

УДК 541.182.041

## Самоорганизация диссипативных структур в заряженных жидких диэлектриках

В.К. Семенов

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
г. Иваново, Российская Федерация

E-mail: npp@aes.ispu.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** В настоящее время явления самоорганизации, имеющие место при взаимодействии сильных электрических и гидродинамических полей, представляют большой теоретический и технологический интерес. Самоорганизация в заряженных жидкостях мало исследована. Полученные автором результаты в литературе неизвестны.

**Материалы и методы:** Результаты получены на основе экспериментальных исследований, проведенных при накачке на поверхность жидких диэлектриков и водно-масляных эмульсий ионного заряда, полученного в поле униполярного коронного разряда.

**Результаты:** Описаны явления самоорганизации различных диссипативных структур и предложен экстремальный принцип, позволяющий провести их иерархию.

**Выводы:** Предложенный экстремальный принцип позволяет провести иерархию возможных структур, которые могут использоваться в технологии смешения и очистки жидких диэлектриков.

**Ключевые слова:** сильные электрические поля, заряженные жидкие диэлектрики, диссипативные структуры, принцип минимума заряда и потребляемой мощности.

## Self-organization of dissipative structures in the charged liquid dielectrics

V.K. Semenov

Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

E-mail: npp@aes.ispu.ru

### Abstract

**Background:** Currently self-organization phenomena occurring during the interaction of strong electric and hydrodynamic fields are of great theoretical and technological interest. Self-organization in liquids charged a little research. The results obtained by the author in the literature are not known.

**Materials and methods:** Results are obtained on the basis of experimental studies conducted by pumping on the surface of dielectric liquids and water-in-oil emulsions ion charge, received in the field of unipolar corona discharge.

**Results:** Describes the phenomenon of self-organization of various dissipative structures and proposed extreme principle, which allows for a hierarchy.

**Conclusions:** The proposed extreme principle allows to carry out a hierarchy of possible structures that can be used in the technology of mixing and purification of liquid dielectrics.

**Key words:** strong electric fields, charged liquid dielectrics, dissipative structures, the principle of minimum of charge and power consumption.

Как известно, под самоорганизацией понимают спонтанное возникновение в статистических системах временных, пространственных и пространственно-временных упорядоченных структур. Необходимыми условиями их возникновения являются нелинейность, незамкнутость и неравновесность системы [1]. В связи с тем, что система не замкнута и для поддержания самоорганизации потребляет энергию, возникающие когерентные структуры часто называют диссипативными. Наличие нелинейности системы обуславливает существование в ней точек бифуркации (ветвления), поэтому самоорганизация всегда связана с переходом от одного устойчивого движения к другому.

Изучение кооперативных явлений и порождаемых ими диссипативных структур, обусловленных взаимодействием электрических и гидродинамических полей в заряженных жидкостях, представляет не только теоретический, но и технологический интерес [2].

В заряженной жидкости возможно равновесие, если градиент давления уравновешивается электрической силой:

$$\nabla p = \rho \vec{E}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность объемного заряда;  $E$  – напряженность электрического поля.

Взяв вихрь от этого уравнения, получим

$$\nabla \rho \times \vec{E} = 0, \quad (2)$$

так как  $\text{rot grad}(\rho) = 0$ . Это означает, что везде в жидкости градиент заряда параллелен вектору  $E$ , т.е.

$$\nabla \rho = -a(\vec{r})\vec{E}. \quad (3)$$

Знак минус взят из соображений удобства. Взяв еще раз вихрь от последнего уравнения, получим

$$\nabla a \times \vec{E} = 0. \quad (4)$$

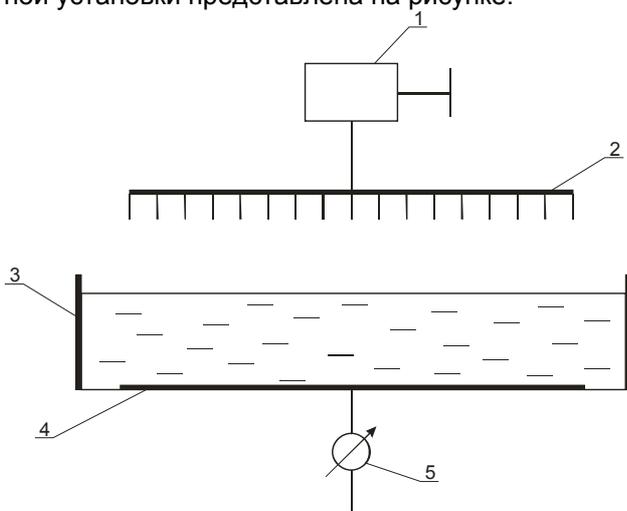
Из (4) следует, что  $a$  является функцией длины силовой линии. В частности, если поле одномерно  $E = f(z)$ , то и  $a$  зависит только от  $z$  координаты, т.е. в равновесии поверхность постоянного заряда должна совпадать с эквипотенциальной поверхностью. В частности, в случае слабо заряженного диэлектрика с резко неоднородным распределением заряда по объему и одномерным полем величина  $a$  будет постоянной:

$$\nabla \rho = -a\vec{E}. \quad (5)$$

Заметим, что полученное условие равновесия заряженной жидкости аналогично условию равновесия неравномерно нагретой жидкости в поле тяжести, где аналогом градиента заряда является градиент температуры. Из этого следует, что при  $\rho = 0$  жидкость всегда будет в равновесии. Если указанные условия будут нарушены, то в жидкости возникнет движение.

Исследованию поведения жидкостей в электрических полях посвящено большое количество работ. Однако все они основаны на одном и том же способе создания электрического поля – путем помещения электродов в жидкость [2]. При таком способе создания электрического поля внедрить в жидкость объемный заряд невозможно. Нами использован иной способ создания в жидкости сильного электрического поля – за счет «накачки» на свободную поверхность жидкости ионного заряда, полученного при коронном разряде над поверхностью жидкости.

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рисунке.



Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – источник высокого напряжения постоянного тока; 2 – коронирующий электрод; 3 – кюветка с жидкостью; 4 – заземленный электрод; 5 – микроамперметр

Емкость из органического стекла размера  $540 \times 540 \text{ мм}^2$  заполнялась трансформаторным маслом, толщина которого составляла несколько сантиметров и могла варьироваться. Заземленный плоский металлический электрод располагался на дне емкости, второй коронирующий электрод – над поверхностью диэлектрика, отделенного от него воздушным зазором. Величина зазора также могла варьироваться. В качестве высоковольтного источника использовался генератор постоянного тока с регулируемым напряжением до 200 кВ. Коронирующий электрод представлял собой металлический лист  $500 \times 500 \text{ мм}^2$ , на котором с шагом 200 мм располагалась система игл высотой 20 мм. В процессе экспериментов снимались вольт-амперные характеристики разрядного промежутка и визуально и при помощи катетометра определялись параметры возникающих диссипативных структур. В качестве жидкости использовалось как чистое трансформаторное масло, так и водомасляные эмульсии различной электропроводности, которые готовились при помощи электрической мешалки. Рассматриваемые ниже эксперименты в известной нам литературе не описаны и, по-видимому, наблюдаемые в них диссипативные структуры исследованы впервые.

Сначала исследовалось поведение обезвоженного трансформаторного масла. При включении источника высокого напряжения и инъекции через свободную поверхность жидкости ионного заряда при некотором начальном токе возникает движение. При этом весь объем диэлектрика разбивается на отдельные ячейки, аналогичные ячейкам Бенара, наблюдаемым при гравитационной конвекции. При виде сверху ячейки плотно покрывают поверхность жидкости и имеют характер шестигранных призм. Движение жидкости в каждой ячейке происходит независимо. Заряженная жидкость опускается по центру ячейки и, отдав заряд нижнему электроду, поднимается вверх по боковым граням поверхности призмы. С ростом тока движение из ламинарного превращается в турбулентное, а свободная поверхность жидкости искривляется. При дальнейшем росте напряжения и тока интенсивность движения возрастает и на поверхности жидкости образуются острые выступы высотой 10–20 мм, вытянутые в сторону верхнего коронирующего электрода. Эти выступы являются инициаторами факелов обратной короны, сопровождающейся весьма мощным выбросом жидкости в сторону коронирующего электрода. Это явление похоже на явление обратной короны, наблюдаемое в электрофильтрах, а также в устройствах по напылению полимерных покрытий в электрическом поле [3]. Если коронирующие иглы расположить с шагом, превышающим размер ячейки, то на поверхности жидкого диэлектрика дополнительно зарождаются конвективные валы, стремящиеся выровнять распределение заряда по поверхности жидкости.

Далее было выполнено исследование влияния электропроводности жидкости на характер возникающих в ней структур. Для этого были приготовлены однородные высокодисперсные эмульсии из трансформаторного масла и воды с различной концентрацией компонентов. При накачке на свободную поверхность эмульсии ионного заряда при низких концентрациях воды наблюдается ячеистая конвекция, но при концентрации воды 1 % и более наблюдается новый вид самоорганизации. Визуально сразу после включения высокого напряжения происходит расслоение однородной эмульсии, в результате которого между свободной поверхностью жидкости и заземленным электродом формируется сотовая система водяных проводящих каналов, по которым и происходит стекание заряда с поверхности. В зависимости от количества воды, каналы имеют диаметр 3–10 мм, а шаг расположения между ними примерно совпадает с шагом расположения коронирующих игл. При достижении концентрацией воды 15 % образование проводящих каналов прекращается и возникает новый вид самоорганизации – расслоение эмульсии на фазы в вертикальном направлении. При этом слой масла находится сверху, а слой воды – внизу. На поверхности образуются волны, сопровождающиеся электрофорезом отдельных капелек воды. В узлах волн толщина масляной пленки настолько мала, что ионный заряд легко стекает с ее поверхности. Таким образом, каждая структура имеет свою область существования, определяемую ионным током, который, согласно теории самоорганизации, играет роль управляющего параметра.

Зарождение и смена диссипативных структур происходит по следующему сценарию. Если электропроводность жидкости достаточно высока (время стекания заряда меньше времени его имплантации), то заряд на ее поверхности не накапливается и никаких структур вообще не возникает – жидкость находится в равновесии. В двухфазной полупроводящей жидкости, представляющей собой водомасляную эмульсию, рождается структура – сотовая система водяных проводящих каналов, по которой происходит стекание заряда. Область существования этой структуры ограничена сверху и снизу значением электропроводности жидкости.

В плохо проводящих жидкостях при небольших токах инжекции зарождается ячеистая электроконвекция, которая с ростом тока из ламинарной становится турбулентной. При дальнейшем росте тока конвекция не справляется с переносом заряда, в результате чего на поверхности жидкости образуются острые выступы, вытянутые в сторону коронирующего электрода. Эти выступы являются инициаторами обратного факельного разряда с поверхности жидкости на коронирующий электрод.

Таким образом, с ростом тока одна диссипативная структура сменяет другую. Анализ по-

казывает, что в заданных условиях при определенном значении тока инжекции реализуется та структура, которой отвечает минимальное значение заряда на поверхности, а стало быть, и минимальное значение напряженности поля. Поскольку ток инжекции задан, то минимуму заряда отвечает минимум мощности, потребляемой для поддержания установившейся диссипативной структуры. Обобщая, можно сформулировать следующий принцип. В заданных условиях после прохождения системой точки бифуркации происходит самоорганизация той структуры, которая для удаления заряда с поверхности жидкости обеспечивает минимум потребляемой мощности. Связывая действие этого принципа с иерархией неустойчивостей в синергетической системе, можно утверждать, что принципу минимума потребляемой мощности при заданном значении тока инжекции удовлетворяет наиболее устойчивая структура. Следует заметить, что принцип минимума потребляемой мощности структурой, обеспечивающей стекание с поверхности жидкости заряда, аналогичен принципу минимума мощности, впервые сформулированному Штеенбеком и Энгелем в физике газового разряда. Этот принцип, говоря современным языком, был использован для объяснения различных процессов самоорганизации в газовом разряде (зарождение страт в тлеющем разряде, расслоение разряда вблизи катода на большое число регулярно расположенных областей, контракция тока дуги, лавино-стримерный переход и пр.). Поскольку существование указанных принципов, а также и других известных термодинамических экстремальных принципов [4] должно находить строгое теоретическое обоснование при исследовании устойчивости систем, может показаться, что их роль не велика. Но это далеко не так. Действительно, если при исследовании устойчивости равновесия системы возникает только одно малое критическое возмущение, которое первым перестает затухать, то зарождающаяся структура будет им и определяться. Если критических возмущений много (а их может быть и бесчисленное множество), то из всех этих движений, конечно, должна зародиться какая-то определенная структура, но какая именно предсказать нельзя. Именно поэтому полной количественной теории даже хорошо изученной гравитационной конвекции, позволяющей предсказать геометрию ячеек Бенара, в настоящее время не существует. Применение предлагаемого принципа на практике позволяет сделать выбор между возможными структурами и провести их иерархию.

#### Список литературы

1. **Хакен Г.** Синергетика: Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. – М.: Мир, 1985.
2. **Остроумов Г.А.** Взаимодействие электрических и гидродинамических полей. – М.: Наука, 1979.

**3. Высоковольтные** электротехнологии / О.А. Анашин, А.А. Белогловский, И.П. Верещагин и др. – М.: МЭИ, 2000.

**4. Циглер Г.** Экстремальные принципы термодинамики необратимых процессов и механики сплошной среды. – М.: Мир, 1966.

#### References

1. Khaken, G. *Sinergetika: Ierarkhiya neustoychivostey v samoorganizuyushchikhsya sistemakh i ustroystvakh* [Synergetics: The hierarchy of instabilities in self-organizing systems and devices]. Moscow, Mir, 1985.

2. Ostroumov, G.A. *Vzaimodeystvie elektricheskikh i gidrodinamicheskikh poley* [The interaction of electric and hydrodynamic fields]. Moscow, Nauka, 1979.

3. Anashin, O.A., Beloglovskiy, A.A., Vereshchagin, I.P. *Vysokovol'tnye elektrotekhnologii* [High-voltage electrical technology]. Moscow, MEI, 2000.

4. Tsigler, G. *Ekstremal'nye printsipy termodinamiki neobratimyykh protsessov i mekhaniki sploshnoy sredy* [Extreme principles of thermodynamics of irreversible processes and continuum mechanics]. Moscow, Mir, 1966.

Семенов Владимир Константинович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

доктор технических наук, профессор кафедры атомных электростанций,

e-mail: npp@aes.ispu.ru