

## ГИДРОЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В РАСТВОРАХ

*\*\*Государственный аграрный университет Молдовы,  
ул. Мирчеа, 44, г. Кишинев, MD-2049, Республика Молдова*

*\*Институт прикладной физики АНМ,  
ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова, [mbologa@phys.asm.md](mailto:mbologa@phys.asm.md)*

**Введение.** Интерес ученых к проблеме прямого использования энергии электрических и магнитных полей в различных отраслях народного хозяйства, в науке и технике в последние десятилетия значительно возрос. Успешно применяются магнитные и электрические воздействия на гомо- и гетерогенные среды в целях преобразования энергии [1, 2], управления биологическими [3] и физико-химическими процессами в различных электротехнологиях [4]. Для более эффективного использования электромагнитных полей в практических целях необходимо всесторонне и глубоко изучить процессы их взаимодействия с веществом. В этом отношении значительные успехи достигнуты в области физики твердого тела, а также в магнитной гидродинамике (МГД), изучающей взаимодействие внешних магнитных полей с проводящими жидкими средами (жидкими металлами, плазмой). В стадии эволюции находится другое направление – электрическая гидродинамика (ЭГД), предметом которой является исследование процессов, связанных с влиянием электрических полей на гидромеханическое состояние жидкостей и газов. Наибольшие успехи достигнуты в области жидких диэлектриков [2, 4–8].

Неотъемлемая часть магнито- и особенно электрогидродинамики – подобласть конвективных явлений, физическая суть которых состоит в самопроизвольном движении жидких сред под действием рассматриваемых полей. Магнитная конвекция наблюдается в так называемых ферромагнитных жидкостях [9], искусственно создаваемых в лабораторных условиях, суспензиях ферромагнитных порошков на основе несущих жидких диэлектриков (керосина, трансформаторного масла и других жидкостей).

Об актуальности феррогидродинамики [9] говорят такие ее возможные применения, как магнитные подвески, различного рода модуляторы, гироскопы, автоматические выключатели в электротехнике, медицинская диагностика, интенсификация теплообмена, преобразование энергии и др. [10].

Не меньший интерес представляют электроконвективные явления (электрическая конвекция). В частности, обсуждаются вопросы их применения для преобразования механической [2] и тепловой [11] энергий в электрическую. Создана теоретико-экспериментальная основа для использования электрических полей в целях интенсификации тепло- и массообменных процессов в жидкостях и газах [5].

Несомненное значение имеют исследования влияния электрических полей на жидкие среды и с научно-познавательной точки зрения, в частности для раскрытия физико-химических свойств жидкостей [12], в том числе применительно к гидрологическим явлениям [13]. Вместе с тем указанные области – МГД и ЭГД – это лишь отдельные предельные случаи электромагнитной гидродинамики (ЭМГД). В тени остается широкое поле исследований в области «промежуточных» по электрофизическим параметрам сред – полупроводниковых. Речь идет о водных растворах солей и электролитов [12, 13], суспензиях, получаемых на основе проводящих или полупроводящих твердых частиц [14], и т. д.

Слабо изучено совместное воздействие электрических и магнитных полей на механику жидкостей. Исследования в этих областях откроют новые перспективы в использовании гидроэлектромагнитных (ГЭМ) явлений, возникающих при указанном воздействии.

В данной работе преследуется цель кратко осветить некоторые вопросы совместного воздействия скрещенных электрических и магнитных полей на гидромеханику слабопроводящих жидкостей

(растворов) применительно к практическим приложениям электромагнитной конвекции и выяснению ее физического механизма.

**1. О перспективах применения скрещенных электрических и магнитных полей в гидромеханике и о некоторых аспектах гидроэлектромагнитных явлений.** Отдельные влияния скрещенных электрических и магнитных полей на гидродинамику растворов применительно к конвективному теплообмену рассмотрены авторами в [14]. В работе [15] предложены методы применения скрещенных полей для разделения носителей зарядов в плазме и получение электрической энергии. Предпринимаются также попытки использовать аналогичные методы для опреснения воды [16]. Большое внимание уделяется вопросам взаимодействия скрещенных электрических и магнитных полей с плазмой, в частности применительно к вопросам солнечно-земной физики [17].

Несмотря на сравнительно большое количество работ о влиянии скрещенных магнитных и электрических полей на различные процессы, многие аспекты данной проблемы либо совсем не изучены, либо слабо освещены в литературе. Прежде всего это относится к переменным во времени полям, а также к полям различной конфигурации. До конца не осмыслен физический механизм конвективных явлений, вызванных внешними скрещенными полями. Практически не изучены вопросы устойчивости равновесия и особенности конвекции в жидкостях при наличии таких полей. Кроме того, как известно, рассматриваются вопросы о влиянии электрических и магнитных полей, в том числе и скрещенных, на процессы кристаллизации. Однако до сих пор еще не ставился вопрос о роли возможных гидроэлектромагнитных явлений в этих процессах. То же самое относится к воздействию указанных полей на биологические объекты, поскольку ткани живых организмов содержат жидкость, представляющую собой по существу растворы различных веществ (с интересующей нас точки зрения важно, что эта жидкость может вступить в гидродинамическое взаимодействие с внешними полями). Учитывая некоторые общие структурные свойства плазмы и сильных растворов, заметим также, что изучение влияния электромагнитных полей на растворы может иметь значение и для некоторых вопросов физики плазмы.

Это и требующая своего решения уже упомянутая проблема опреснения воды, а также борьба с накипеобразованием, процессами разделения фаз и, наоборот, их перемешивания. В этих направлениях многообещающим представляется применение скрещенных электрических и магнитных полей. И снова возникает вопрос о влиянии гидроэлектромагнитных явлений на упомянутые процессы. Для изучения этих явлений необходима классификация причин их возникновения. Такая классификация станет возможной по мере изучения и раскрытия соответствующего физического механизма, основу которого составляют движущие силы гидроэлектромагнитной конвекции.

**2. Электромагнитные силы, действующие на жидкую (неметаллическую) среду.** Вопрос о силах, называемых также пондеромоторными, в гидромеханике жидкостей во внешних электромагнитных полях (ЭМП) является основным. При их вычислении, в принципе, можно было бы исходить из сил, действующих на отдельные частицы вещества, соответствующим образом просуммировав их. Сам же вопрос о движении отдельной частицы в электромагнитных полях весьма сложен и не решен для произвольного случая. В этой связи гораздо эффективнее является термодинамический подход при вычислении сил. Не в слишком быстропеременных ЭМП ( $\nu < 10^8$  Гц) общая сила, действующая на единицу объема жидкой среды, складывается из двух составляющих (в системе СИ) [18]: магнитной

$$\vec{f}_m = \vec{j} \times \vec{B} - \frac{1}{2} H^2 \nabla \mu + \frac{1}{2} \nabla \left[ H^2 \gamma \left( \frac{\partial \mu}{\partial \gamma} \right)_T \right] + (\epsilon_r \mu_r - 1) \frac{\partial}{\partial t} \left[ \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{c^2} \right] \quad (1)$$

и электрической

$$\vec{f}_e = \rho \vec{E} - \frac{1}{2} E^2 \nabla \epsilon + \frac{1}{2} \nabla \left[ E^2 \gamma \left( \frac{\partial \epsilon}{\partial \gamma} \right)_T \right], \quad (2)$$

где  $\epsilon$ ,  $\mu$ ,  $\epsilon_r, \mu_r$  – абсолютные и относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости соответственно,  $\gamma$  – плотность среды; остальные обозначения общеприняты. Результирующая сила определяется суммой (1) и (2):  $\vec{f} = \vec{f}_m + \vec{f}_e$ . При этом необходимо делать различие между электромагнитными полями как взаимопорождающимися, так и независимыми электрическим и магнитным, создаваемыми независимыми внешними источниками.

Под ЭМП будем подразумевать именно последний случай.

Первые слагаемые в (1) и (2) представляют собой силы, действующие на единицу объема с плотностью тока  $\vec{j}$  и плотностью заряда  $\rho$  со стороны магнитного и электрического полей соответственно. Вторые – силы, обусловленные неоднородностями сред по  $\mu$  и  $\epsilon$  соответственно (силы, действующие на «связанные» «магнитные» и электрические заряды). Третьи члены – это магнито- и электрострикционные силы; в конвективных явлениях в замкнутых областях прямой роли они не играют ввиду их потенциальности [5]. Последний член в (1) связан с тем, что при термодинамическом выводе первых трех учитывается и импульс самого поля. Для того чтобы получить силу, действующую «в чистом виде» только на вещество, необходимо вычесть силу, связанную с потоком импульса самого поля (сила Абрагаама). Отсюда и возникает указанное слагаемое, называемое обычно силой Абрагаама. Эта сила, как правило, мала, и ею обычно пренебрегают, однако в оценочных целях на первых порах ее сохраним. В дальнейшем в (1) и (2) можно пренебречь вторыми и третьими слагаемыми справа, ввиду того, что будем рассматривать, во-первых, немагнитные жидкости ( $\mu = \mu_0 = \text{const}$ ) и, во-вторых, изотермические условия, когда нет основания ожидать градиента по диэлектрической проницаемости. Таким образом, предстоит оценить роль отдельных составляющих в следующем выражении для силы

$$\vec{f} = \vec{j} \times \vec{B} + \rho \vec{E} + (\epsilon_r \mu_r - 1) \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\vec{E} \times \vec{H}}{c^2} \right). \quad (3)$$

Оценки показывают, что учет силы Абрагаама необходим при частотах внешнего поля  $\geq 10^5$  Гц и напряженностях внешних электрического и магнитного полей  $\sim 1$  кВ/см и  $H \cdot 10^2$  Э соответственно. В этой связи следует заметить, что эффекты, порождаемые силой Абрагаама, представляют физический интерес и подлежат изучению. Для растворов кулонова сила  $\rho E$ , казалось бы, не должна играть какую-либо существенную роль ввиду ограниченности возможных значений напряженности электрического поля сравнительно большой удельной проводимостью растворов (по сравнению с жидкими диэлектриками). Однако необходимо иметь в виду, что вследствие электроконцентрационных эффектов [19] большими могут оказаться плотности объемных зарядов  $\rho$ . Вообще же сила  $\rho \vec{E}$  косвенно может быть оценена по плотности тока проводимости  $\vec{j}_n = \sigma \vec{E}$  и подвижности ионов  $k$ , обуславливающих этот ток, по формуле

$$\rho \vec{E} \sim \vec{j} / k = (\sigma / k) \vec{E}. \quad (4)$$

Численные оценки свидетельствуют о том, что эта сила также может играть существенную роль в гидроэлектромагнитных явлениях.

Перейдем к обсуждению первого члена в формуле (3), в которой характерно то, что  $\vec{j}$  представляет собой плотность полного тока, в общем случае определяемую выражением [20]:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} + \rho \vec{V} + \frac{\partial(\epsilon \vec{E})}{\partial t} + D^- \nabla \rho^- - D^+ \nabla \rho^+ + \nabla \times (\vec{P} \times \vec{V}), \quad (5)$$

где  $D^\pm$  – коэффициенты диффузии носителей зарядов плотностями  $\rho^\pm$ ;  $\vec{V}$  – гидродинамическая скорость;  $\vec{P}$  – вектор поляризации среды. Первое слагаемое в (5) – это обычный омический ток, второе – конвективный ток, третье – ток смещения; следующие два члена – токи диффузии отрицательных и положительных ионов. Последнее слагаемое – это вихревой конвективный ток смещения [20].

Видно, что плотность тока в виде (5) в общем случае может породить шесть дополнительных «лоренцовых» сил, оценка которых связана, прежде всего, с оценкой отдельных слагаемых в (5) и представляет предмет дальнейших исследований; здесь важными могут оказаться все члены выражения (5), но в первую очередь, конечно, – ток сквозной проводимости, поскольку на пороге возникновения конвективных явлений вклад других токов, в частности конвективных, пренебрежимо мал. Имея в виду в дальнейших исследованиях случай переменных полей, должное внимание следует уделить и токам смещения, отношение которых к токам проводимости выглядит следующим образом:

$$j_{\text{см}} / j_{\text{пр}} \sim \tau / t_0 = \tau v, \quad (6)$$

где  $v = l/t_0$  – частота подаваемого напряжения,  $\tau = \epsilon/\sigma$  – время электрической релаксации. При частотах  $\geq 10^5$  Гц токи смещения могут внести существенную поправку в суммарный ток.

Авторы стремились в общих чертах охарактеризовать вопрос о силах, которые могут явиться причинами гидроэлектромагнитных явлений. Однако по своей физической сущности этот вопрос представляется почти неисчерпаемым. В переменных электрических и магнитных полях в физическую игру вступают факторы, которые могут иметь большое (если не решающее) значение в конвекции. Сюда следует отнести, во-первых, изменение диэлектрической проницаемости с частотой, во-вторых, структурные изменения типа «встряхивания ионных шуб» и связанные с этим явления резонансного характера.

Таким образом, в теоретическом плане предстоит рассмотрение целого комплекса сложных и интересных физических задач, решение которых прольет свет на пути успешного практического применения гидроэлектромагнитных явлений.

**3. Некоторые предварительные экспериментальные данные о конвекции, обусловленной скрещенными электрическим и магнитным полями.** Общепринято считать, что при силах тока порядка десятков миллиампер на квадратный сантиметр и напряженности магнитного поля порядка сотен эрстед вряд ли наблюдаемы какие-либо конвективные явления. И действительно, наложение постоянных во времени электрических и магнитных полей указанных параметров, как показали проведенные опыты, не выявляет гидродинамических эффектов. Переменные поля также не приводили к заметным эффектам.

В дальнейшем были проведены более тщательные эксперименты с расширением диапазона физических характеристик полей. Экспериментальная установка представляла собой ячейку (80x50x10) мм, заполненную раствором поваренной соли с добавками, визуализирующими движение жидкости. Использовалось переменное магнитное поле (вначале промышленной частоты), получаемое в зазоре лабораторного трансформатора мощностью 800 Вт. Направление постоянного электрического поля (тока) было перпендикулярным к магнитному. Установлено, что экстремальные значения токов (вплоть до электролиза) и напряжений также не вызывали какие-либо упорядоченные движения в жидкости.

Определенные физические соображения о движении заряженных частиц в переменных электрических и магнитных полях, подкрепленные теоретическими расчетами, привели нас к идее синхронизации полей, то есть совпадающих по фазе. С этой целью была специально собрана и экспериментально подобрана соответствующая электрическая схема. В результате зарегистрированы упорядоченные и весьма интенсивные гидродинамические потоки ячеистой структуры. Примечательными при этом являются два эффекта указанного движения: 1) стабильность движений при сколь угодно больших (до экстремальных) значениях напряженности полей и 2) резкое изменение направления движения жидкости с изменением направления электрического поля. Эти явления пока не находят четкого количественного объяснения. В известной литературе также не удалось обнаружить описания подобного рода эффектов.

Вместе с тем эффект 2) свидетельствует о том, что движущей силой электромагнитной конвекции является первое слагаемое (1):  $\vec{j} \times \vec{B} = \sigma \vec{E} \times \vec{B}$ . Первый эффект говорит о сильной устойчивости рассматриваемого течения, напоминающего в этом смысле куэттовское вращение жидкости между двумя соосными цилиндрами, вращающимися в одинаковом направлении при большей угловой скорости наружного цилиндра, чем внутреннего [21].

С практической точки зрения представляет интерес создание одномерных потоков (насосы), изучение влияния движения на тепло- и массоперенос. Не исключена возможность, что жидкость становится неньютоновой и полями «смываются» пограничные слои, это должно привести к значительному усилению переносных процессов. Важно также знание распределения объемной концентрации солей для выяснения роли гидроэлектромагнитных явлений в разделении фаз.

#### **Выводы**

1. Приведен краткий обзор литературных данных о взаимодействии электромагнитных полей с жидкостями.
2. Обсуждены физические аспекты гидроэлектромагнитных явлений и их движущие силы.
3. Приведены предварительные экспериментальные данные, проливающие свет на физические особенности гидроэлектромагнитных явлений, и их возможные приложения.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Магнито-гидродинамическое преобразование энергии. Открытый цикл / Под редакцией Б.Я. Шумяцкого и М.Петрика. М.: Наука, 1979.
2. Рубашов И.Б., Бортников Ю.С. Электрогазодинамика. М., 1971.

3. Чугаевский Ю.В., Федоренко Н.Е. Стресс и импульсная радиация // Стресс и адаптация. Кишинев: Штиинца, 1978.
4. Tănăsescu F., Bologa M., Cramariuc R. Electrotehnologii. Editura Academiei Române, București, 1999 (v.1), 2002 (v.2).
5. Болога М.К., Гросу Ф.П., Кожухарь И.А. Электроконвекция и теплообмен. Кишинев, 1977.
6. Остроумов Г.А. Взаимодействие электрических и гидродинамических полей, М.: Наука, 1979.
7. Стишков Ю.К., Остапенко А.А. Электродинамические течения в жидких диэлектриках. Л.: Изд. ЛГУ, 1989.
8. Zhakin A.I. Electrohydrodynamics. Kursk University Press, Kursk, 1996.
9. Фертман В.Е. Магнитные жидкости – естественная конвенция и теплообмен. Минск: Наука и техника, 1978.
10. Материалы 8-го рижского совещания по магнитной гидродинамике. Т. 1–3. Рига, 1975.
11. Гросу Ф.П., Болога М.К. Одномерные термоэлектродинамические течения. Магнитная гидродинамика, №1, 1974.
12. Шульман З.П. и др. Электрореологический эффект. Наука и техника, Минск, 1972.
13. Бондаренко Н.Ф., Гак Е.З. Электромагнитная гидрофизика и природные явления, Т.1,2. Спб., 1994, 1995.
14. Булум Э.Я. и др. Тепло- и массообмен в электромагнитном поле. Рига, 1967.
15. Зисман А.Б. Авт. св-во СССР, СО2 в Л/00, В03 С1/08 №36, 1981.
16. Слесаренко В.Н. Современные методы опреснения морских и соленых вод. М.: Энергия, 1973.
17. Акасофу С.М., Чепмен С. Солнечно-земная физика, Т. 2. 1975.
18. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1957.
19. Остроумов Г.А. Электрохимия. Т. 2. № 3. 1968.
20. Пановский В., Филипс М. Классическая электродинамика. М.: Физматгиз, 1963.
21. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986.

*Поступила 05.11.07*

### **Summary**

Macroscopic motion of weakly conducting liquids under mutual influence of hydrodynamic, electric, and magnetic fields is considered. Physical peculiarities and mechanisms of appearing hydroelectromagnetic convection as well as its applications are discussed.

---