

УДК 612(075)

# АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРАМЕТРОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ ГАЗОРАЗРЯДНОГО СВЕЧЕНИЯ

**К. Г. Коротков,**

д-р техн. наук, профессор

**Э. В. Крыжановский,**

аспирант

**Д. И. Муромцев,**

аспирант

**М. А. Бабицкий,**

аспирант

Санкт-Петербургский институт точной механики и оптики

**М. Б. Борисова,**

аспирант

Санкт-Петербургский государственный университет

Статья посвящена описанию автоматизированной системы для изучения изменений во времени характеристик изображений газового разряда, получаемых в электромагнитном поле высокой напряженности вокруг капель жидкости. Для описания газоразрядных изображений (ГРВ-грамм) предложено использовать площадь свечения, среднюю интенсивность свечения, средний радиус, нормализованное среднеквадратическое отклонение радиуса и коэффициент формы. Выявлены статически значимые различия между образцами жидкостей, что не обнаруживалось при изучении их одиночных (статических) ГРВ-грамм. Построена математическая модель для описания поведения трендов параметров ГРВ-грамм.

*This article devoted to the study of changing of the characteristics of gas discharge glow images (GDV images) around the drop of liquid in the strong electromagnetic field. Several parameters to describe the GDV images were proposed: Glow Area, Average Intensity, etc. This approach was named "Dynamic GDV-graphy". The statistically significant differences were revealed between different samples of liquids in the case when conventional "static" GDV-graphy was unable to reveal ones. The mathematical model of behavior of the time series trends of the GDV-parameters was suggested.*

## Введение

Свечение газового разряда, возникающего вблизи поверхности исследуемого объекта при помещении последнего в электрическое поле высокой напряженности, известно уже более двух столетий. В современной научной практике исследование этого явления получило название газоразрядная визуализация (ГРВ) [1]. В настоящее время для регистрации и анализа газоразрядных изображений применяется аппаратура с микропроцессорным управлением и цифровой оптикой, а также вычислительная техника. Разработаны приборы и инструментальные средства для исследования различных физических и биологических объектов.

Сущность процесса визуализации можно описать следующей теоретической схемой. Первичным являет-

ся процесс взаимодействия магнитного поля с объектом исследования, в результате которого при определенной напряженности поля возникает эмиссия с поверхности объекта заряженных частиц, участвующих в ионизации начальных фаз газового разряда. Газовый разряд, в свою очередь, может влиять на состояние объекта, вызывая вторичные эмиссионные, деструктивные и тепловые процессы. Неоднородность поверхности и объема, процессы эмиссии заряженных частиц или выделения газов оказывают влияние на параметры электромагнитного поля, за счет чего изменяются параметры газового разряда, а именно ток разряда и оптическое излучение. При этом основная информация извлекается из характеристик получаемого видеоизображения газоразрядного свечения, которое представляет собой пространственно распределенную группу участков различной яркости.

На сегодняшний день практически значимый и воспроизводимый результат получен в исследовании жидкофазных объектов.

Проблема выявления индивидуальных различий химически близких жидкостей, а также водных растворов слабой концентрации актуальна для медицины, биологии и косметологии [2]. В [3, 4] была разработана методика исследования жидкостей путем изучения характеристик газового разряда вокруг капель. В этих работах было показано, что растворы сильных электролитов, таких как NaCl, KCl, NaNO<sub>3</sub>, KNO<sub>3</sub>, имеют различия по параметрам газоразрядных изображений (ГРВ-грамм), как между соседними концентрациями одного раствора, так и между одинаковыми концентрациями различных растворов.

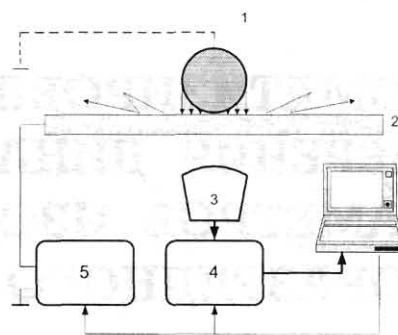
В данной статье показано, что при экспонировании капель проводящих (сильные электролиты) и слабо проводящих (эфирные масла) жидкостей в электромагнитном поле (ЭМП) в течение 2–10 с наблюдается закономерная динамика изменений характеристик газоразрядного свечения. Исследование характеристик динамических рядов ГРВ-изображений различных жидкостей показало их значимость для выявления индивидуальных различий химически близких жидкостей, как проводящих, так и слабо проводящих. Это позволяет ввести понятие динамической ГРВ-график как метода исследования жидкостей путем изучения изменения характеристик газоразрядного свечения вокруг капель жидкости, т. е. изменения параметров ГРВ-грамм во времени.

## Методика эксперимента

Методика газоразрядного исследования объектов основана на включении объекта, расположенного на прозрачном электроде, покрытом диэлектриком, в цепь прибора, и получении, таким образом, газоразрядных изображений. На рис. 1 схематично изображены прибор и объект исследования. На исследуемый объект 1 и диэлектрическую пластину 2 подаются импульсы напряжения от генератора электромагнитного поля 5, для чего на обратную сторону пластины нанесено прозрачное токопроводящее покрытие. При высокой напряженности поля в газовой среде пространства контакта объекта и пластины развивается лавинный разряд и/или скользящий газовый разряд, параметры которого определяются свойствами объекта исследования. Свечение разряда с помощью оптической системы и ПЗС-камеры преобразуется в видеосигналы, которые через цифровой видеопреобразователь поступают на вход компьютера для дальнейшей обработки.

Цифровые видеосигналы записываются на жесткий диск компьютера в виде видеофайлов или отдельных растровых изображений. Типичный вид газоразрядных изображений для капель жидкостей и металлического объекта цилиндрической формы представлен на рис. 2.

Спектр изображений газоразрядного свечения объектов стандартной формы имеет достаточно стабильный вид. На рис. 3 представлен пример спектра ГРВ-изображения металлического объекта цилиндрической формы. Для таких спектров характерно нали-

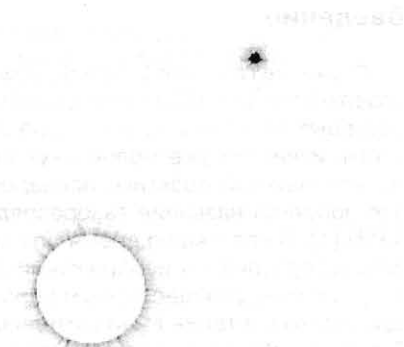


■ **Рис. 1.** Схематическое изображение прибора для исследования характеристик ГРВ-изображений: 1 — объект исследования; 2 — прозрачный электрод, покрытый диэлектриком; 3 — оптическая система; 4 — цифровой видеопреобразователь; 5 — электронные блоки

чие пика в темной области и резкое снижение количества точек более высокой интенсивности. Такая форма спектра у всех ГРВ-изображений позволила разработать алгоритм автоматического выявления значимого сигнала из исходного, зашумленного изображения, получаемого с прибора.

Стандартная последовательность получения, обработки и анализа динамических ГРВ-изображений включает ряд этапов, показанных на рис. 4. Каждый кадр динамического ГРВ-изображения перед началом обработки приводится к формату 8 бит/пиксель с палитрой в градациях серого. Таким образом, кадр представляет собой матрицу  $F[w \times h]$ , где  $w$  — размер кадра по горизонтали (ширина),  $h$  — размер кадра по вертикали (высота). Каждый элемент матрицы  $F[x, y]$  — это интенсивность свечения от 0 (отсутствие свечения) до 255 (максимальная яркость свечения) в точке с координатами  $(x, y)$ , где  $x \in [0, w]$ ,  $y \in [0, h]$ .

Перед расчетом параметров отдельных кадров производится фильтрация шума в следующей последовательности:



■ **Рис. 2.** Типичные ГРВ-изображения для капель дистиллированной воды, раствора NaCl и металлического объекта



■ Рис. 3. Спектр ГРВ-изображения



■ Рис. 4. Последовательность обработки и анализа динамических ГРВ-изображений

- 1) удаление всех точек изображения, интенсивность которых меньше или равна заданному уровню шума;
- 2) удаление фрагментов свечения, площадь которых строго меньше заданной минимальной площади фрагмента;
- 3) удаление всех точек изображения, расстояние от которых до центра свечения строго больше заданного рабочего радиуса.

После проведения фильтрации выполняется расчет следующих числовых характеристик свечения:

- 1) площади свечения  $S$  количества точек с ненулевой интенсивностью;
- 2) средней интенсивности свечения  $\bar{I}$  — средней интенсивности свечения всех точек с ненулевой интенсивностью;
- 3) среднего радиуса  $\bar{R}$ ;
- 4) нормализованного среднеквадратического отклонения радиуса  $\sigma_{\bar{R}}$ ;
- 5) коэффициента формы  $K_f$ .

Для расчета трех последних характеристик строится функция  $R(\alpha)$  следующим образом. Из центра свечения проводятся лучи с углом наклона  $\alpha \in [0^\circ; 360^\circ)$ , с таким шагом, чтобы покрывалась вся площадь свечения. По каждому лучу определяется положение двух точек (фактически расстояние от центра) с интенсивностью, на большей уровня шума — самой близкой к центру свечения ( $R_{\min}$ ) и наиболее удаленной от него ( $R_{\max}$ ). Затем вычисляется функция  $R(\alpha) = R_{\max} - R_{\min}$ . Таким образом, получаемая функция отражает характер изменения внешнего контура свечения в зависимости от угла. Средний радиус  $\bar{R}$  является математическим ожиданием значений функции  $R(\alpha)$ . Нормализованное отклонение вычисляется как  $\sigma_{\bar{R}} = \frac{\sigma_R}{\bar{R}}$ , где  $\sigma_R$  — среднеквадратическое отклонение функции  $R(\alpha)$ .

Коэффициент формы  $K_f = \frac{L}{2\pi\bar{R}}$ , где  $L$  — длина кривой функции  $R(\alpha)$ .  $K_f$  отражает степень «изрезанности» контура свечения:  $K_f = 1$  — соответствует идеальной круглой форме свечения; чем больше значение  $K_f$ , тем больше степень «изрезанности» контура. Каждый из перечисленных параметров может быть рассчитан не только для всего изображения, но и для отдельных секторов (с центром в центре свечения). Из рассчитанных параметров отдельных кадров формируются временные ряды, которые описывают динамику изменения каждого параметра во времени.

мируются временные ряды, которые описывают динамику изменения каждого параметра во времени.

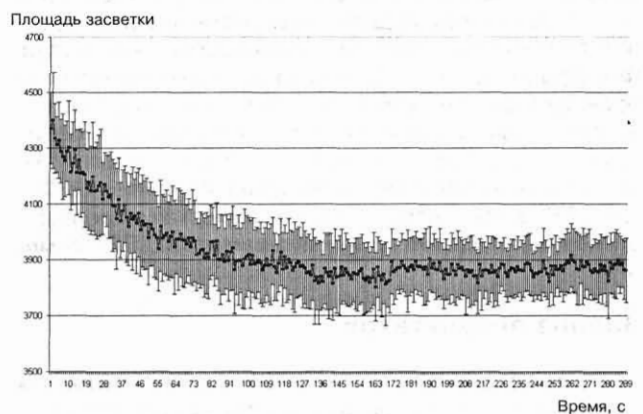
Описанная выше последовательность обработки динамических изображений реализована авторами в комплексе специализированных компьютерных программ.

### Методика и цели исследования

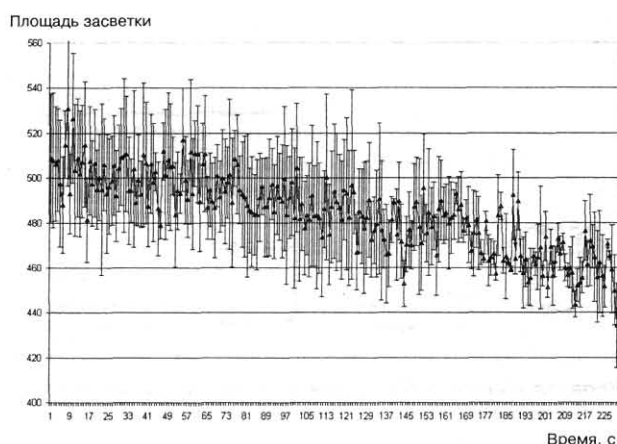
Целью настоящего анализа явилось следующее.

1. Исследование с помощью динамической ГРВ-графии особенностей характеристик процесса ГРВ проводящих жидкостей (сильных электролитов) во времени. Это дополняет результаты статистического анализа параметров одиночных ГРВ-изображений [3].

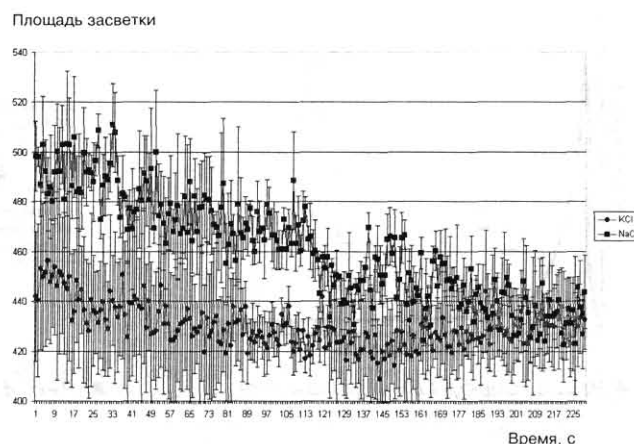
2. Исследование особенностей динамики ГРВ-грамм слабо проводящих жидкостей, что позволяет выявлять различия между образцами, имеющими близкий химический состав. В исследовании слабо проводящие жидкости были представлены маслами натурального и синтетического происхождения и органического происхождения, а также маслами, имеющими различия в оптической активности, месте получения и способе обработки. Всего рассматривалось 42 пары масел.



■ Рис. 5. Зависимость площади засветки тест-объекта от времени



■ Рис. 6. Зависимость площади засветки ГРВ раствора NaCl от времени



■ Рис. 7. Зависимость площади засветки от времени для растворов NaCl и KCl

Воспроизводимость данной методики была продемонстрирована на примерах исследования тест-объекта — сплава из титана, имеющего форму цилиндра, и раствора KCl. Для каждого объекта было сделано по 30 измерений. На рис. 5 и 6 видно, что погрешность измерения в каждой точке временных серий составляет не более 5 %.

Изучаемые в настоящей работе временные ряды параметров ГРВ изображений представляют собой изменения параметра площади засветки и средней интенсивности изображения во времени. Данные параметры были выбраны в силу наименьших значений погрешностей, при нахождении среднего значения временного ряда для выборки измерений одного исследуемого объекта, а также наибольшей чувствительности к свойствам исследуемого объекта при разрешении  $160 \times 120$  пикселей. Получение изображений указанного разрешения диктовалось возможностями технического обеспечения.

В силу малой частоты дискретизации (30 Гц) по сравнению с частотой подаваемых на объект импульсов (1000 Гц) для выявления значимых различий временных рядов характеристик ГРВ-грамм жидкостей были исследованы детерминированные составляющие тренды (или только низкочастотные составляющие) методом сравнения усредненных временных серий по соответствующим выборкам исследуемых жидкостей. Фильтрация шума и сглаживание временного ряда проводились методом скользящего среднего. При одновременном анализе нескольких временных серий случайного процесса для средних значений в различные моменты времени использовался критерий Фишера [5]. Была построена математическая модель для описания поведения трендов параметров ГРВ-грамм.

## Анализ результатов

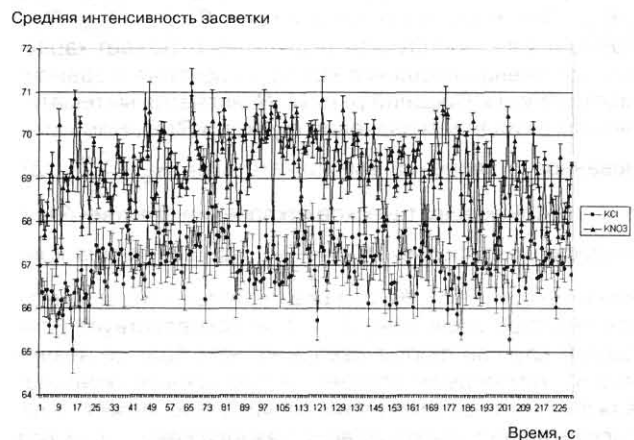
**Анализ данных по исследованию сильных электролитов.** Как показано в работе [3], параметры ГРВ-грамм сильных электролитов имеют различия не при всех концентрациях растворов. При одноно-

мальных разведениях растворов NaCl и KCl соответствующие средние по выборкам одиночных ГРВ-грамм не имеют статистически значимых различий.

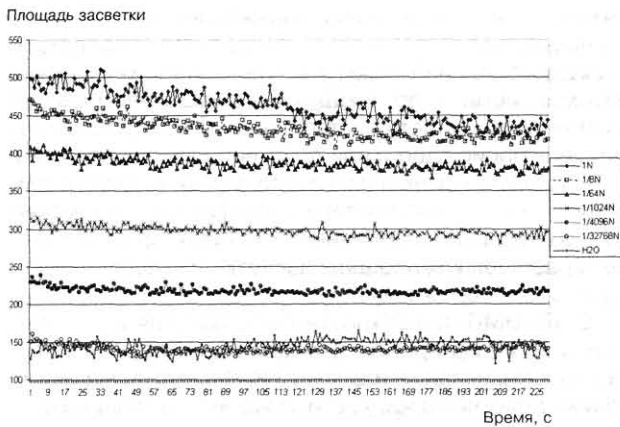
Анализ соответствующих детерминированных составляющих временных серий площадей засветок ГРВ-грамм показал, что данные растворы имеют статистически значимые различия, которые начинают проявляться примерно после третьей секунды начала воздействия ЭМП (рис. 7).

В работе [3] при сравнении однонормальных растворов KCl и  $KNO_3$  не было выявлено статистически значимых различий по выборке одиночных ГРВ-грамм. Не видно это различие и при сравнении соответствующих временных серий площади засветки. Однако различия наблюдаются при рассмотрении динамики другого параметра — средней интенсивности засветки (рис. 8).

Вид трендов для высоких концентраций растворов электролитов принципиально отличается от вида тренда для дистиллированной воды. В первом случае тренд имеет вид монотонно убывающей функции,



■ Рис. 8. Зависимость средней интенсивности засветки ГРВ от времени для растворов KCl и  $KNO_3$



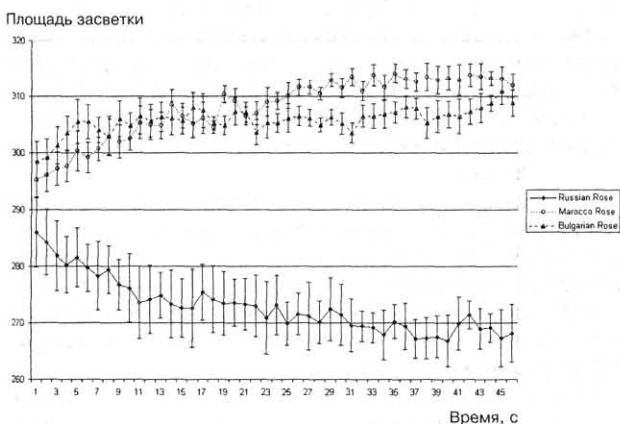
■ Рис. 9. Зависимость площади засветки ГРВ от времени для различных разбавлений раствора NaCl и дистиллированной воды

а во втором — монотонно возрастающей функции. Оказалось, что тренд площади засветки для растворов электролита меняет свое направление при разбавлении  $2^{-14}$ , при котором соответствующие усредненные временные серии не имеют значимых различий с усредненными временными сериями дистиллированной воды (рис. 9).

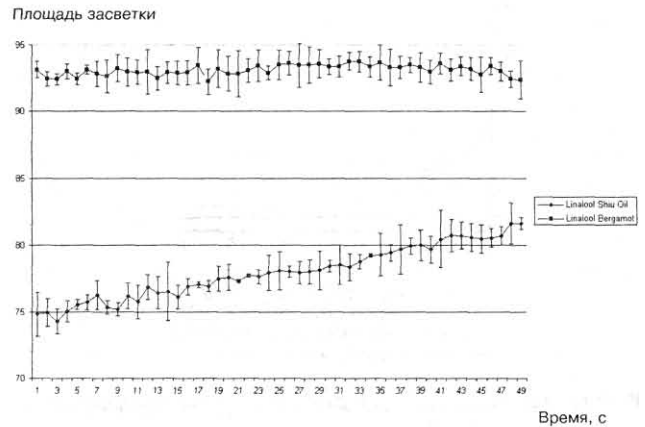
Надо отметить, что одно из основных отличий сильно проводящих жидкостей от слабо проводящих проявляется в виде тренда функции площади засветки от времени. Эта же закономерность наблюдается и в случае с такими слабо проводящими жидкостями, как эфирные масла.

**Анализ данных по исследованию масел.** Из более чем 60 видов рассмотренных масел только у трех тренды имели вид убывающей функции. Однако, в отличие от сильно проводящих жидкостей, у них отмечена квазилинейная временная зависимость площади засветки и небольшая скорость изменения тренда (малый угол наклона).

Метод динамической ГРВ-графии имеет большое преимущество в исследовании слабо проводящих жид-



■ Рис. 10. Зависимость площади засветки ГРВ для масел розы различного происхождения



■ Рис. 11. Зависимость площади засветки ГРВ для масел Linalool Shiu Oil и Linalool Bergamot

костей перед стандартной съемкой одиночных ГРВ-грамм.

На рис. 10 видно, что площади засветки одинаковы в начальный момент для масел Marocco, Russian и Bulgarian Rose. Однако менее чем через секунду тренды начинают разбегаться во времени и становятся статистически значимо различимы. В то же время для некоторых масел усредненные временные серии по площади засветки не имеют значимых различий в течение всего времени регистрации ГРВ процесса, но имеют различия по значениям средней интенсивности. Эта группа масел представлена Linalool Shiu Oil и Linalool Bergamot (рис. 11).

### Математическая модель

Для описания поведения системы жидкость—плазма газового разряда—ЭМП необходимо смоделировать наблюдаемые изменения в данной системе. В рамках математического описания задача сводится к динамическому представлению процессов ГРВ жидкофазных объектов. При построении модели нужно учитывать три основных вида направлений для трендов: монотонно убывающие, монотонно возрастающие и периодические. Первым двум удовлетворяет общее решение уравнения Бесселя

$$z^2 u'' + zu' - (z^2 + v^2)u = 0 \quad (1)$$

в виде

$$u_v(z) = d_1 I_v(z) + d_2 K_v(z), \quad (2)$$

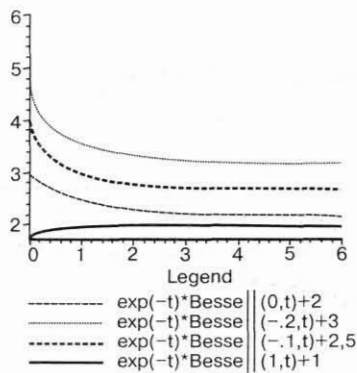
где  $I_v(z)$  и  $K_v(z)$  — модифицированные функции Бесселя первого и второго рода.

Заменой переменной  $z \rightarrow i\tilde{z}$  уравнение (1) переходит в

$$z^2 u'' + zu' + (z^2 - v^2)u = 0, \quad (3)$$

общим решением которого является

$$u_v(z) = c_1 J_v(z) + c_2 Y_v(z), \quad (4)$$



■ Рис. 12. Функции  $f(z)$  для различных коэффициентов  $a$  и  $B$

где  $J_\nu(z)$  и  $Y_\nu(z)$  — функции Бесселя первого и второго рода.

Решение (4) имеет вид периодической функции при различных параметрах  $\nu \in R$ . Следовательно, условиям направления трендов удовлетворяют решения уравнений Бесселя (1) и (3), переходящие друг в друга заменой переменной  $z \rightarrow iz$ . Однако наиболее точное поведение описывает следующая функция, включающая в себя функции Бесселя:

$$f(z) = y(z) + B, \quad (5)$$

$$y(z) = Ae^{ax}u_\nu(\eta z), \quad (6)$$

где  $a, A, B \in R$  и параметр  $\eta = 1, i \in C$  соответствует решениям первого (1) и второго (3) уравнений Бесселя.

Обобщая доводы в пользу использования функций Бесселя и вида функции (5), приведем более общее уравнение, решением которого является функция  $y(z)$ :

$$z^2 y'' - (2ax - 1)xy' + [(a^2 + \eta^2)x^2 - \nu^2 - ax]y = 0. \quad (7)$$

Функция (5) показала высокую степень корреляции с полученными временными рядами параметров ГРВ изображений.

Например, на рис. 12 изображена функция (5) со значениями  $A = d_1 = \eta = 1, a = -1, d_2 = 0$  и  $\nu = 0; -0,2; -0,1; 1, B = 2; 3; 2,5; 1$ . Из графика видно, что зависимость функции  $y(z)$  при различных параметрах  $a$  и  $B$  соответствует зависимости площади засветки от времени при различных разведениях электролитов.

### Обсуждение результатов

Для адекватного описания полученных результатов необходимо разобраться во всем комплексе физико-химических процессов, проходящих в системе жидкость—плазма газового разряда (ГР) — ЭМП.

После пробоя возникает канал плазмы в парах исследуемой жидкости, в котором генерация химически активных частиц происходит в газовой фазе под действием электронов, ускоряемых полями, характерными для импульсных разрядов. Прохождение тока разряда через жидкость приводит к возникновению на границах раздела плазма — раствор скачков потенциала, следствием чего является перенос через границу раздела фаз из раствора в плазму нейтральных и за-

ряженных частиц (эмиссия заряженных частиц). Действие разряда на растворы электролитов сопровождается диссоциацией молекул растворителя. Химические взаимодействия образующихся активных частиц ведут к изменению свойств раствора в целом. Подобные изменения происходят и при действии разряда на масла.

Поскольку изменения в исследуемой жидкости приводят к изменению состава и конфигурации плазмы, то это вызывает изменение таких характеристик газового разряда, как площадь засветки и средняя интенсивность изображения.

Силы ЭМП, поверхностного натяжения и гравитации, а также испарение, давление и температура влияют на образование и форму ГР. Физико-химические взаимодействия в жидкости, плазме и на границе раздела фаз с указанными силами и испарением определяют динамику ГР, а следовательно, и структуру временных серий площади засветки ГР.

В результате бомбардировки раствора инжестируемые из плазмы энергичными ионами происходит ионизация и диссоциация молекул воды с образованием радикалов  $H^\cdot, OH^\cdot$  и сольватированных электронов. Это приводит к генерации и накоплению в растворе пероксида водорода  $H_2O_2$ . Следует также учитывать возможность образования ионов  $NO_2^\cdot$ . Однако известно, что спектры поглощения всех исходных исследованных растворов, а также пероксида водорода и нитрит-ионов лежат в области длин волн  $\lambda < 254$  нм. Оптический спектр экспериментальной установки составляет 400–800 нм. Поэтому возникновение указанных соединений не может определять формирование ГРВ-грамм. Однако, при исследовании масел возможна генерация и накопление других соединений со спектром поглощения, совпадающим со спектром регистрируемым оптической системой. Такие соединения могут явиться причиной убывания тренда площади засветки ГРВ-грамм исследуемого масла.

Известно, что в открытой неустойчивой, нелинейной и неравновесной системе могут возникать периодически повторяющиеся структуры. Предполагая, что под влиянием импульсного ЭМП и последующих физико-химических взаимодействий в жидкости возникают периодические структуры с суммарным диполем, изменяющим значения скачков потенциала на границах раздела плазма — жидкость, логично предположить, что плазма ГР будет синхронно реагировать на соответствующие периодические изменения. Такие изменения должны отражаться на спектральных функциях временных серий площади засветки ГРВ-грамм. Однако для получения высоковоспроизводимых спектральных функций необходимо иметь большую частоту дискретизации.

Можно предположить, что описанные в работе тренды являются низкочастотными компонентами ГРВ процессов. Таким образом, воспроизводимые различия временных серий, как различных концентраций электролитов, так и масел различного происхождения проявляются за счет специфической самоорганизации исследуемых жидкостей.

Математическая модель, выбранная на основании видеоизмененной функции Бесселя, отражает волновую природу исследуемых ГРВ процессов. Такое описание позволяет приписать параметру  $\nu$  значение

внутренней частоты системы, что соответствует определенному энергетическому уровню ее состояния, а также интерпретировать параметр  $a$  в выражении (6) как коэффициент возбуждения ( $a > 0$ ) или затухания ( $a < 0$ ).

## Выводы

1. Динамическая ГРВ-графия позволила выявить различия во временных характеристиках проводящих жидкостей, не отличающихся по параметрам одиночных ГРВ-грамм. Было выявлено разведение  $2^{-14}$ , при котором пропадает различие между растворами электролитов и дистиллированной водой.

2. При исследовании слабо проводящих жидкостей, имеющих близкий химический состав, из 42 пар масел в 33 были выявлены статистически значимые отличия по отдельным методам анализа. В десяти случаях были выявлены статистически значимые различия как по площади засветки, так и по средней интенсивности свечения. В 12 случаях различия были найдены только по площади засветки, в 11 случаях — по средней интенсивности засветки.

3. Очевидно, что только совместное использование различных методов ГРВ анализа позволит достоверно и статистически значимо выявлять различия параметров химически близких жидкостей.

4. Исследование как проводящих, так и слабо проводящих жидкостей показало, что рассмотренный метод позволяет выявлять статистически значимые различия при сравнении широкого спектра жидкостей.

Различия проявляются в изменении вида детерминированных составляющих временных рядов площади засветки и средней интенсивности ГРВ-грамм. Получаемые данные позволяют выявлять свойства исследуемых объектов, которые не проявляются при исследовании статических изображений. Продемонстрирована высокая воспроизводимость метода динамической ГРВ-графии.

5. Математическая модель динамики ГРВ процессов позволяет описывать получаемые данные с помощью новых параметров, соответствующих представлению различных видов исследуемых систем, с учетом лежащих в основе процесса волновых свойств.

6. Основываясь на принципах стандартной ГРВ-графии, динамическая ГРВ-графия позволяет выявлять дополнительные свойства объектов за счет измерения и анализа временных рядов параметров ГРВ-свечения во времени.

## Литература

1. **Коротков К. Г.** Основы ГРВ биоэлектрографии. — СПб.: Изд-во СПбГИТМО, 2001.
2. **Ultra High Dilutions — Physiology and Physics.** (Endler, Ed. Kluuiver Acad. Pub., 1994.
3. **Skarja M., Berden M., Jerman J.,** J.Appl.Phys., 84, 2436, 1998.
4. **Korotkov K., Korotkin D.,** J.Appl.Phys., 89, 4732, 2001.
5. **Fisher R. A.** Statistical Methods for Research Workers (6th ed.). Edinburgh: Oliver and Boyd, 1936.