данной работе сталкивались пластины разной толщины из исследуемого материала и находились пороговые значения скорости удара, соответствующие двум ви-