

Ю.К. Стишков, М.А. Павлейно

КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ КИНЕМАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ЭГД-ТЕЧЕНИЙ

*НИИ Радиофизики Санкт-Петербургского государственного университета,
ул. Ульяновская, д.1, г. Санкт-Петербург, 198904, Россия*

Методы визуализации ЭГД-течений

Для исследования поля скоростей в гидродинамике часто используют различные методы визуализации течений. Визуализация ЭГД-течений представляет непростую задачу, так как слабопроводящие жидкости очень чувствительны к загрязнениям. Этот метод сталкивается с рядом трудностей. ЭГД-течения существуют в условиях высоких электрических полей, напряженностью порядка десятков киловольт на сантиметр, и электрические характеристики материала, из которого сделана метка, имеют большое значение. Если электрическая проводимость метки выше проводимости исследуемой жидкости, то под действием электрического поля метка приобретет электрический заряд, отличный от заряда окружающей жидкости, и ее скорость будет отличаться от скорости жидкости. Различие диэлектрических характеристик взвешенных частиц и окружающей жидкости приводит к тому, что в сильно неоднородном поле частицы также будут двигаться относительно жидкости. Все это существенно затрудняет наблюдение ЭГД-течений. В последнее время в ряде работ предложены методы визуализации ЭГД-течений, подобные методу визуализирующих включений [1]. Они заключаются в том, что в исследуемой жидкости растворяется жидкое диэлектрическое флюоресцирующее вещество (в малых количествах). Авторы утверждают, что добавление этого вещества практически не изменяет электрических свойств жидкости (диэлектрическая проницаемость остается постоянной, а электрическая проводимость исходной жидкости увеличивается незначительно). С помощью такого жидкого самосветящегося диэлектрика авторам удалось наблюдать линии тока электрогидродинамического течения. Основным недостатком этого способа заключается в том, что с течением времени флюоресцирующий растворитель вследствие перемещения и диффузии равномерно заполняет весь объем исследуемой жидкости – изначально четкие линии тока «расползаются». Следовательно, его можно использовать лишь ограниченное время. Вторым недостатком является то, что с помощью этого метода невозможно измерить скорости ЭГД-течения. В работе [2] при помощи современной видеоаппаратуры и специальных компьютерных программ получено изображение течения для масла с различной вязкостью и при различных напряженностях поля. На основе полученных данных делаются некоторые качественные выводы о структуре ЭГД-течения. В СПбГУ на протяжении многих лет для количественного исследования поля скоростей ЭГД-течений применяются мелкие газовые пузырьки [3]. Пузырьки не электризуются даже в сильно неоднородных электрических полях, а следовательно, не испытывают действия кулоновской силы. Действие диэлектрофоретической силы проявляется лишь в сильно неоднородных электрических полях и в реальных условиях ощущается весьма слабо. Основной причиной движения пузырьков является ЭГД-течение, что позволяет использовать их для измерения скорости течения. С помощью этого метода регистрируется общая картина течения, а при использовании импульсной подсветки можно измерить распределение скорости ЭГД-течения в межэлектродном промежутке.

Исследование поведения газовых пузырьков показало, что относительная погрешность в измерении скорости ЭГД-течения, обусловленная индивидуальным движением пузырьков, как правило, не превышает 5–10%. Этот эффект связан с наличием приэлектродных слоев повышенной напряженности, исключающих возможность прямого контакта с поверхностью электрода при условии введения пузырька воздуха в объем жидкости. Кроме того, если газовые пузырьки вводить в жидкость при помощи капилляров из изолирующего материала, то можно калибровать метки по размерам; реализовать необходимую дозировку меток; вносить минимум загрязнений в жидкость; облегчается ввод и вывод меток из области наблюдения; сводятся к минимуму потери света, так как газовые пузырьки полностью его отражают.

Равномерное заполнение исследуемой области течения можно осуществить путем перемещения капилляра поперек потока жидкости. Эксперименты показали, что движением пузырьков, связанным с действием кулоновских и диэлектрофоретических сил в неоднородном электрическом поле, а также архимедовых сил при определенных условиях можно пренебречь. В определенном диапазоне скоростей они вносят незначительные искажения ЭГД-течений. Обычно скорость ЭГД-течения на два порядка выше, чем скорость смещения пузырька под действием выше перечисленных сил. Таким образом, пузырьки воздуха являются наиболее подходящим инструментом для визуализации ЭГД-течений.

Программные средства обработки фото и видеозаписи ЭГД-течений

Изображение ЭГД-течения, полученное методом визуализирующих пузырьков, обычно записывается на фотопленку или регистрируется на видеоленту при помощи видеокамеры и видеомагнитофона. На рис. 1 приведена типичная фотография (негатив) ЭГД-течения, полученная при импульсной подсветке в отраженном свете на черном фоне. Световые импульсы подсветки имели форму меандра, длительность светового импульса T равна длительности промежутка между соседними импульсами. Время фотографирования превышает $20T$.

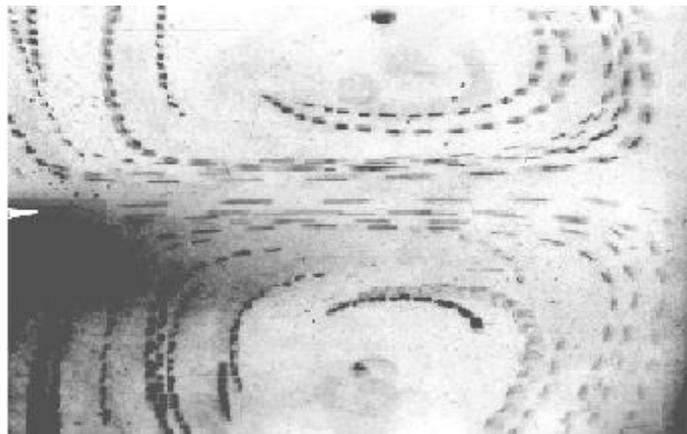


Рис. 1. Фотография ЭГД-течения.

Эксперимент поставлен в трансформаторном масле с примесью бутанола и ацетона, величина низковольтной проводимости 10^{-10} См/м, напряжение на электродах 10 кВ, межэлектродное расстояние 1 см. В качестве электродов использована система провод над плоскостью (на фотографии: провод слева, плоскость справа в виде вертикальной полосы). ЭГД-течение в подобной системе направлено от провода к плоскости и носит двумерный "плоский" характер. Пунктирные траектории на фотографии соответствуют линиям тока жидкости в различных областях поля скоростей ЭГД-течения. Для обработки фотографий ЭГД-течений авторами разработаны специальные пакеты программ, позволяющих с высокой точностью восстанавливать поля скоростей ЭГД-течений, проводить тестовую оценку достоверности полученной гидродинамической картины, строить поверхностные графики распределения скорости, карты линий уровня скорости, векторные поля скорости ЭГД-течений. Обработка состоит из нескольких этапов.

На начальном этапе фотография сканируется, выделяются отдельные траектории, маркируются начала и концы штрихов, определяется Y -координата центральной линии течения, координаты точек A и

B , где скорость течения равна нулю (центры завихрений), а также линии нулевой скорости, соответствующие поверхности электродов.

Далее определяются координаты маркирующих точек для выбранной линии тока. Путем вычисления промежутков между соседними точками определяются значения компонент скоростей V_x , V_y . В связи с тем, что в декартовой системе координат некоторые траектории не являются однозначными функциями координат и не допускают аппроксимации единой функцией, осуществляется переход в полярную систему координат, связанную с центрами завихрений A или B , в зависимости от места расположения траектории, и производится аппроксимация полученных данных методом наименьших квадратов – отрезками парабол (величина отрезков может варьироваться). При достижении требуемого качества аппроксимации производится переход в новую систему координат, связанную с расстоянием вдоль линии тока (см. рис. 2). Поскольку метод визуализации основан на наблюдении за отдельными движущимися частицами жидкости, переход в лагранжеву систему координат позволяет проводить обработку отдельных линий тока более точно, например, вычислять ускорение вдоль выделенной линии тока, проводить сопоставление геометрических и скоростных характеристик линий тока. На рис. 2 в качестве примера приведены одна из линий тока фотографии 1 (вверху), распределение исходной x -компоненты скорости и ускорения (внизу) вдоль линии тока. Расположение электродов показано на верхнем графике жирной стрелкой (лезвие) и сплошной линией (плоскость). Точки на графике соответствуют результатам обработки исходных экспериментальных данных методом наименьших квадратов. Затем обрабатываемая линия тока разбивается на отрезки равной длины и в полученных, таким образом, точках определяются значения скорости V_x и V_y . На следующем этапе восстанавливается распределение ускорений вдоль линии тока путем вычисления приращений скорости на эквидистантных по времени отрезках, которыми являются исходные экспериментальные точки. Исходное распределение ускорений вдоль линии тока, также аппроксимируется по методу наименьших квадратов (см. рис. 2, внизу). Затем обрабатываемая линия тока вновь разбивается на отрезки равной длины и в полученных, таким образом, новых точках определяются значения приращений скорости dV_x и dV_y , значения которых делятся на соответствующие отрезки времени и приравниваются значениям ускорений в новых серединных точках. Эти значения приведены на рис.2, стрелками указано направление движения жидкости вдоль линии тока (вверху), начало отсчета на распределениях скорости и ускорение соответствует начальной точке выделенного участка линии тока. Как видно из рис. 2, X -компонента скорости сначала возрастает, затем имеется участок слабого изменения скорости, далее скорость падает. В соответствии с этим на графике x -компоненты ускорения наблюдаются положительная и отрицательная полуволны, причем торможение жидкости начинается еще в середине межэлектродного промежутка. В конце программы производится пересчет всех данных в исходную систему координат, связанную с неподвижными электродами. Для оценки погрешности обработки в конце программы приводятся следующие графики и рисунки: исходная и восстановленная траектории, то есть зависимость Y от X , зависимость X и Y от пройденного пути вдоль траектории, зависимость компонент скорости (V_x , V_y) и модули скорости, а также их восстановленных значений от пройденного пути вдоль траектории и распределений компонент скорости и ускорения в неподвижной системе координат. Аналогично обрабатываются все остальные линии тока, зарегистрированные на фотографии. Полученные данные объединяются. Получившееся при этом векторное поле называется исходным. Далее проводится интерполяция исходных данных на равномерной сетке. Шаг сетки выбирается в зависимости от нужд пользователя.

Результатами обработки исходной фотографии являются векторные поля скоростей и ускорений, карты линий уровня и поверхностные графики скоростей и ускорений, а также восстановленные линии тока течения и некоторые интегральные характеристики: расход жидкости вдоль произвольно выбранных линий тока жидкости.

Как уже отмечалось, ЭГД-течение, представленное на рис. 1, носит ламинарный, параллельно-струйный характер. Применительно к течениям такого рода интегральная форма закона сохранения вещества гласит: расход жидкости в любом сечении вдоль трубки тока постоянен. Напомним, что в случае плоского течения расход эквивалентен интегралу профиля скорости вдоль любых выбранных линий тока. Это положение используется в специальной программе для определения погрешности восстановления поля скоростей ЭГД-течения.

Результаты обработки и их анализ

На рис. 3 приведены исходное (вверху) и восстановленное (в середине) векторное поле скоростей и ускорений (внизу). По полю скоростей видно, что течение носит ламинарный, параллельно-струйный

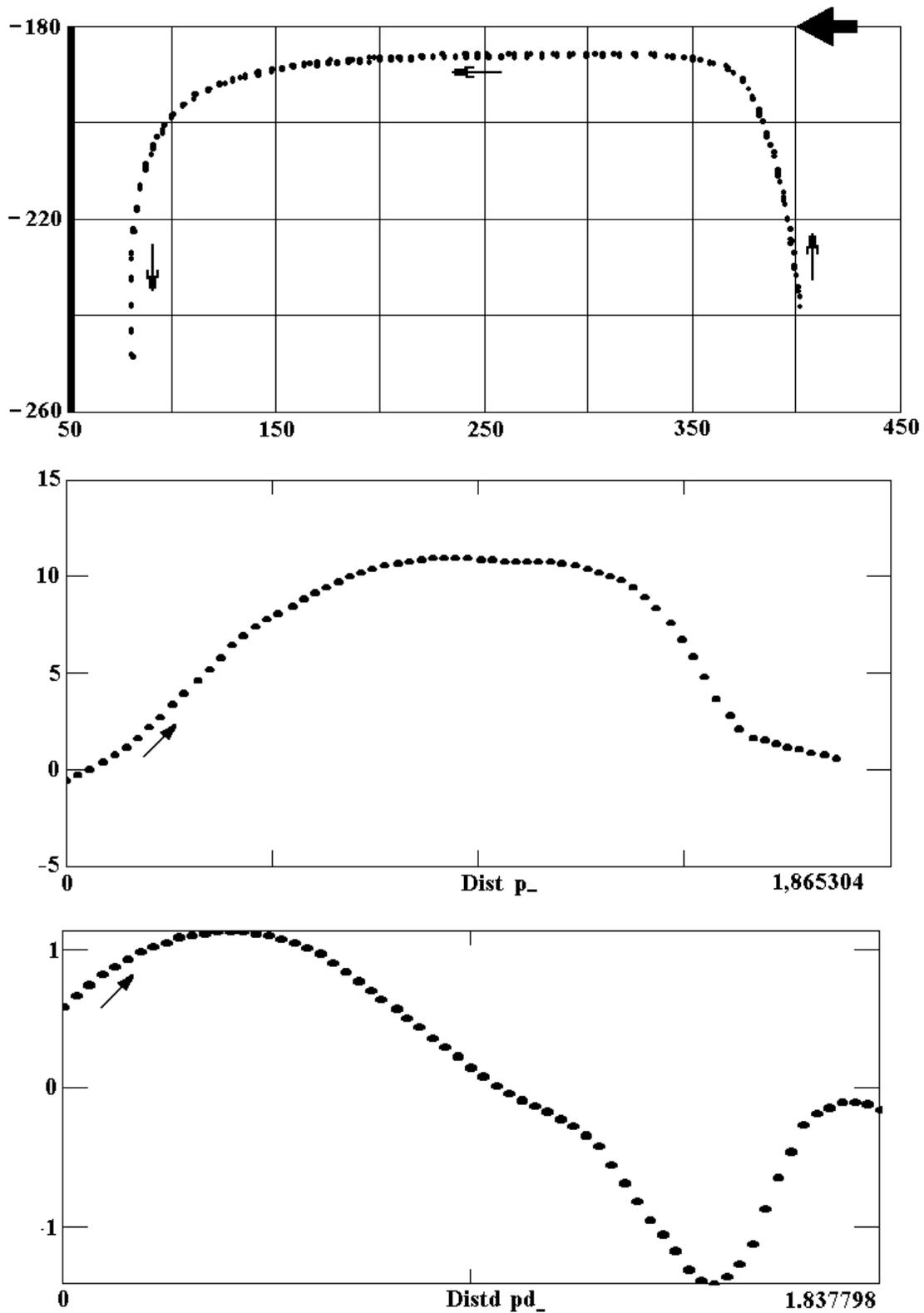


Рис. 2. Линия тока (вверху), распределение x -компоненты скорости и ускорения (внизу) вдоль линии тока.

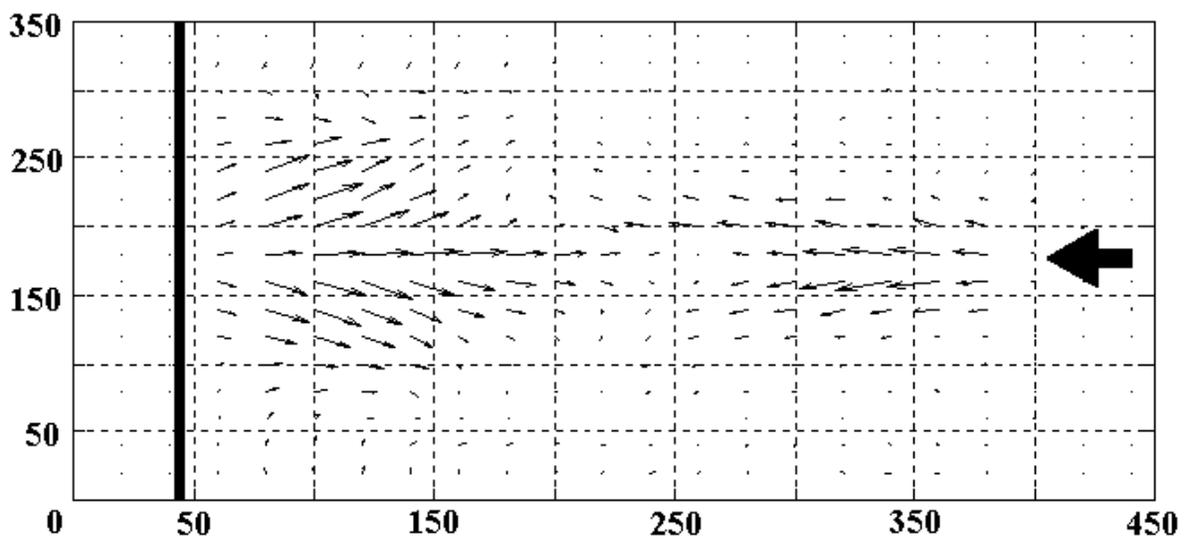
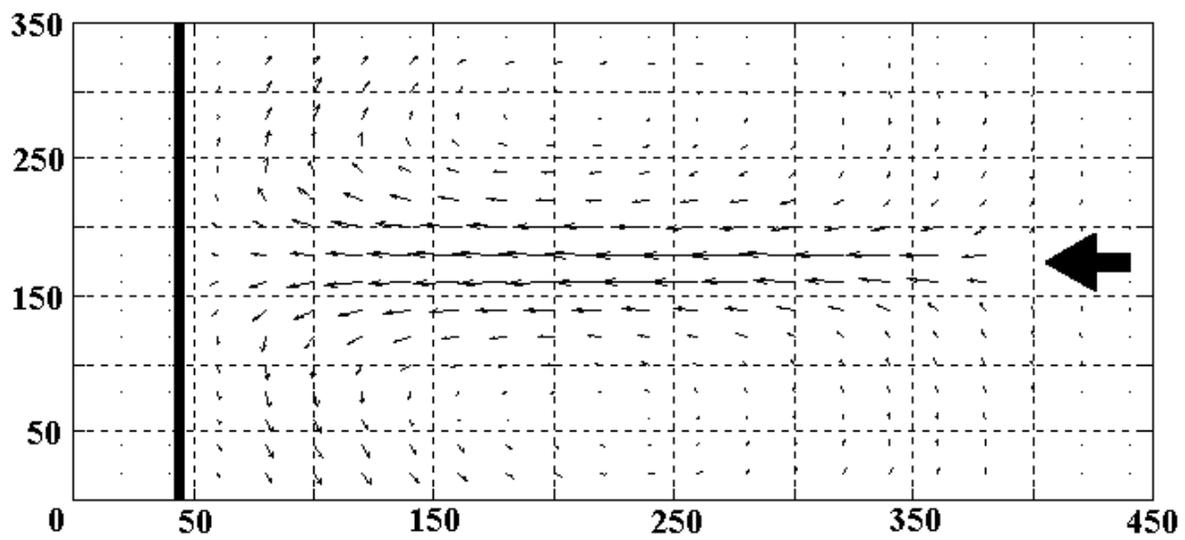
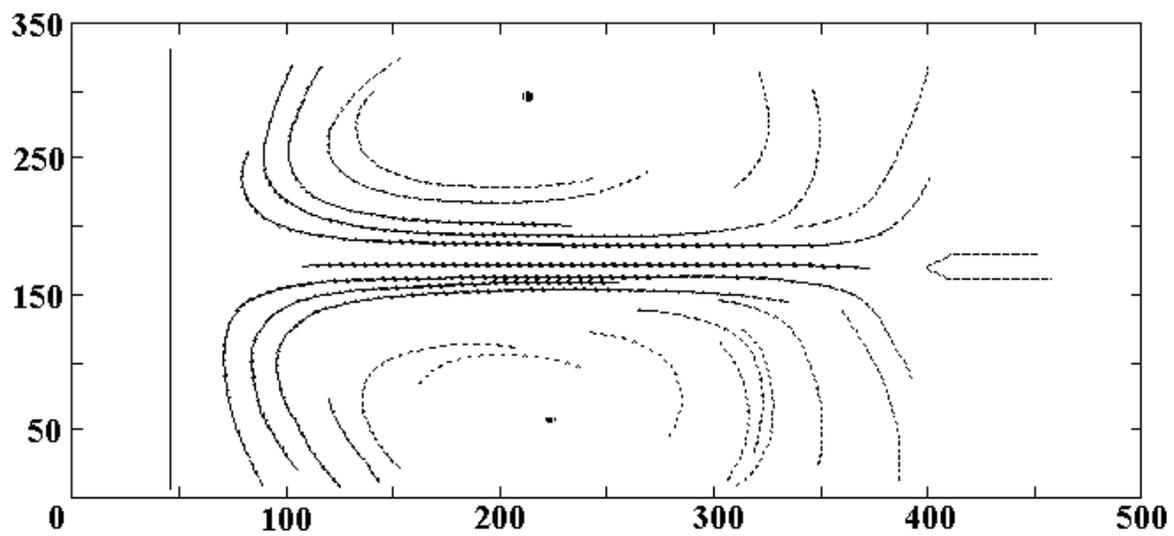


Рис. 3. Исходное (вверху) и восстановленные поля скоростей и ускорений (внизу).

характер, течение на большей части межэлектродного промежутка слабо изменяется. На рис. 4 и 5 приведены карты линий уровня и поверхностные графики скорости (вверху) и ускорения (внизу). Оценка относительной погрешности метода, проведенная путем вычисления расхода жидкости вдоль выбранных восстановленных линий тока, показала, что за исключением узких приэлектродных областей относительная погрешность не превышает 3–5%.

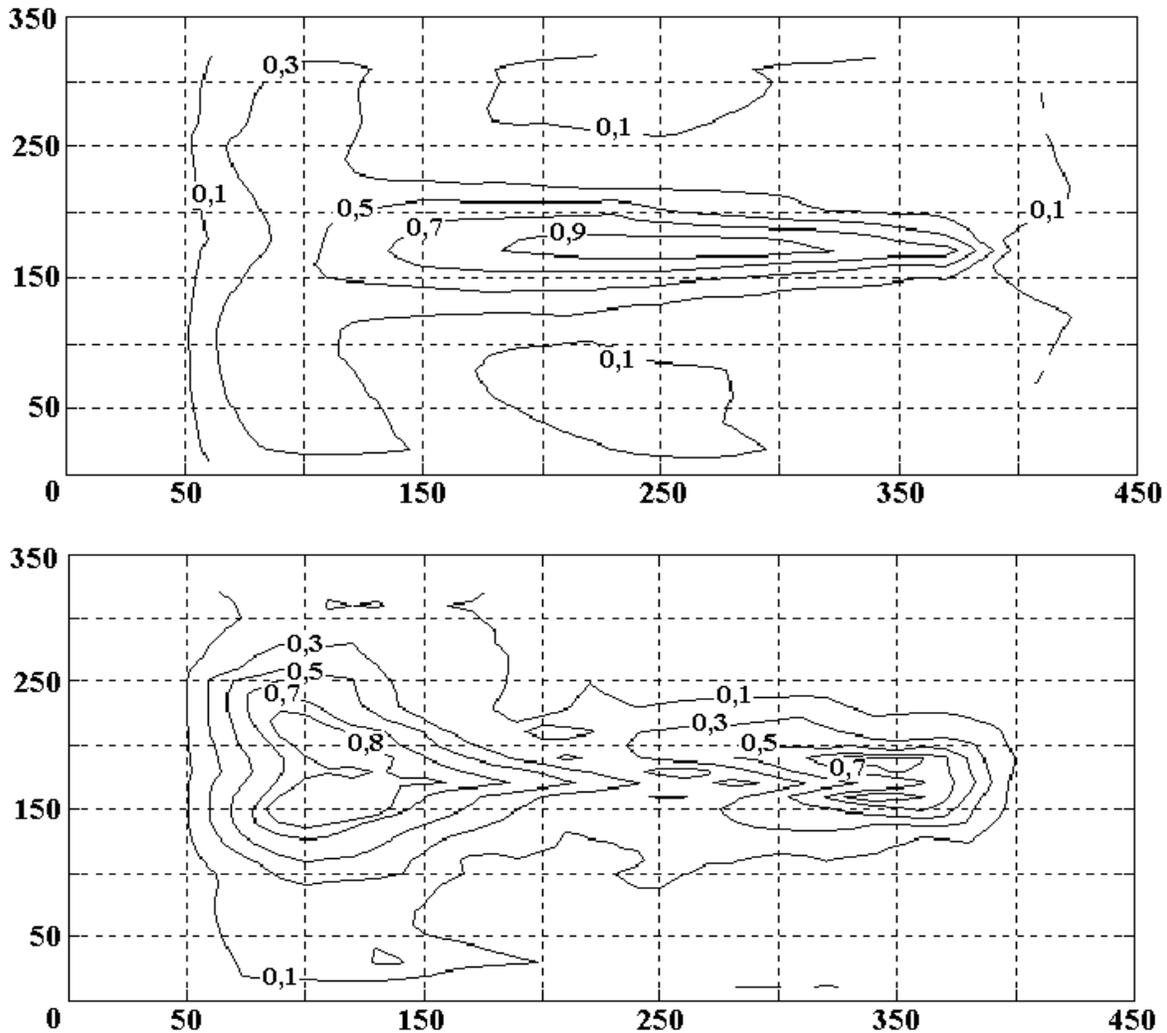


Рис. 4. Карты линий уровня скорости (вверху) и ускорения.

Анализ рис. 3–5 показывает, что зона интенсивного роста скорости находится в непосредственной близости к лезвиеобразному электроду, у противоэлектрода имеется зона торможения центральной струи ЭГД-течения. Область, занятую ЭГД-течением, можно условно разделить на несколько зон: в непосредственной близости к электроду имеется тонкий прилипший слой неподвижной жидкости (зона а). Этот слой имеет характерную толщину (десятые доли мм) и виден на некоторых фотографиях. В пределах этой зоны происходит инжекция электрического заряда в жидкость. Зона (b) – зона интенсивного ускорения жидкости электрическим полем хорошо видна на векторных полях скорости и ускорения, в пределах этой зоны происходит преобразование электрической энергии в энергию кинетическую. На поверхностном графике скоростей эта зона соответствует крутому лобовому склону, на поверхностном графике ускорений – левому горбу. Далее следует зона плавно изменяющегося течения (c). Эта зона, названная центральной струей ЭГД-течения, соответствует параллельно-струйной части течения, хорошо видной на фотографии течения, векторном поле скоростей и на карте линий уровня в виде вытянутых в направлении течения областей равного уровня скорости.

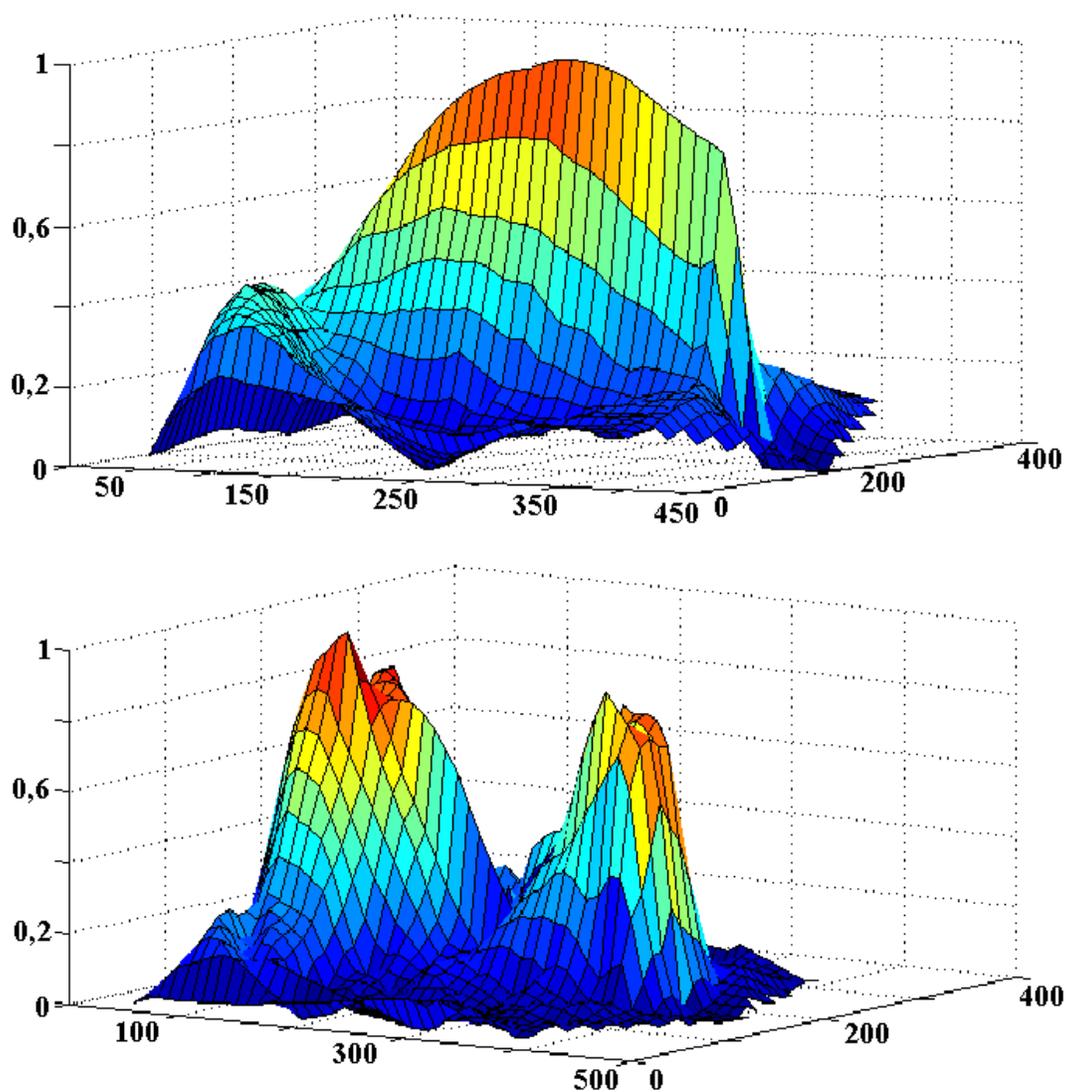


Рис. 5. Поверхностные графики скорости (вверху) и ускорения.

В пределах центральной струи течения ускорения незначительны. Далее следует зона (*d*) – торможения центральной струи ЭГД-течения у поверхности плоского противоиэлектрода, соответствующая заднему, более пологому склону поверхностного графика скорости и правому горбу поверхностного графика ускорений. Непосредственно к поверхности противоиэлектрода примыкает неподвижный приэлектродный слой жидкости. В пределах зоны (*d*) происходит резкое уменьшение модуля скорости течения, а также изменение направления течения, центральная струя раздваивается. Структура зоны (*d*) достаточно сложна. Как видно из векторного поля ускорений, торможение жидкости начинается еще в середине межэлектродного промежутка и здесь тормозящие силы направлены против течения. По мере раздвоения центральной струи направление действующих сил изменяется от противоположного направлению течению на коллинеарное ему, то есть в боковых струях жидкость также ускоряется. Это же показывают и графики распределений проекции ускорения на направление линии тока. Таким образом, плотность кинетической энергии жидкости резко падает, что хорошо видно из поверхностного графика скорости (см. рис. 3). Поскольку движущими силами ЭГД-течения являются кулоновские силы $f = \rho E$, а направление электрического поля в пределах центральной струи не может измениться на обратное, то торможение жидкости может происходить только в результате действия вязких сил. Однако наряду с этим необходимо предположить, что в пределах центральной струи резко падает плотность электрического заряда жидкости. Этот спад может происходить за счет рекомбинации заряда в центральной струе течения с противозарядом, полученным от плоского электрода. Этот важный вывод говорит о том,

что в неоднородном электрическом поле оба электрода поставляют электрический заряд в жидкость, а в объеме течения идет его интенсивная рекомбинация.

Таким образом, анализ зонной структуры течения показывает: ион, получивший электрический заряд на поверхности электрода, в пределах неподвижной зоны (а) движется относительно жидкости со скоростью, определяемой низковольтной подвижностью иона, формируя вокруг себя некую молекулярную структуру, обеспечивающую в дальнейшем повышенную степень его взаимодействия с молекулярным окружением. Далее, ион разгоняет жидкость в пределах зоны ускорения (b). Величина средней электрогидродинамической подвижности, определяемая как отношение средней скорости жидкости к средней скорости движения ионов относительно жидкости, в центральной струе ЭГД-течения составляет 10–20, то есть вне зоны ускорения ионы практически «вморожены» в жидкость [3]. "Присоединенную массу" отдельного иона можно оценить, приравнявая в зоне ускорения инерционные силы электрическим: $\rho E \sim \gamma \partial v / \partial t$, здесь ρ, E, γ, v – соответственно: объемная плотность заряда, напряженность электрического поля, плотность жидкости и скорость ЭГД-течения. Отношение $\rho/\gamma \sim E^{-1} \partial v / \partial t$ можно оценить, используя данные рис. 3–5. Максимальное ускорение в пределах центральной струи равно 10 м/с^2 , средняя напряженность электрического поля 10^6 В/м , плотность жидкости $8 \cdot 10^2 \text{ кг/м}^3$. Отношение ρ/γ в центральной струе течения равно 10^{-5} Кл/кг , что соответствует присоединенной массе в $2 \cdot 10^{-11} \text{ г}$ в расчете на однозарядный ион. Таким образом, на каждый ион приходится присоединенный объем жидкости радиусом в 10^{-6} м , достаточно жестко связанный с ионом. В работе [4] в качестве основной причины повышенного ион-молекулярного взаимодействия рассмотрено образование надмолекулярных структур. Это необходимо приводит к изменению акустических и оптических свойств заряженной жидкости, в частности к акустической дисперсии, носящей резонансный характер и зависящей от объемной плотности заряда в жидкости [4]. Нелинейный электрооптический эффект, связанный с неоднородным распределением объемного заряда в жидкости, проявляется в виде сильной анизотропии оптических свойств заряженной жидкости [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Sekino Yuichi, Ohyama Rui-ichiro, Kaneko K.* Measurements of Unsteady EHD Flow from Injection Charges on Free Surfaces by Particle Report Image Velocimetry // "Annular Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena". Atlanta, USA, 1998. Vol. 1. P. 162–165.
2. *Ohyama R., Kaneko K.* Optical Characterization of Steady EGD Fluid Motion // "Annular Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena". Atlanta, USA, 1998. Vol. 1. P. 158–161.
3. *Стушков Ю.К., Остапенко А.А.* Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках. Л., 1989.
4. *Stishkov Y.K., Steblyanko A.V.* Breakdown of the homogeneity of weakly conducting liquids in high electric fields // Zh.Tekh. Fiz. 1997. 67. P. 105–111.
5. *Stishkov Y.K.* Space charge influence on non-linear beam defocusing. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Atlanta, OMNIPRESS USA, 1998. Vol. I., P. 170–174.

Поступила 21.12.99

Summary

The paper describes features of the visualisation EHD-flows methods. It is demonstrated that the most precise method is the method of visualisation by means of gas bubbles. The paper contains methodology of processing photo and video materials of EHD-flows by means of special programmes, developed by authors. The programmes are based on well known mathematical systems MathCad and MatLab. The results of EHD flows processing are shown as vector fields, picture of isolines of velocity and surface diagram. Relative error of method is evaluated here. It does not exceed 10%. The paper contains analysis of received data and zone structure of EHD flows. The value order of attached mass of separate ion within the limits of central part of EHD-flows is identified.