

УДК 517.958:57  
PACS 87.16.A-

## Электрогидродинамическая неустойчивость смеси бензола и хлорбензола в неоднородном переменном электрическом поле

А.И. Мизев<sup>1\*</sup>, А.В. Шмыров<sup>1</sup>, Р. И. Федосеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

<sup>2</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

\* email: alex\_mizev@icmm.ru

В статье представлены результаты экспериментального исследования поведения смеси бензола и хлорбензола, находящейся под воздействием сильно неоднородного переменного электрического поля. Неоднородность поля определяется формой электродов, один из которых плоский, а второй представляет собой остриё, ориентированное перпендикулярно к плоскости первого электрода. Частота изменения поля составляет 50 Гц. Экспериментальные наблюдения показали, что при постепенном увеличении разности потенциалов между электродами движение жидкости возбуждается пороговым образом. Течение представляет собой узкую интенсивную струю, направленную от острого электрода в сторону плоскости. Возвратное течение является осесимметричным. Показано, что пороговая разность потенциалов и интенсивность конвективного движения существенно зависят от состава смеси.

**Ключевые слова:** электрогидродинамическая неустойчивость; слабопроводящая жидкость

*Поступила в редакцию 09.02.22; после рецензии 28.02.22; принята к опубликованию 02.03.22*

## Electrohydrodynamic instability of a mixture of benzene and chlorobenzene in an inhomogeneous alternating electric field

A. I. Mizev<sup>1\*</sup>, A. V. Shmyrov<sup>1</sup>, R. I. Fedoseev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Continuous Media Mechanics UrB RAS, Perm, Russia

<sup>2</sup> Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

\* email: alex\_mizev@icmm.ru

The results of an experimental study of the behavior of a mixture of benzene and chlorobenzene under the influence of a highly inhomogeneous alternating electric field are presented in the paper. The inhomogeneity of the field is set by tip-plane geometry of the electrodes. The frequency of the alternating electric field is 50 Hz. Experimental observations have shown that with a gradual increase in the potential difference between the electrodes, the fluid motion is excited in a threshold manner. The flow is a narrow intense jet directed from the tip electrode towards the plane one. The return flow is axisymmetric. It is shown that the threshold potential difference and the intensity of convective motion significantly depend on the composition of the mixture.

**Keywords:** electrohydrodynamic instability; weakly conducting liquid

*Received 09.02.22; revised 28.02.22; accepted 02.03.22*

doi: 10.17072/1994-3598-2022-1-58-65

## 1. Введение

Одной из актуальных задач, возникающих при добыче и переработке нефти, является удаление примесного содержания воды, содержащейся в добываемой нефти в виде эмульсии [1]. Для разделения водонефтяных эмульсий используются различные технологии, основанные на воздействии силовых полей: гравитационных, инерционных, акустических, электрических [2, 3]. На сегодняшний день наиболее эффективными считаются методы, основанные на использовании электрического поля [4–8]. Первая конструкция электродегидратора была предложена более ста лет назад [9]. Однако в целом необходимо отметить, что в настоящее время технологии с использованием электрических полей еще недостаточно эффективны, в основном, вследствие слабой исследованности многих фундаментальных аспектов данных процессов. В связи с этим изучение особенностей поведения водомасляных эмульсий в электрическом поле является важным и актуальным направлением исследований.

Поскольку нефть является слабопроводящей средой, то в ней в электрическом поле могут формироваться электрогидродинамические (ЭГД) течения, механизм образования которых может быть различным [10–11]. Возникающие ЭГД-течения, как правило, препятствуют сближению и коалесценции капель воды, что отрицательно сказывается на эффективности процесса разделения. На сегодняшний день ЭГД течения достаточно хорошо изучены в постоянных, как однородных, так и неоднородных, электрических полях. Формирование ЭГД течения, как правило, связывают с образованием нескомпенсированного заряда в объеме жидкости за счет диссоциации части молекул в сильных электрических полях или на поверхности электрода за счет инжекционного механизма [12–14]. Исследований ЭГД явлений в переменных полях намного меньше, поскольку считается, что механизмы зарядообразования в такой ситуации быстро ослабевают с ростом частоты. В то же время в современных электродегидраторах нередко используются именно переменные поля большой интенсивности, что обуславливает актуальность изучения механизмов ЭГД неустойчивости в таких системах в целях повышения эффективности технологического разделения эмульсий.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования условий возникновения и структуры ЭГД-течения, возникающего в переменном неоднородном электрическом поле в смеси бензола и хлорбензола.

## 2. Экспериментальная установка и методики измерений

Эксперименты были проведены в прямоугольной кювете (рис. 1), сформированной плоскими

стеклянными пластинами, между которыми расположена фторопластовая рамка толщиной 1 см, размеры которой задают размер внутренней полости – ширина 8 см и высота 10 см. Части кюветы склеены при помощи химически стойкого фторсиликонового герметика. На дне кюветы расположен плоский электрод размерами 8×1 см из нержавеющей стали толщиной 0.1 см. Второй электрод, стержень из нержавеющей стали толщиной 0,15 см, заводится в полость через отверстие в центре верхней границы полости. Радиус кривизны на конце стержня – 0.03 см. Вертикальное положение стержня может меняться, что позволяет варьировать расстояние между электродами. Электроды подсоединены к вторичной обмотке высоковольтного трансформатора, первичная обмотка которого питается от ЛАТР. Максимальное напряжение, подаваемое с вторичной обмотки на электроды, составляло около 7.5 кВ. В качестве исследуемой жидкой среды использована смесь бензола и хлорбензола, смешивающихся между собой в любых соотношениях и формирующих истинный раствор. Использование переменного поля с частотой 50 Гц позволяет работать в так называемом электростатическом пределе, т.е. когда период изменения поля  $\tau_E = 2 \cdot 10^{-2}$  с значительно меньше характерного времени релаксации заряда в жидкой среде, составляющего  $\tau_M \sim 5$  с для хлорбензола и  $\tau_M \sim 5 \cdot 10^3$  с для бензола.

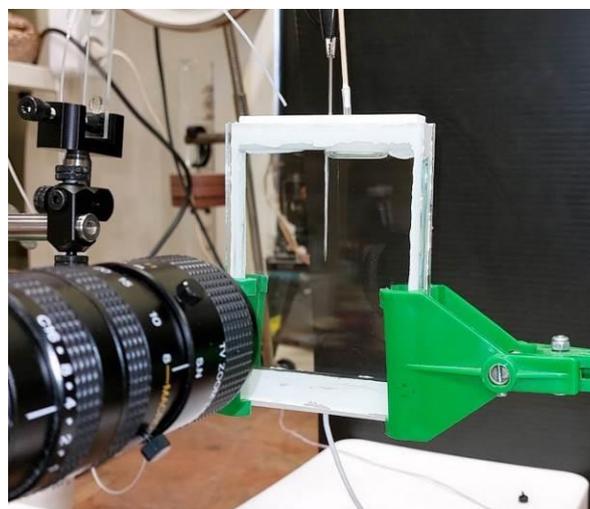
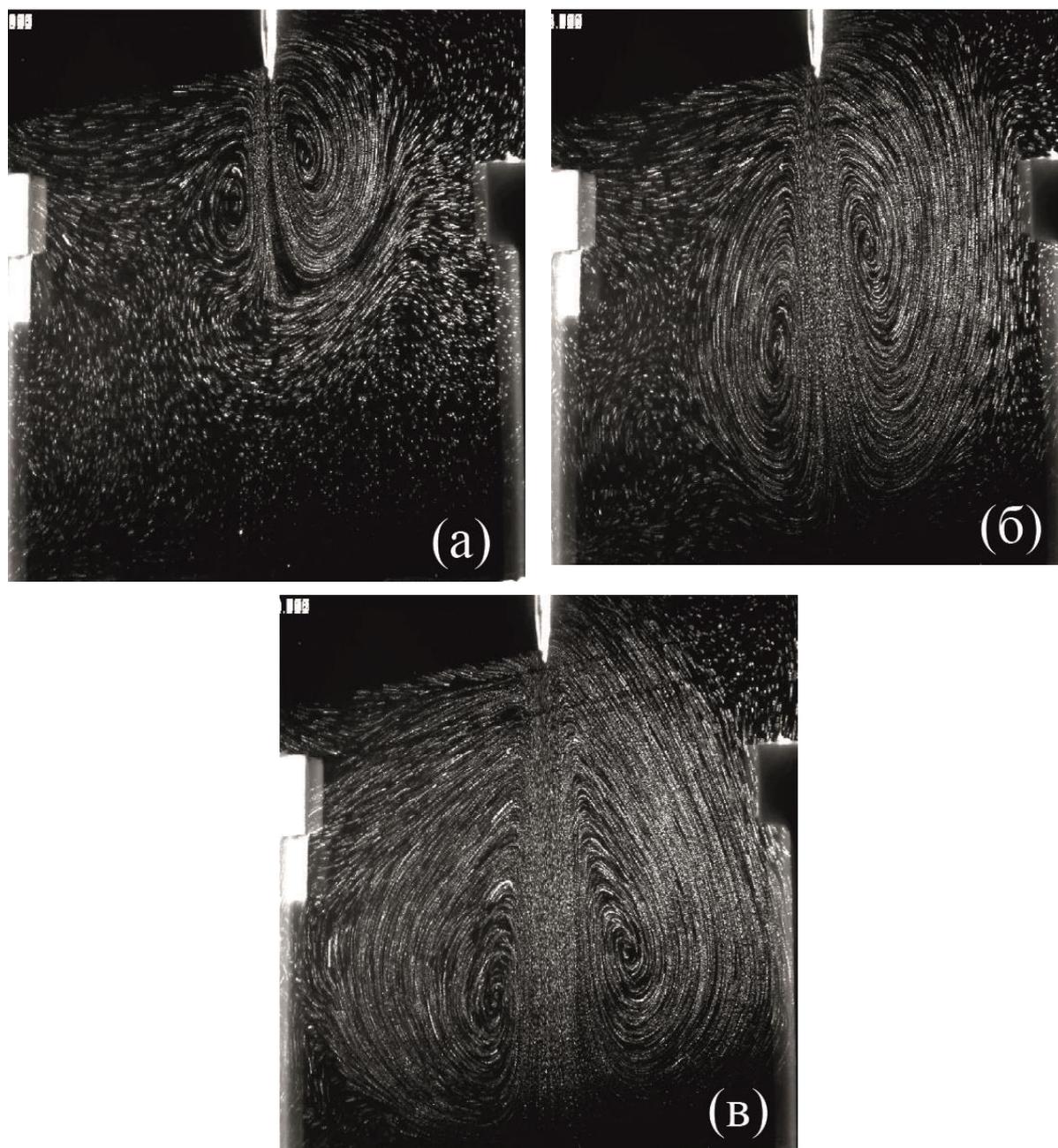


Рис. 1. Общий вид экспериментальной кюветы для исследований ЭГД течений

Для визуализации электроконвективных течений в жидкость добавлялись светорассеивающие частицы, движение которых наблюдалось в световом ноже, формируемом лазерным излучением с длиной волны 532 нм, которое заводилось в полость через стеклянное окно в боковой границе полости. Плоскость светового ножа лежит в среднем вертикальном сечении полости, в котором расположен верхний электрод. Движение частиц



**Рис. 2.** Структура ЭГД течения, наблюдающегося в хлорбензоле при различных действующих значениях разности потенциалов переменного электрического поля между электродами: а – 3.5 кВ; б – 5.0 кВ; в – 7.5 кВ. Межэлектродное расстояние 7.1 см

регистрировалось при помощи видеокамеры с высоким пространственно-временным разрешением.

Использование визуализирующих включений в электрогидродинамических задачах имеет ряд существенных ограничений, связанных с их взаимодействием с электрическим полем. Причем в постоянном и переменном полях преобладающие механизмы взаимодействия могут отличаться. В постоянном поле разница в проводимости и/или диэлектрической проницаемости материала частиц и жидкой среды приводит к появлению заряда у частицы. В результате движение частиц в жидкости происходит как за счет действия кулоновской

силы, так и вязкого увлечения потоком. Можно даже ввести электрический аналог числа Стокса, равного отношению кулоновской и вязкой сил, характеризующего отклонение траекторий частиц от линий тока. Поскольку величина вязкой силы пропорциональна размеру частицы, а кулоновской силы – размеру частицы в кубе, то уменьшение размера визуализирующих включений является эффективным способом уменьшения воздействия со стороны электрического поля. С другой стороны, в настоящее время существует большой выбор визуализирующих частиц по материалам. Использование в эксперименте частиц с макси-

мально близкими к жидкой среде электрическими свойствами позволяет существенно понизить вклад электрического поля в движение частиц. В последние годы появились публикации, свидетельствующие об успешном применении методики PIV в электрогидродинамических задачах [15–16].

В рассматриваемом в статье случае высокочастотного переменного поля заряд на частицах не формируется, что исключает появление вышеуказанных сил. Тем не менее взаимодействие визуализирующих частиц с электрическим полем остается благодаря диэлектрофоретическому механизму, возникающему в неоднородных по пространству электрических полях. Включения могут как втягиваться в область сильного поля, так и выталкиваться из него в зависимости от соотношения диэлектрических проницаемостей материала частиц и жидкой среды. Поскольку величина силы, действующей на частицу, пропорциональна ее размеру в кубе и разности диэлектрических проницаемостей, то уменьшение размера частиц и правильный выбор материала позволяют минимизировать нежелательное воздействие со стороны поля. В представленных в статье исследованиях были использованы частицы из полиамида диаметром 20 мкм. Выбор данного типа частиц обусловлен диэлектрической проницаемостью полиамида ( $\epsilon = 3.6$ ), величина которой находится между диэлектрическими проницаемостями бензола ( $\epsilon = 2.2$ ) и хлорбензола ( $\epsilon = 5.6$ ).

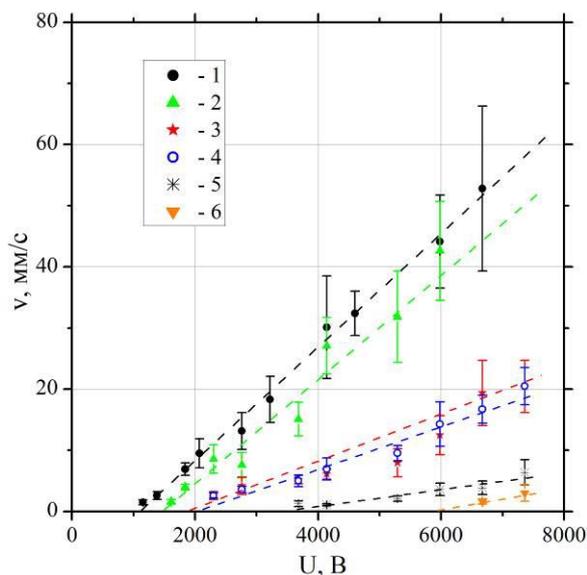
### 3. Результаты и обсуждение

Эксперименты показали, что возникновение ЭГД течения и его интенсивность зависят как от состава исследуемой смеси, так и от приложенной разности потенциалов между электродами. В чистом хлорбензоле развитие конвективного движения носит пороговый характер, т.е. жидкость остается неподвижной во всей полости, если разность потенциалов не превышает некоторого порогового значения  $U^*$ . Отсутствие движения частиц при напряжениях ниже порогового за характерное время проведения эксперимента, составляющего несколько минут, свидетельствует о корректном выборе визуализирующих частиц и о правомерности использования методики в целом.

При незначительном превышении  $U^*$  течение возникает только непосредственно вблизи острия в форме узкой струи, направленной к электродуплоскости (рис. 2, а). По обе стороны от струи наличие возвратного течения приводит к формированию двух вихрей. Наблюдаемое слабое нарушение зеркальной симметрии вихревой структуры связано, скорее всего, с асимметрией конструкции кюветы, обусловленной, например, наличием с одной стороны оптического окна во фторопластовой рамке. При дальнейшем увеличении разности потенциалов интенсивность конвективного движения растет, что приводит к ее более глубокому

проникновению в объем жидкости (рис. 2, б). При достаточно больших разностях потенциала струя начинает достигать противоположного электрода (рис. 2, в).

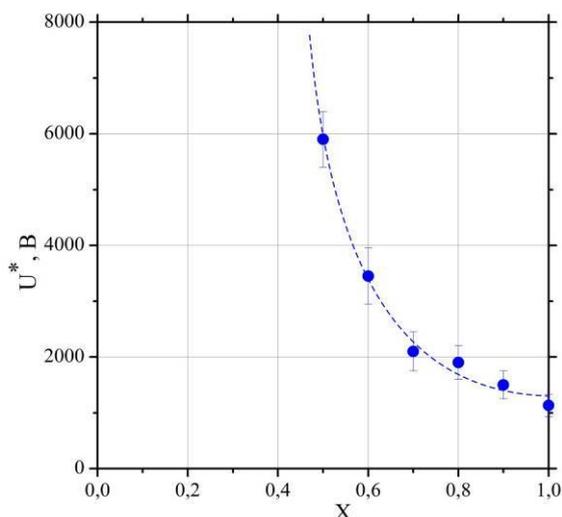
Наблюдения показали, что добавление бензола даже в относительно небольших количествах приводит к повышению порогового значения разности потенциалов, при которой возникает течение вблизи острия. Отмечено также, что величина скорости ЭГД течения в смесях существенно ниже по сравнению с чистым хлорбензолом. Для количественного анализа результатов построен график зависимости интенсивности конвективного течения от приложенного напряжения для различных по составу смесей (рис. 3).



**Рис. 3.** Зависимость скорости ЭГД течения в смеси бензол-хлорбензол от действующего значения разности потенциалов переменного электрического поля. Скорость измерена в центре струи на расстоянии 1 мм от острия. Разным кривым соответствует разное мольное содержание хлорбензола в смеси: 1 – 1.0, 2 – 0.9, 3 – 0.8, 4 – 0.7, 5 – 0.6, 6 – 0.5. Межэлектродное расстояние 4.7 см. Пунктирные линии изображены для удобства восприятия

В качестве характеристики состава смеси взято относительное мольное содержание хлорбензола, рассчитываемое как отношение количества молей хлорбензола к общему количеству молей обоих компонентов в смеси. За меру интенсивности течения взята скорость жидкости в струе, измеренная на расстоянии 1 мм от острия. Видно, что зависимости, полученные для различных по составу смесей, подобны: в области напряжений, выше порогового значения, скорость конвективного движения возрастает линейно с увеличением разности потенциалов, достигая в хлорбензоле значений несколько сантиметров в секунду при максимальных значениях напряжения. Увеличение доли

молекул бензола в смеси приводит к быстрому повышению порогового значения разности потенциалов (рис. 4). При этом интенсивность ЭГД течения уменьшается при одинаковых разностях потенциала. В смесях с мольным содержанием хлорбензола 0.4 и меньше ЭГД течение не развивалось вплоть до максимально достижимых разностей потенциала.



**Рис. 4.** Пороговое значение межэлектродной разности потенциалов как функция относительного мольного содержания хлорбензола. Межэлектродное расстояние 4.75 см. Пунктирная линия изображена для удобства восприятия

Обсудим далее возможные физико-химические механизмы, лежащие в основе наблюдаемой в экспериментах ЭГД неустойчивости. Возникновение ЭГД течения всегда связано с наличием свободных зарядов в объеме жидкой среды, движение которых под действием электрического поля приводит к увлечению соседних молекул, связанных с ними электростатическим взаимодействием. В изотермической ситуации возможны два источника появления свободных зарядов [10, 11, 13, 14]. Первый из них связан с диссоциацией незначительного количества молекул жидкой среды на ионы. Молекулы неполярных жидкостей, в нашем случае это бензол, достаточно устойчивы. Энергия ионизации подобных молекул намного выше тепловой энергии, что делает практически невозможными процессы термической автодиссоциации. Ионизация таких молекул в электрическом поле, так называемый эффект Вина, становится возможной только в очень сильных полях, порядка 100 кВ/см [17-18]. В такой ситуации наличие собственной проводимости обычно связывают с примесными ионами, образующимися в объеме жидкости за счет неполной диссоциации некоторой примеси, например, соли, растворенной в виде ионных пар. В полярных жидкостях, кроме примесной, проводимость обеспечивается также за счет термиче-

ской автодиссоциации собственных молекул. Вследствие этого проводимость полярных жидких диэлектриков всегда выше, чем неполярных. Кроме того, в отличие от неполярных жидкостей, проводимость которых можно уменьшить ультраочисткой до  $\sigma \sim 10^{-19} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  [19, 20], проводимость полярных жидкостей уменьшается только до  $\sigma \sim 10^{-13} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  [21] и быстро увеличивается со временем вследствие автодиссоциации. Следует отметить, что в силу низкой концентрации ионов, образующихся как за счет примесей, так и вследствие автодиссоциации, их движение в электрическом поле, как правило, не приводит к макроскопическому движению жидкости вплоть до очень больших напряженностей поля. За формирование ЭГД течений ответственен так называемый инжекционный механизм, связанный с генерацией ионов в приэлектродных слоях жидкости. Молекулы полярных жидкостей, адсорбируясь на поверхности электрода под действием кулоновских сил, участвуют в электрохимических окислительно-восстановительных реакциях. Например, в случае полярных молекул, имеющих электроноакцепторную часть, такая реакция будет проходить вблизи катода по следующей схеме:



Здесь  $R$  – радикал (например, бензольное кольцо или углеводородная цепочка),  $X$  – электроноакцептор (электроотрицательный атом, например, галогенид, или группа, например, карбоксильная),  $e^-(M)$  – электрон в металле. Поскольку уровень эмиссии электронов с поверхности катода и количество адсорбированных на его поверхности полярных молекул растет с увеличением напряженности электрического поля, то растет и плотность гомозаряженного слоя. С другой стороны, токи проводимости формируют вблизи электрода гетерозаряженный слой, плотность зарядов в котором также увеличивается с ростом поля, но имеет тенденцию к насыщению в силу конечного количества примеси. Таким образом, как только инжекционный ток на границе становится больше тока проводимости, приэлектродный слой становится неустойчивым и начинает двигаться в сторону противоположного электрода под действием сил Кулона. Это объясняет пороговый характер развития ЭГД течений инжекционного типа.

Изложенный выше сценарий генерации ЭГД течений неплохо разработан для случая постоянных полей [12–13]. Так, например, добавление полярной добавки в неполярную жидкость приводит к появлению конвективного течения в несимметричной системе электродов стержень-плоскость или лезвие-плоскость [11, 22–23]. Однако есть и существенные отличия между результатами имеющихся в литературе и представленных выше экспериментов. Так, например, заметное движение

наблюдается уже при незначительном, несколько процентов, содержании полярной добавки, тогда как в наших экспериментах для наблюдения ЭГД течения требуется как минимум 50% хлорбензола в смеси. Увеличение концентрации полярной добавки при исследовании другими авторами всегда приводит сначала к повышению интенсивности конвективного движения. Однако уже при относительно небольшом содержании наблюдается уменьшение интенсивности и затем почти полное затухание ЭГД течения. В нашей работе увеличение концентрации хлорбензола приводит только к росту интенсивности вплоть до полной замены молекул бензола на молекулы хлорбензола.

Как уже указывалось выше, ЭГД явления в слабопроводящей жидкости исследованы на сегодняшний день в основном для случая постоянного электрического поля. Исследования в переменных неоднородных электрических полях практически отсутствуют, и в основном касаются случаев переходных процессов в однородных полях либо неустойчивостей, вызванных поляризационным механизмом в средах с неоднородным распределением диэлектрической проницаемости. Тем не менее поведение слабопроводящих жидкостей в переменном электрическом поле представляет несомненный интерес с точки зрения дальнейшего развития теории ЭГД явлений. Так, например, интересен сам факт формирования однонаправленного движения на фоне постоянно меняющегося по направлению электрического поля. С одной стороны, это можно объяснить асимметрией приэлектродных процессов по отношению к смене полярности электродов. С другой стороны, возможно объяснение в духе вибрационной гидродинамики, где асимметрия системы обуславливает появление осредненной силы на фоне симметричных колебаний жидкой среды. Для поиска адекватной физической модели явления необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований, направленных на систематическое варьирование основных управляющих параметров задачи.

#### 4. Заключение

В статье представлены результаты экспериментального исследования ЭГД неустойчивости смеси двух слабопроводящих жидкостей в неоднородном переменном электрическом поле в системе электродов острие-плоскость. Показана возможность использования визуализирующих частиц в такого рода исследованиях. Обнаруженное в работе пороговое развитие течения и его зависимость от состава смеси исследованы для случая переменного поля впервые. Полученные результаты не до конца могут быть объяснены существующими моделями, развитыми на сегодняшний день преимущественно для случая постоянного поля.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках проекта № 20-41-596009.

#### Список литературы

1. Гуреев А. А., Абызгильдин А. Ю., Канустин В. М., Зацепин В. В. Разделение водонефтяных эмульсий: учеб. пособие // М.: РГУ нефти и газа им. ИМ Губкина, 2002. 95 с.
2. Saad M. A., Kamil M., Abdurahman N.H., Yunus R. M., Awad O. I. An overview of recent advances in state-of-the-art techniques in the demulsification of crude oil emulsions // Processes. 2019. V. 7. №. 7, 470
3. Frising T., Noik C., Dalmazzone C. The liquid/liquid sedimentation process: from droplet coalescence to technologically enhanced water/oil emulsion gravity separators: a review // Journal of Dispersion Science and Technology. 2006. V. 27. №. 7. P. 1035–1057.
4. Eow J. S., Ghadiri M., Sharif A. O., Williams T. J. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the current understanding // Chemical Engineering Journal. 2001. V. 84. № 3. P. 173–192.
5. Eow J. S., Ghadiri M. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the technology // Chemical Engineering Journal. 2002. V. 85. №. 2–3. P. 357–368.
6. Noik C., Chen J., Dalmazzone C. S. H. Electrostatic demulsification on crude oil: A state-of-the-art review. Proc. of International Oil and Gas Conference and Exhibition. 5–7 December 2006, Beijing, China. OnePetro, 2006 (Electronic resource). URL: <https://doi.org/10.2118/103808-MS> (Access date: 09.03.2022)
7. Mhatre S. et al. Electrostatic phase separation: A review // Chemical Engineering Research and Design. 2015. V. 96. P. 177–195.
8. Таранцев К. В., Красная Е. Г. Применение электрических полей в процессах обезвоживания нефти. Пенза: Изд-во Пенз. гос. технол. акад, 2012. 116 с.
9. Cottrell F. G., Speed J. B. Separating and collecting particles of one liquid suspended in another liquid. US Patent no. 987115, 1911.
10. Жакин А. И. Электрогидродинамика // Успехи физических наук. 2012. Т.182. № 5. С.495–520.
11. Стешков Ю. К. Электрофизические процессы в жидкостях при воздействии сильных электрических полей. М.: Юстицинформ, 2019. 262 с.
12. Shrimpton J. Charge injection systems: physical principles, experimental and theoretical work. Berlin: Springer, 2009. 206 p.
13. Жакин А. И. Приэлектродные и переходные процессы в жидких диэлектриках // Успехи

- физических наук. 2006. Т. 176. №. 3. С. 289–310.
14. Жакин А. И. Ионная электропроводность и комплексообразование в жидких диэлектриках // Успехи физических наук. 2003. Т. 173. №. 1. С. 51–68.
  15. Daaboul M., Louste C., Romat H. PIV measurements on charged plumes-influence of SiO<sub>2</sub> seeding particles on the electrical behavior // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2009. V. 16. №. 2. P. 335–342.
  16. Gouriou C., Traoré P., Louste C. Influence of seeding particle type on velocity measurements in silicone oil under high voltage // IEEE Transactions on Industry Applications. 2017. V. 53. №. 3. P. 2471–2476.
  17. Onsager L. Deviations from Ohm's law in weak electrolytes // The Journal of Chemical Physics. 1934. V. 2. №. 9. P. 599–615.
  18. Chirkov V. A., Vasilkov S. A., Stishkov Y. K. The role of field-enhanced dissociation in electrohydrodynamic flow formation in a highly non-uniform electric field // Journal of Electrostatics. 2018. V. 93. P. 104–109.
  19. Адамчевский И. Электрическая проводимость жидких диэлектриков. Л.: Энергия, 1972. 149 с.
  20. Pitts E., Terry G. C., Willets F. W. Electrical Conductivity and Photoconductivity of Pure Benzene // Nature. 1966. V. 210. N. 5033. P. 295.
  21. Gosse J. P. Electric conduction in dielectric liquids / In: Kunhardt E. E., Christophorou L. G., Luessen L. H. (Eds). The liquid state and its electrical properties. Boston, MA: Springer, 1988. P. 503–517.
  22. Atten P., Malraison B., Zahn M. Electrohydrodynamic plumes in point-plane geometry // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1997. V. 4. N. 6. P. 710–718.
  23. Daaboul M. et al. Study of the transition from conduction to injection in an electrohydrodynamic flow in blade-plane geometry // Journal of Electrostatics. 2017. V. 88. P. 71–75.
- ### References
1. Gureev A. A., Abyzgildin A. Yu., Kapustin V. M., Zatsepin V. V. *Separation of water-oil emulsions*: tutorial. Moscow: Gubkin State University of Oil and Gas, 2002, 95 p. (In Russian).
  2. Saad M. A., Kamil M., Abdurahman N.H., Yunus R. M., Awad O. I. An overview of recent advances in state-of-the-art techniques in the demulsification of crude oil emulsions. *Processes*, 2019, vol. 7, no. 7, 470.
  3. Frising T., Noïk C., Dalmazzone C. The liquid/liquid sedimentation process: from droplet coalescence to technologically enhanced water/oil emulsion gravity separators: a review. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 2006, vol. 27, no. 7, pp. 1035–1057.
  4. Eow J. S., Ghadiri M., Sharif A. O., Williams T. J. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the current understanding. *Chemical Engineering Journal*, 2001, vol. 84, no. 3, pp. 173–192.
  5. Eow J. S., Ghadiri M. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the technology. *Chemical Engineering Journal*, 2002, vol. 85, no. 2–3, pp. 357–368.
  6. Noïk C., Chen J., Dalmazzone C. S. H. Electrostatic demulsification on crude oil: A state-of-the-art review. *Proc. of International Oil and Gas Conference and Exhibition. 5–7 December 2006*, Beijing, China. OnePetro, 2006 (Electronic resource). URL: <https://doi.org/10.2118/103808-MS> (Access date: 09.03.2022)
  7. Mhatre S. et al. Electrostatic phase separation: A review. *Chemical Engineering Research and Design*, 2015, vol. 96, pp. 177–195.
  8. Tarantsev K. V., Krasnaya E. G. *Application of electric fields in oil dehydration processes*. Penza: Penza state technology acad., 2012. 116 p. (In Russian).
  9. Cottrell F. G., Speed J. B. *Separating and collecting particles of one liquid suspended in another liquid*. US Patent no. 987115, 1911.
  10. Zhakin A. I. Electrohydrodynamics. *Phys. Usp.*, 2012, vol. 55, pp. 465–488.
  11. Stishkov Yu. K. *Electrophysical processes in liquids under the influence of strong electric fields*. Moscow: Yustitsinform, 2019. 262 p. (In Russian).
  12. Shrimpton J. *Charge injection systems: physical principles, experimental and theoretical work*. Berlin: Springer, 2009. 206 p.
  13. Zhakin A. I. Near-electrode and transient processes in liquid dielectrics. *Phys. Usp.*, 2006, vol. 49, pp. 275–295.
  14. Zhakin A. I. Ionic conductivity and complexation in liquid dielectrics. *Phys. Usp.*, 2003, vol. 46, pp. 45–61.
  15. Daaboul M., Louste C., Romat H. PIV measurements on charged plumes-influence of SiO<sub>2</sub> seeding particles on the electrical behavior. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2009, vol.16, no. 2, pp. 335–342.
  16. Gouriou C., Traoré P., Louste C. Influence of seeding particle type on velocity measurements in silicone oil under high voltage. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017, vol.53, no. 3, pp. 2471–2476.
  17. Onsager L. Deviations from Ohm's law in weak electrolytes. *The Journal of Chemical Physics*, 1934, vol. 2, no. 9, pp. 599–615.
  18. Chirkov V. A., Vasilkov S. A., Stishkov Y. K. The role of field-enhanced dissociation in elec-

- trohydrodynamic flow formation in a highly non-uniform electric field. *Journal of Electrostatics*, 2018, vol. 93, pp. 104-109.
19. Adamchevsky I. *Electrical conductivity of liquid dielectrics*. Leningrad: Energy, 1972. 149 p. (In Russian).
  20. Pitts E., Terry G. C., Willets F. W. Electrical conductivity and photoconductivity of pure benzene. *Nature*, 1966, vol. 210, no. 5033, pp. 295.
  21. Gosse J. P. Electric conduction in dielectric liquids. In book: Kunhardt E. E., Christophorou L. G., Luessen L. H. (Eds). *The liquid state and its electrical properties*. Boston, MA: Springer, 1988, pp. 503-517.
  22. Atten P., Malraison B., Zahn M. Electrohydrodynamic plumes in point-plane geometry. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1997, vol.4. N. 6, pp. 710–718.
  23. Daaboul M. et al. Study of the transition from conduction to injection in an electrohydrodynamic flow in blade-plane geometry. *Journal of Electrostatics*, 2017, vol.88, pp. 71–75.

**Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:**

Мизев А.И., Шмыров А.В., Федосеев Р.И. Электродинамическая неустойчивость смеси бензола и хлорбензола в неоднородном переменном электрическом поле // Вестник Пермского университета. Физика. 2022. № 1. С. 58–65. doi: 10.17072/1994-3598-2022-1-58-65

**Please cite this article in English as:**

Mizev A.I., Shmyrov A.V., Fedoseev R.I. Electrohydrodynamic instability of a mixture of benzene and chlorobenzene in an inhomogeneous alternating electric field. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2022, no. 1, pp. 58–65. doi: 10.17072/1994-3598-2022-1-58-65

**Сведения об авторах**

1. Алексей Иванович Мизев, д-р. физ.-мат.наук, заведующий лабораторией, Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королева 1, 614068, г. Пермь.
2. Андрей Викторович Шмыров, н.с., Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королева 1, 614068, г. Пермь
3. Родион Иванович Федосеев, студент магистратуры кафедры Прикладной физики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, ул. Профессора Поздеева, 11, корпус В, 614990, г. Пермь

**Author information**

1. Alexey I. Mizev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of Laboratory, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Acad. Korolev Str. 1, 614068 Perm, Russia
2. Andrey V. Shmyrov, Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Acad. Korolev Str. 1, 614068 Perm, Russia
3. Rodion I. Fedoseev, Graduate student, Applied Physics Department, Perm National Research Polytechnic University, Prof. Pozdeev str. 11, building W, 614990, Perm, Russia