

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,  
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 537.525 + 541.15

**ИСТОЧНИК НЕКАНЦЕРОГЕННОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ С НАКАЧКОЙ ТЛЕЮЩИМ РАЗРЯДОМ В СИСТЕМЕ  
ЭЛЕКТРОДОВ “МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ ИГОЛКА–ПОВЕРХНОСТЬ ВОДЫ”**

© 2013 г. А. К. Шуайбов, М. П. Чучман, Л. В. Месарош, И. А. Грабовая

*Ужгородский национальный университет  
Украина, 88000, Ужгород, ул. Пидгирна, 46*

*E-mail: shuaibov@univ.uzhgorod.ua*

Поступила в редакцию 15.01.2013 г.

Приводятся результаты оптимизации газоразрядного источника неканцерогенного ультрафиолетового излучения на электронно-колебательных переходах продуктов диссоциации молекул (или малых кластеров) воды и молекул азота. Накачка лампы осуществлялась тлеющим разрядом атмосферного давления в воздухе над поверхностью дистиллированной воды.

DOI: 10.7868/S0032816213060128

**ВВЕДЕНИЕ**

Тлеющие разряды атмосферного давления в воздухе, которые зажигаются между твердым металлическим электродом и поверхностью воды или электролита, находят в последнее время все более широкое применение в технологиях нанесения защитных покрытий, очистке питьевой воды, синтезе металлических наночастиц и др. [1–3]. Менее изученными остаются применения тлеющего разряда атмосферного давления над поверхностью воды, перспективные для генерации ультрафиолетового (у.ф.) излучения, особенно в “неканцерогенной” области длин волн  $\lambda = 300–400$  нм, которая широко используется в фотобиологии и фотомедицине. В этом спектральном диапазоне наиболее мощными и эффективными у.ф.-излучателями являются лампы на эксиплексных молекулах, излучающие на длине  $\lambda = 308$  нм  $\text{XeCl}(\text{В} \rightarrow \text{X})$  и  $351(3)$  нм  $\text{XeF}(\text{В} \rightarrow \text{X})$ , возбуждение которых осуществляется с помощью емкостного или барьерного разряда [4]. Но эти лампы имеют низкий ресурс работы в газостатическом режиме работы, а их рабочая среда включает дорогостоящий инертный газ – ксенон. В отличие от газоразрядных эксиплексных ламп, которые излучают преимущественно одну широкую  $\text{В} \rightarrow \text{X}$ -полосу галогенида инертного газа, ранее были исследованы лампы, рабочей средой которых служили молекулы азота и продукты диссоциации воды, – источники у.ф.-излучения на основе полос молекул  $\text{N}_2(\text{С} \rightarrow \text{В})$  и  $\text{ОН}(\text{А} \rightarrow \text{X})$ . Так, в работе [5] описаны характеристики точечного импульсно-периодического источника у.ф.-излучения на переходах молекулы азота (при давлении до 0.4 МПа) с длительностью импульсов излучения  $\tau < 0.6$  нс, который возбуждался при

помощи релаксационного генератора с накопительной емкостью на отрезках коаксиальных линий при расстоянии между вольфрамовыми электродами  $d = 0.5–1.0$  мм. Однако распыление материала электродов в процессе работы лампы приводит к напылению его на изолирующие диэлектрические поверхности, что ограничивает ресурс работы источника.

Подобные проблемы устраняются при использовании емкостного и барьерного разрядов в лампах на молекулах азота или продуктах деструкции молекул воды [68]. При этом газоразрядная плазма воздуха кроме излучения в у.ф.-области спектра обладает еще и сильными антимикробными свойствами.

Возможности использования непрерывного тлеющего разряда атмосферного давления для разработки мощного точечного источника излучения в спектральном диапазоне 300–400 нм мало исследованы, хотя такие разряды устойчиво горят и при большом среднем токе ( $\geq 0.1$  А) [9]. Для области умеренных токов тлеющего разряда с жидким катодом ( $I = 10–100$  мА) спектральные характеристики плазмы исследовались в работах [10–14]. Но большинство таких экспериментов проводилось при небольшом расстоянии между заостренным наконечником металлического игольчатого электрода и поверхностью воды ( $d \sim 0.5–2.0$  мм;  $d$  – расстояние между электродами: металлическими или металлическим и жидким). Возможности использования излучения плазмы паров воды и воздуха для разработки у.ф.-излучателя ранее не обсуждали. Для оптимизации работы такой лампы требуются исследования у.ф.-излучения тлеющего разряда при разном расстоянии  $d$  между электродами и различной высоте столба воды  $h$

над поверхностью металлического электрода, а также ряда других характеристик разряда.

В данной работе приведены результаты оптимизации источника неканцерогенного у.ф.-излучения с накачкой постоянным тлеющим разрядом в воздухе атмосферного давления между металлической иглой и поверхностью дистиллированной воды.

### ЭКСПЕРИМЕНТ

Схема макета у.ф.-излучателя приведена на рис. 1. Он состоит из кварцевой трубки диаметром  $D = 30$  мм и высотой  $H = 50$  мм (кварц марки КВ, не пропускающий жесткое у.ф.-излучение с длиной волны  $\lambda \leq 270$  нм). Игольчатый анод (А) и металлическая пластина (К) установлены в фторопластовых втулках, герметизирующих разрядный объем. Пластина К помещена в дистиллированную воду так, что ее поверхность может находиться на разных расстояниях от поверхности воды ( $h = 1.5-7.5$  мм). Межэлектродное расстояние  $d$  варьировалось в диапазоне 2–10 мм. На анод через балластное сопротивление подавали напряжение положительной полярности, а электрод К заземляли. Ток разряда мог варьироваться в диапазоне 1–50 мА.

Для анализа спектрального состава излучения плазмы использовали монохроматор МДР-2 (с решеткой 1200 штрихов/мм) и фотоумножитель ФЭУ-106. Более детально установка для исследования тлеющего разряда с жидким электродом описана в [15].

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБСУЖДЕНИЕ

Фотографии излучения разряда при среднем токе 34 мА и разном расстоянии между металлическим анодом и поверхностью воды  $d$  и уровнем воды  $h$  над металлическим электродом, погруженным в воду, приведены на рис. 2 (1–4). Фотографии разряда при разной величине тока и оптимальных значениях  $d$  и  $h$  показаны на рис. 3 (1–3).

Из этих результатов следует, что оптимальное межэлектродное расстояние составляет примерно  $d = 6-8$  мм, а высота столба воды над электродом, установленным в воде,  $h = 1.5-2.5$  мм. Высокая интенсивность излучения газоразрядной плазмы атмосферного давления и ее пространственная однородность наблюдались начиная с токов  $I = 20-22$  мА. При  $d > 8$  мм зажигание тлеющего разряда было нестабильным.

Увеличение тока разряда приводило к переходу от конусообразного сечения разрядного объема к эллипсоидальному, а повышение уровня воды над металлическим электродом — к уменьшению общей интенсивности излучения плазмы. При росте тока разряда диаметр катодного пятна

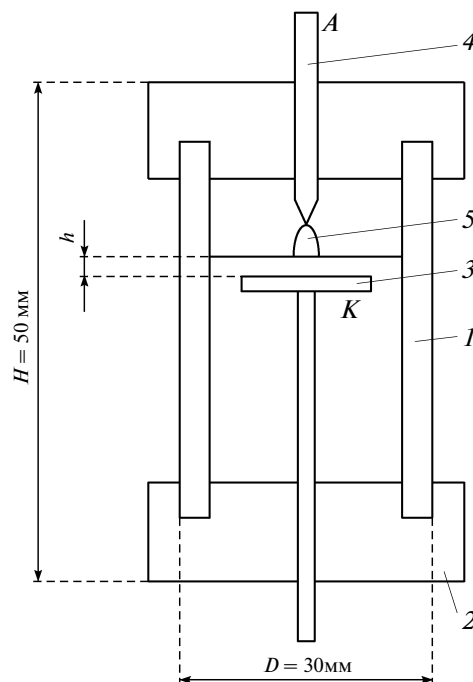


Рис. 1. Конструкция газоразрядного у.ф.-излучателя. 1 – кварцевая трубка; 2 – втулка из фторопласта; 3 – катодная пластина из нержавеющей стали; 4 – игольчатый анод из нержавеющей стали; 5 – плазма разряда.

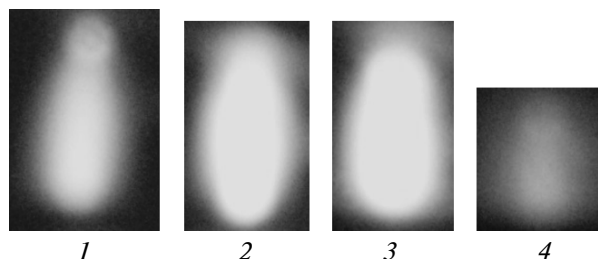


Рис. 2. Фотографии разряда с жидким катодом при токе разряда 34 мА: 1 – межэлектродное расстояние  $d = 10$  мм при уровне воды над металлическим электродом  $h = 1.5$  мм; 2 –  $d = 8$  мм,  $h = 3.5$  мм; 3 –  $d = 6$  мм,  $h = 5.5$  мм; 4 –  $d = 4$  мм,  $h = 7.5$  мм.

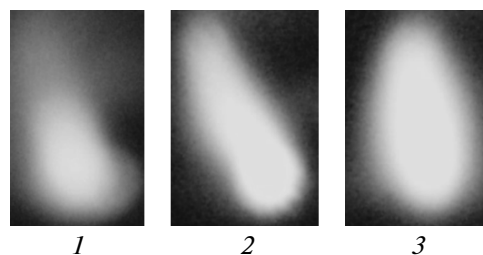


Рис. 3. Фотографии разряда над поверхностью воды при разных токах (1 – 12, 2 – 22 и 3 – 32 мА) и  $d = 8$  мм,  $h = 2$  мм.

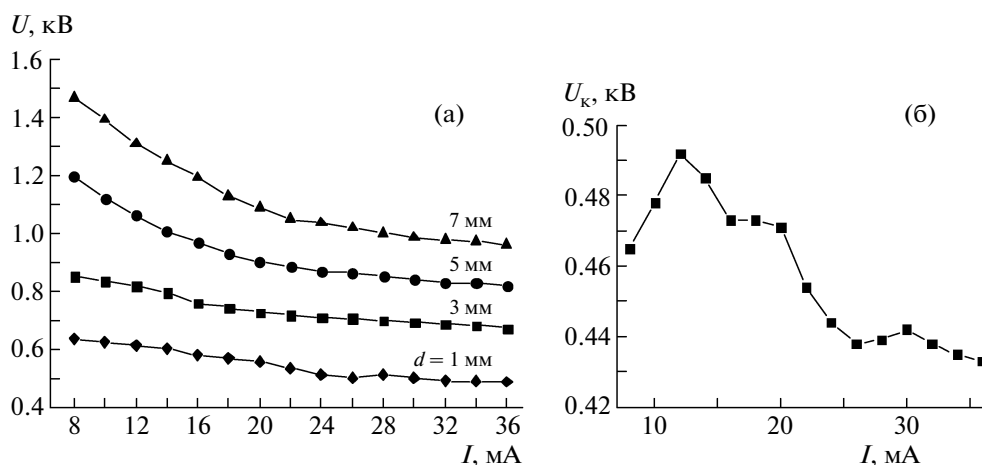


Рис. 4. а — вольт-амперные характеристики источника при различном межэлектродном расстоянии  $d$ ; б — зависимость катодного потенциала для тлеющего разряда с жидким катодом от тока разряда.

на поверхности дистиллированной воды уменьшался.

На рис. 4 представлены вольт-амперные характеристики (в.а.х.) тлеющего разряда атмосферного давления и зависимость величины катодного потенциала  $U_k$  от тока. По форме в.а.х. разряда с жидким катодом соответствовали переходу от поднормальной стадии обычного тлеющего разряда низкого давления с металлическими электродами (при  $I \sim 1-5$  мА) до его нормальной стадии ( $I \geq 10$  мА). Качественно они согласуются с в.а.х., полученными в [11, 12]. Увеличение межэлектродного расстояния с 1 до 7 мм при токе разряда в диапазоне 20–30 мА приводило к росту напряжения устойчивого горения разряда от 0.5 до 1.1 кВ. Максимальная электрическая мощность разряда не превышала 35 Вт.

Поднормальная стадия тлеющего разряда была наиболее выраженной при сравнительно больших межэлектродных расстояниях  $d \geq 5$  мм.

Когда анодом была поверхность дистиллированной воды, вид в.а.х. практически не изменялся, но напряжение устойчивого горения разряда в рабочем диапазоне токов 20–35 мА уменьшалось до 0.3–0.6 кВ соответственно.

Значение катодного потенциала  $U_k$  с ростом тока от 2 до 12 мА увеличивалось от 0.46 до 0.49 кВ, а при дальнейшем росте тока оно уменьшалось до  $U_k = 0.43$  кВ (при  $I \geq 30$  мА).

Таким образом, в разряде данного типа положительные ионы (предположительно это ионы кислорода  $O_2^+$  или протоны), бомбардирующие поверхность воды с энергией 0.4–0.5 кВ, вызывали неравновесное испарение воды, попадание гидратированных электронов в плазму и ряд других явлений, которые происходят как на межфазной границе “газ — жидкость”, так и в объеме жидкого катода [16–19]. Спектральные характе-

ристики плазмы тлеющего разряда исследованы при  $d = 8$  мм (рис. 5). В спектрах излучения зарегистрированы наиболее интенсивные полосы  $2^+$ -системы молекулы азота, среди которых преобладали полоса  $\lambda = 337.1$  нм  $N_2(C-B; 0-0)$  и широкая неразрешенная полоса в спектральном диапазоне 303–316 нм, связанная с излучением продуктов диссоциации молекул воды или малых кластеров воды. Более коротковолновое излучение разряда (например,  $\lambda = 247.8$  нм  $NO(^2\Sigma^-2\Pi)$ ) отсекалось стенками колбы излучателя, изготовленной из кварца, непрозрачного в спектральном диапазоне 190–270 нм (хотя излучение полос  $NO$  хорошо наблюдалось при изготовлении колбы излучателя из кварца марки КУ).

Увеличение тока разряда от 12 до 32 мА приводило к перераспределению интенсивности излучения полос продуктов диссоциации воды (рис. 5б), что проявлялось в смещении максимумов интенсивности отдельных полос в длинноволновую область спектра. Подобное поведение излучения в этом спектральном диапазоне, связано, по-видимому, с увеличением плотности паров воды при больших токах разряда аналогично тому, что наблюдалось как в продольном тлеющем разряде на смеси  $He-H_2O$  при повышенной плотности паров воды ( $\sim 2$  кПа) [20], так и в барьерном разряде в капельно-воздушной среде [21]. В этих случаях излучение плазмы в спектральном диапазоне 303–316 нм может быть интерпретировано как излучение малых кластеров на основе гидроксильной группы ( $OH_n^*$ , где  $n \geq 2$ ). Дополнительным подтверждением кластерного механизма излучения плазмы паров воды (при их повышенной плотности) служило наблюдение малоинтенсивной широкой бесструктурной полосы излучения в видимой области длин волн [21].

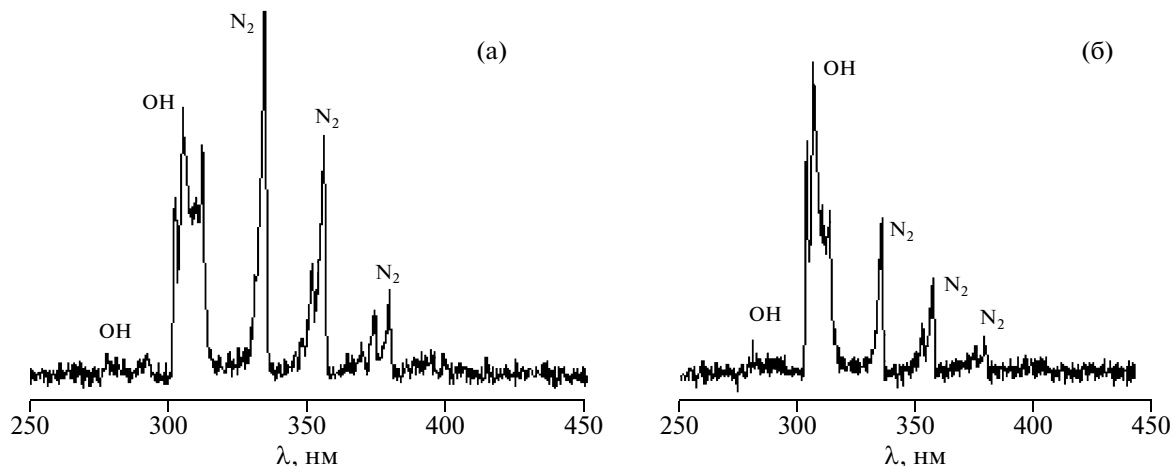


Рис. 5. Спектры излучения разряда при токах 12 мА (а) и 32 мА (б).

Увеличение тока разряда приводило к сильному перераспределению интенсивности неканцерогенного у.ф.-излучения (рис. 6). При этом интенсивность излучения полос молекулы азота уменьшалась, а превалирующим становилось излучение продуктов деструкции паров воды в спектральном диапазоне  $\Delta\lambda = 303\text{--}316\text{ нм}$ .

Изучение характеристик искрового разряда над поверхностью воды в замкнутом объеме при атмосферном давлении воздуха показало, что кислород быстро “выгорает”, а плотность молекул азота изменяется незначительно на протяжении довольно большого времени (~100 ч) [22]. Это создает предпосылки для разработки отпаянных излучателей на молекулах азота и продуктах распада паров воды [23, 24].

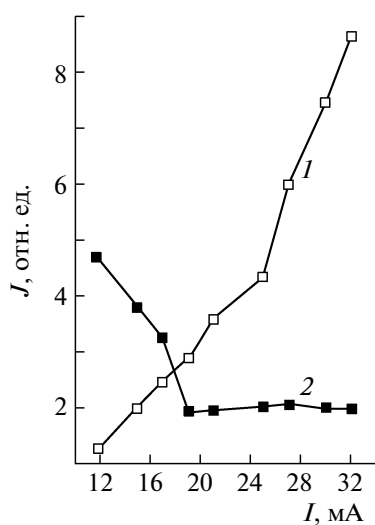


Рис. 6. Зависимости интенсивности  $J$  излучения на длине волны  $\lambda = 306.4\text{ нм}$  (1) и  $\lambda = 337.1\text{ нм}$  (2) от тока разряда.

Коэффициент полезного действия излучателей на молекулах азота и радикалах гидроксила не превышает 0.25% [25]. Это позволяет, учитывая умеренный максимальный энергозатрат в разряд над поверхностью воды, оценить максимальную среднюю мощность излучателя:  $W_{cp} = 35 \cdot 0.0025\text{ Вт} = 87.5\text{ мВт}$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, проведенные эксперименты показали, что на основе тлеющего разряда атмосферного давления в воздухе над поверхностью дистиллированной воды может быть разработана экологически чистая лампа – источник у.ф.-излучения с недорогой рабочей средой, работающая на продуктах диссоциации паров воды в спектральном диапазоне 303–316 нм при токах разряда 30–35 мА. При меньших токах спектр излучения лампы расширяется за счет полос 2<sup>+</sup>-системы молекулы азота.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гайсин М.Ф., Сон Э.Е. Электрические процессы в разрядах с твердыми и жидкими электродами. Свердловск: Изд-во Уральского ун-та, 1988.
2. Гайсин А.Ф., Абдуллин И.Ш., Гайсин М.Ф. Струйный многоканальный разряд с электролитическими электродами в процессах обработки твердых тел. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2006.
3. Richmonds C., Sankaran R.M. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. P. 131501.
4. Шуайбов О.К., Шевера И.В., Шимон Л.Л., Соснін Е.А. Сучасні джерела ультрафіолетового випромінювання: розробка і застосування. Ужгород–Томськ: Вид. УжНУ “Говерла”, 2006.
5. Ермалицкий Ф.А., Залесский И.Е. // Журн. прикл. спектроскопии. 1983. Т. 38. № 4. С. 550.

6. Авдеев С.М., Соснин Э.А. // Оптика и спектроскопия. 2009. Т. 106. № 1. С. 14.
7. Шуаибов А.К., Миня А.И., Гомоки З.Т., Грицак Р.В. // Оптика и спектроскопия. 2013. Т. 114. № 2. С. 42.
8. Шуаибов А.К., Миня А.И., Гомоки З.Т. и др. // Опт. журн. 2012. Т. 79. Вып. 8. С. 96.
9. Connolly J., Valdramidis V.P., Byrne E.A. et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2013. V. 46. P. 035401.
10. Соскида М.-Т.І. // Наук. вісник. Ужгородського ун-та. Сер. Фізика. 2004. Вип. 16. С. 54.
11. Bruggeman P., Lin J., Degroote J. et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. V. 41. P. 215201.
12. Чумадова Е.С., Шиканова Т.Г., Рыбкин В.В., Титов В.А. // Химия и химическая пром-сть. 2008. Т. 51. Вып. 11. С. 29.
13. Захаров А.Г., Максимов А.И., Титова Ю.В. // Успехи химии. 2007. Т. 76. № 3. С. 260.
14. Поляков О.В., Бадалян А.М., Бахтурова Л.Ф. // Химия высоких энергий. 2009. Т. 43. № 3. С. 2325.
15. Месарош Л.В., Шуаибов О.К., Чучман М.П. // Наук. вісник. Ужгородського ун-та. Сер. Фізика. 2012. Вип. 32. С. 82.
16. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Физматлит, 1987.
17. Поляков О.В., Бадалян А.М., Бахтурова Л.Ф. // Исследовано в России. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/222.pdf>
18. Никифоров А.Ю. // Химия высоких энергий. 2008. Т. 42. № 3. С. 272.
19. Максимов А.И., Хлюстова А.В. // Химия высоких энергий. 2009. Т. 43. № 3. С. 195.
20. Mezei P., Cserfalvi T. // Appl. Spectr. Rev. 2007. V. 42. P. 573.
21. Шуаибов А.К., Шимон Л.Л., Дащенко А.И., Шевера И.В. // Физика плазмы. 2001. Т. 27. № 10. С. 951.
22. Корнев М.И., Яворский Н.А., Иванов Г.Ф. и др. // Изв. Томск. политех. ун-та. 2003. Т. 306. № 5. С. 78.
23. Генерал А.А., Кельман В.А., Жменяк Ю.В., Шпенник Ю.О. // ПТЭ. 2010. № 4. С. 98.
24. Авдеев С.М., Соснин Э.А., Смирнов А.А. и др. // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22. № 8. С. 818.
25. Орлов А.М., Явтушенко И.О., Боднарский Д.С. // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 3. С. 75; 2013. Т. 83. Вып. 3. С. 54.