

УДК 533.9.072, 551.594.223

## Экспериментальное исследование долгоживущих плазмоидов

**Федоров И.С.**, студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Плазменные энергетические установки»*

**Дробышев А.М.**, студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Плазменные энергетические установки»*

**Котоврасов Е.Ю.**, студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Плазменные энергетические установки»*

*научный руководитель: Камруков А.С., к.т.н., доцент  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Плазменные энергетические установки»*

[kamrukov@bmstu.ru](mailto:kamrukov@bmstu.ru)

### **Введение**

Явление возникновения плавающего светящегося сферического объекта в атмосфере во время грозы известно человечеству уже не первую сотню лет. Этот объект был назван шаровой молнией.

В начале двадцать первого века группа российских ученых предприняла попытку пролить свет на тайну этого явления – они получили аналог шаровой молнии в лабораторных условиях [1].

Известно, что шаровая молния возникает в грозу, когда на улице влажно и между облаками и землей проскакивает молния, поэтому за основу моделируемого процесса были взяты вода и протекающий через нее разряд.

Плазмоиды – лабораторные аналоги шаровой молнии, которые интересны тем, что могут помочь лучше понять процессы, происходящие при появлении и жизни этого природного явления. Фотография лабораторного плазмоида приведена на рис. 1.



Рис.1. Плазmoid

Возможная структура аналога шаровой молнии описана в [2]. Плазmoid состоит из паров воды и большого количества ионов. Основными являются ионы  $H^+$  и  $OH^-$ . Гидратированные ионы и молекулы воды образуют долгоживущие кластеры, которые и являются основой плазмoида.

Подробные исследования плазменного объекта представлены в [1–4]. Характерные времена жизни плазмoида составляют сотни микросекунд и колеблются в диапазоне от 100 мс до 1 с. Время жизни зависит от материала электродов, примесей в воде и многих других факторов. Скорость плазмoида и его размеры могут быть разными. Они зависят от энергии, вложенной в процесс образования плазменного объекта. Температура плазмoида определялась методом ультразвукового зондирования. Она уменьшается с 2800 К до 700–600 К в течение его времени жизни.

В настоящей работе на установке, аналогичной [1], проведены исследования плазмoида и определены излучательные и яркостные характеристики генерируемых плазменных образований. Представлены фотографии и динамические характеристики плазмoидов, полученных для разных емкостей конденсаторной батареи. По этим данным можно судить о процессе образования плазмoида и его движении в воздухе при различных уровнях энергозатрат в разряд. Получен спектр плазмoида и идентифицированы его наиболее характерные линии.

#### **Экспериментальный стенд и методика измерений**

Экспериментальная установка для получения плазмoидов (рис. 2) состоит из двух медных электродов и полиэтиленовой емкости с рабочим объемом 3 литра, заполняемой водопроводной водой. Для увеличения проводимости в воду добавляли кристаллы соли NaCl с концентрацией 2 г/л, что обеспечивало удельную электрическую проводимость раствора  $\sigma = 460 \text{ мкСм/см}$ . Центральный электрод установки подключен к отрицательному полюсу конденсаторной батареи и заземлен. На дне емкости находился кольцевой электрод из меди, который подключен к положительному полюсу

конденсаторной батареи. Конденсаторная батарея собрана из конденсаторов ИК 6-150 с максимальным рабочим напряжением 6 кВ. Емкость батареи варьировалась от 150 мкФ до 450 мкФ. Конденсаторная батарея коммутировалась с электродной системой с помощью воздушного тригatrona. Характерное время разряда конденсаторной батареи при запасенной энергии  $W_0 = 2025$  Дж составило 50 мс.

Центральный цилиндрический электрод из меди диаметром 6 мм окружен кварцевой трубкой, герметизация которого осуществлялась с помощью силиконового герметика. Трубка возвышалась над электродом на 4 мм и над поверхностью воды на 5 мм. Для получения плазмоида на центральный электрод наносили несколько капель воды, и при срабатывании разрядника из электрода с хлопком вылетала плазменная струя, от которой отделялось автономное плазменное образование.

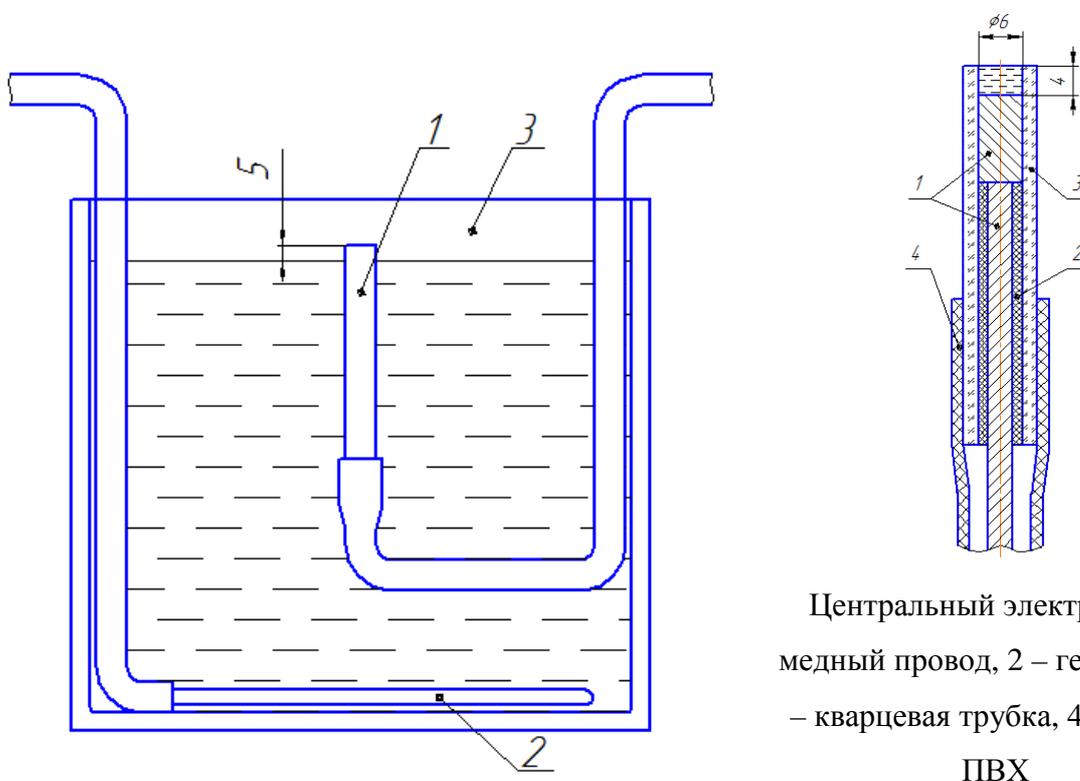


Рис. 2. Генератор плазмоидов:

- 1 – центральный электрод, 2 – кольцевой электрод,  
3 – полиэтиленовая емкость

Для измерения напряжения использовался делитель напряжения, подключаемый к полюсам конденсаторной батареи. Съемка плазмоида производилась с помощью цифровой камеры Casio EXILIM EX-F1 с возможностью скоростной съемки до 1200 кадр/с.

Спектрально-энергетические и яркостно-излучательные характеристики источников оптического излучения измерялись с помощью измерительно-диагностического комплекса «Спектр-03», который имеет 2 калиброванных фотоэлектрических приемника, регистрирующих излучение с длиной волны  $550 \pm 15$  нм и  $1000 \pm 15$  нм.

Датчики регистрировали спектральную облученность  $\varepsilon_\lambda$  [Вт/(см<sup>2</sup> · нм)] в плоскости входного зрачка. По полученному значению облученности и известному расстоянию до источника  $L$  рассчитывали спектральную силу излучения  $I_\lambda$ :

$$I_\lambda = \varepsilon_\lambda \cdot L^2, \text{ Вт/(ср} \cdot \text{нм)}.$$

Световую освещенность и силу света определяли по показаниям фотоприемника на длине волны 550 нм по формулам:

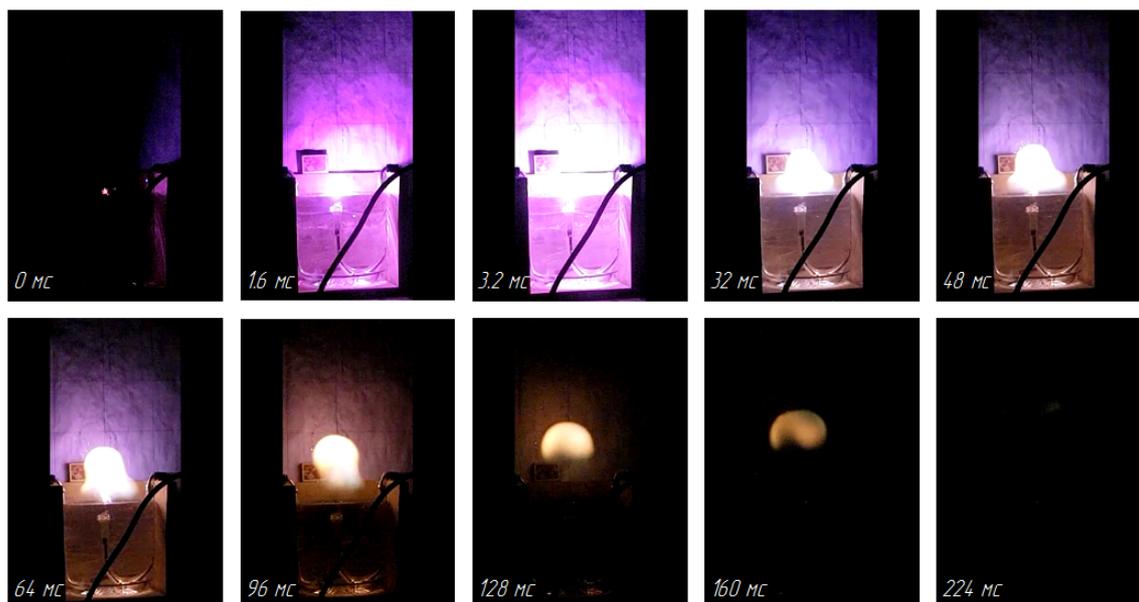
$$E_{\text{св}} \approx 6.83 \cdot 10^8 \cdot \varepsilon_\lambda, \text{ лк};$$

$$I_{\text{св}} \approx 683 \cdot I_\lambda \cdot \Delta\lambda, \text{ кд},$$

где  $\Delta\lambda = 100$  нм – полуширина спектрального диапазона видности [5].

#### Динамика развития разряда

На рис. 3 представлены фотографии динамики развития разряда и формирования плазмоида, полученные при различных энергиях, запасаемых конденсаторной батареей ( $W_0 = 675 - 2025$  Дж).



а)



б)



в)

Рис. 3. Динамика развития разряда и формирования плазмоида при различных запасаемых энергиях  $W_0$ :

а)  $W_0 = 2025$  Дж, б)  $W_0 = 1350$  Дж, в)  $W_0 = 675$  Дж

Динамические и геометрические параметры плазмоида определены при обработке кадров скоростной съемки

Результаты отображены на графиках (рис. 4 и 5). Приведены временные зависимости высоты подъёма верхней границы  $H$  и поперечного размера  $d$  плазмоидов от

времени  $t$  для различных запасаемых энергий. Расстояние отсчитывалось от поверхности воды.

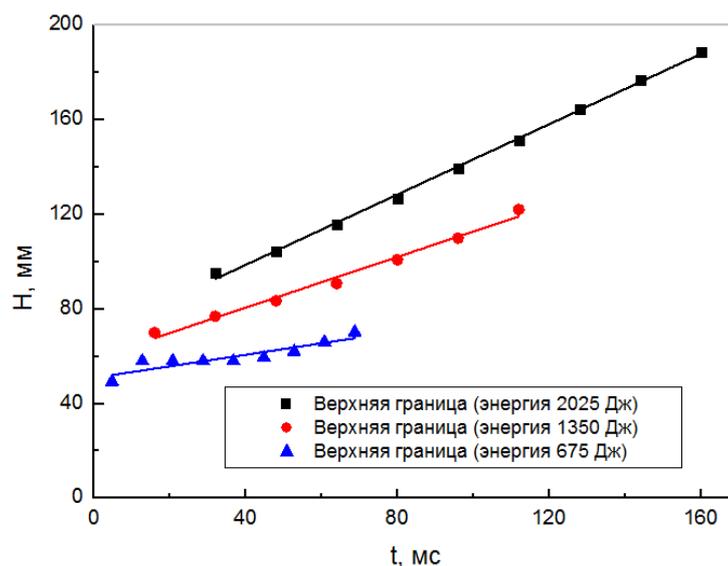


Рис. 4. Перемещение верхних границ плазмоидов

При  $W_0 = 2025$  Дж плазмоид поднялся на высоту  $\sim 180$  см от поверхности воды, при этом его поперечный размер составлял  $\sim 12$  см (см. рис. 7).

Характерные скорости подъема плазмоидов составляют  $v \approx 0.74, 0.53$  и  $0.24$  м/с при  $W_0 = 2025, 1350$  и  $675$  Дж соответственно.

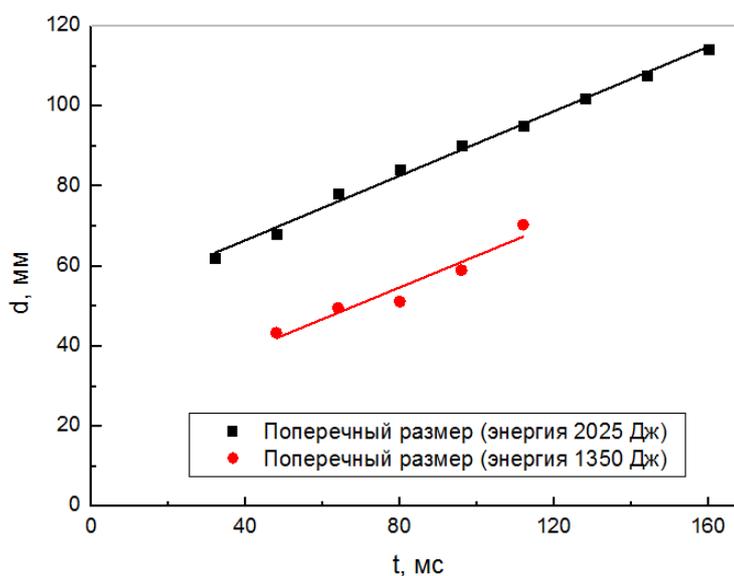


Рис. 5. Поперечные размеры плазмоидов

При энергии конденсаторной батареи 2025 Дж и 1350 Дж и  $t \geq 60$  мс наблюдалось расширение плазменного шара и последующее образование вихревого кольца.

Максимальный поперечный размер плазмоида составляет  $d = 114$  мм при  $W_0 = 2025$  Дж и  $d = 70$  мм при  $W_0 = 1350$  Дж.

При энергии конденсаторной батареи 675 Дж образование вихревого кольца плазмоида не происходило, поэтому максимальный поперечный размер наблюдался в начальной стадии жизни плазмоида (0-20 мс), далее его размер уменьшался. Максимальный поперечный размер плазмоида при  $W_0 = 675$  Дж составил  $d = 43$  мм.

На рис. 6 представлены зависимости газодинамических параметров плазмоида от энергии конденсаторной батареи, такие как время жизни, скорость, высота подъема и поперечный размер.

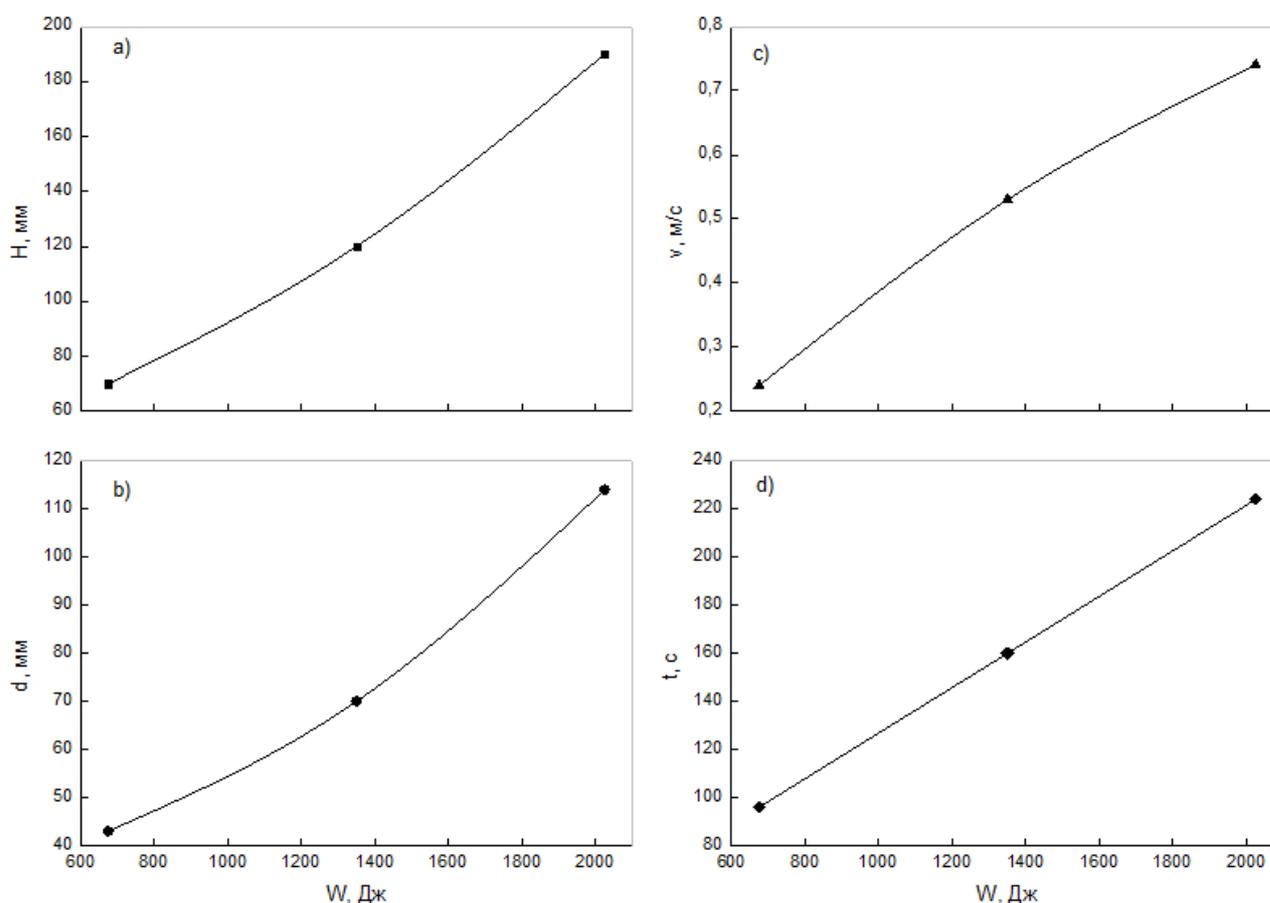


Рис. 6. Зависимость параметров плазмоида от запасаемой электрической энергии: а) высота подъема, б) поперечный размер, с) скорость, д) время жизни

Время жизни плазмоида определялось по кадрам скоростной видеосъемки и составляло  $\sim 230$  мс для  $W_0 = 2025$  Дж от инициации разряда до прекращения свечения, при этом длительность автономной фазы (т.е. фазы без внешнего подвода энергии) составляла  $\sim 180$  мс.

### Излучательные характеристики плазменного образования

На рис. 7 приведены осциллограммы импульсов излучения разряда в видимой  $\lambda = 550$  нм и ближней ИК  $\lambda = 1000$  нм областях при запасенной электрической энергии  $W_0 = 2025$  Дж.

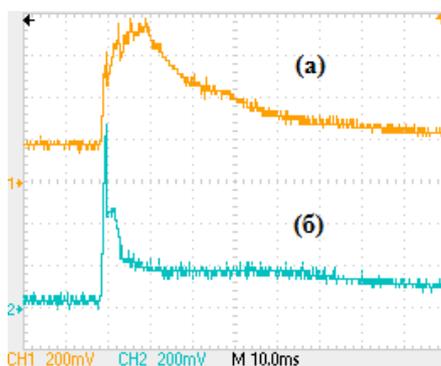


Рис. 7. Осциллограммы сигналов с фотоприемного комплекса «Спектр-03» на  $\lambda = 550$  нм (а) и  $\lambda = 1000$  нм (б) с разверткой 10 мс на клетку

А на рис. 8 приведен результат обработки сигналов в виде спектральных силы излучения и силы света.

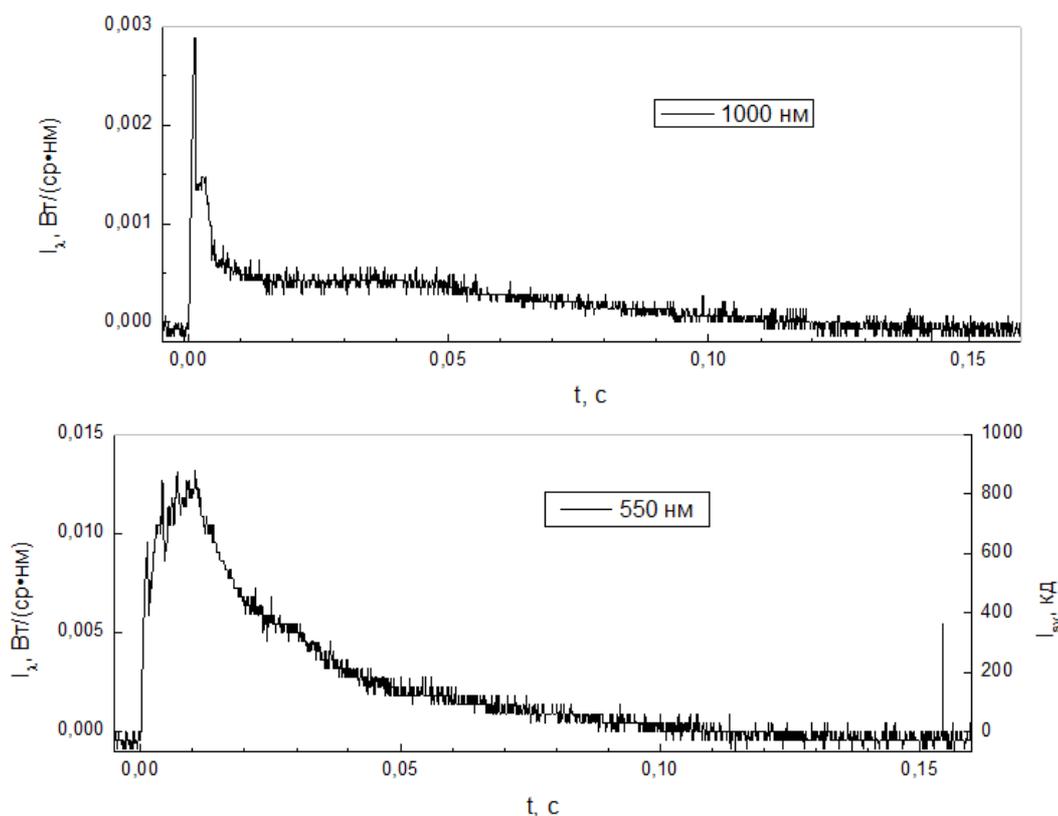


Рис. 8. Спектральные сила излучения и сила света разряда при  $W_0 = 2025$  Дж

Максимальная сила излучения наблюдалась в начальной, токовой стадии разряда ( $t = 0 - 50$  мс). Для различных реализаций спектральная сила излучения на  $\lambda = 550$  нм

составляла  $I_\lambda = 10 - 13$  мВт/(ср · нм) , что соответствовало силе света  $I_{sv} = 700 - 900$  кд. При этом максимум излучения в ИК области не соответствовал по времени максимальному излучению в видимом диапазоне, что, по-видимому, связано с присутствием сильных линий, приходящихся на видимую область (см. далее). В автономной фазе ( $t = 50 - 100$  мс) наблюдался монотонный спад излучения, и максимальная сила света составила  $I_{sv} = 50 - 100$  кд, что сопоставимо с силой света лампы накаливания мощностью 60 Вт.

С помощью спектрометра Solar ТП получены спектры излучения плазмоида в УФ и видимой областях излучения. На рис. 9 представлен спектр излучения разряда.

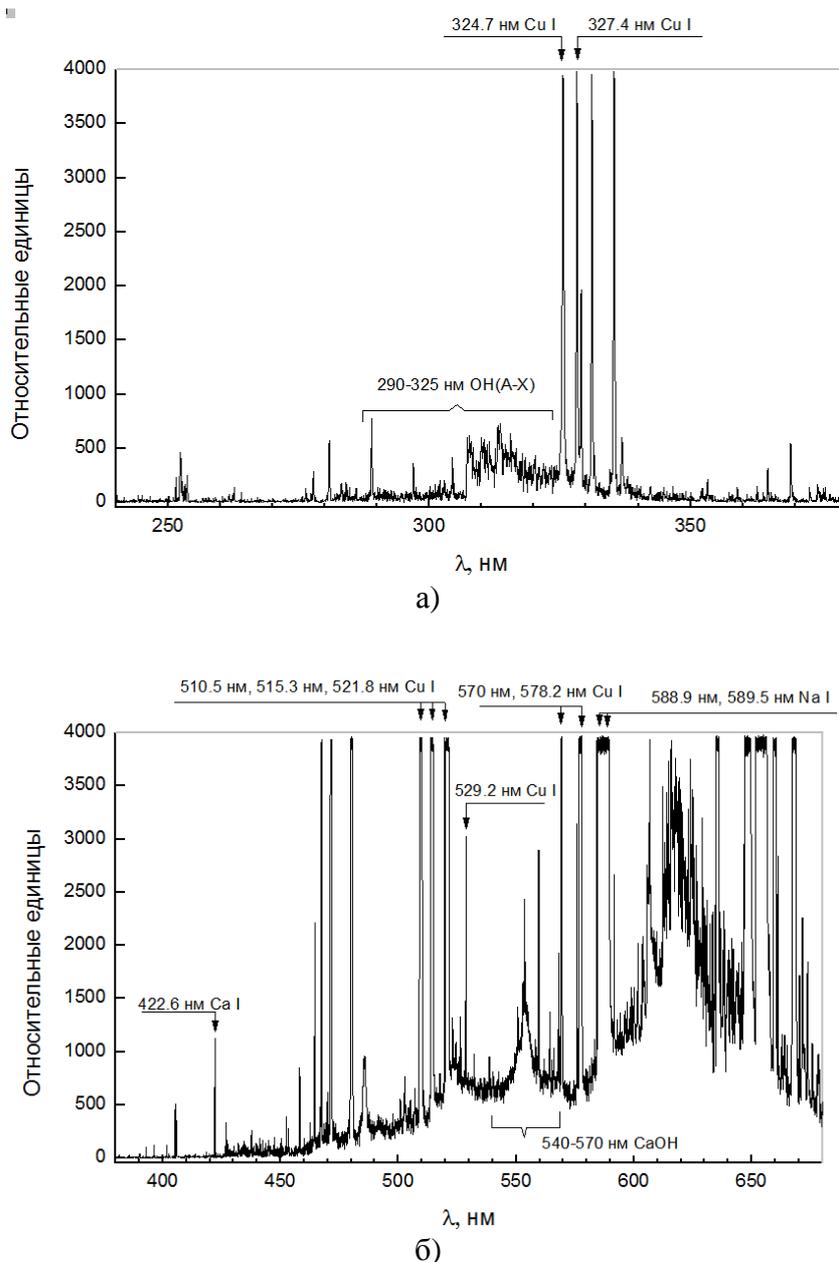


Рис. 9. Спектр излучения:

а) УФ область; б) видимая область

В УФ области наблюдались линии возбужденных атомов меди (324.7 нм и 327.4 нм), а также молекулярная полоса, соответствующая ОН с  $\lambda = 290 - 325$  нм.

В видимой области присутствуют линии возбужденных атомов меди (510.5 нм, 515.3 нм, 521.8 нм, 529.2 нм, 570.3 нм и 578.2 нм), натрия (588.9 нм и 589.5 нм), молекулярная полоса, предположительно, гидроксида кальция (540-570 нм) и возбужденный атом кальция (422.6 нм).

**Заключение.** В работе приведены результаты экспериментального исследования долгоживущих плазменных образований – плазмоидов, формирующихся в атмосферных электрических разрядах по поверхности воды. На характеристики плазмоида существенно влияет энергия, запасенная в конденсаторной батарее. При энергии  $W_0 = 2025$  Дж скорость плазмоида составляла 0.7 м/с, время жизни плазмоида – 0.2 с, высота подъема – 180 мм, поперечный размер – 110 мм.

В результате измерения излучательные характеристики плазменного образования показано, что максимальная сила излучения достигалась в токовой фазе разряда и составляла на  $\lambda = 550$  нм  $I_\lambda = 13$  мВт/(ср · нм), что соответствовало силе света  $I_{sv} = 900$  кд. Сила света автономного плазменного образования соизмерима с силой света лампочки накаливания мощностью 60 Вт.

В спектре разряда присутствуют сильные линии материала электрода меди, натрия, а также молекулярные полосы гидроксила (290-325 нм) и гидроксида кальция (540-570 нм).

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ ведущих научных школ № НШ 1314.2014.8.

### Список литературы

1. Егоров А.И., Степанов С.И. Долгоживущие плазмоиды – аналоги шаровой молнии, возникающие во влажном воздухе // ЖТФ. 2002. Т. 72. № 12. С. 102-104.
2. Егоров А.И., Степанов С.И. Свойства короткоживущих шаровых молний, полученных в лаборатории // ЖТФ. 2008. Т. 78. № 6. С. 15-19.
3. Степанов С.И. Ультразвуковое зондирование плазмоида // ЖТФ. 2014. Т. 84. №1. С. 109-114.
4. Versteegh A., Behringer K., Fantz U., Fussmann G., Jüttner B., Noack S., Long-living plasmoids from an atmospheric water discharge, Plasma Source Sci. Technol. Vol. 17. No. 2. P. 1–8, 2008. DOI: 10.1088/0963-0252/17/2/024014.

5. Камруков А.С., Кулебякина А.И. Инженерные методы расчета импульсных ксеноновых ламп: учеб. пособие / под ред. Н.П. Козлова. М.: ООО НИЦ «Инженер» (Союз НИО), 2010. 222 с.