

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ  
ПЛАЗМОХИМИЯ

УДК 544.43

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ВОДЫ, ВОЗНИКАЮЩАЯ  
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ

© 2019 г. Н. А. Аристова<sup>а</sup>, И. М. Пискарев<sup>б, \*</sup>

<sup>а</sup>Уральский Федеральный университет (УрФУ) имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Нижнетагильский технологический институт (филиал)

622031, Нижний Тагил Свердловской обл., ул. Красногвардейская, д. 59, Россия

<sup>б</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

119234, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2, Россия

\*E-mail: i.m.piskarev@gmail.com

Поступила в редакцию 14.11.2018 г.

После доработки 12.12.2018 г.

Принята к публикации 25.12.2018 г.

DOI: 10.1134/S0023119319030021

Вода, активированная плазмой электрического разряда, представляет интерес с точки зрения применения при производстве продуктов питания, поэтому ее характеристики обсуждаются в литературе [1]. Современное состояние исследований, посвященных плазме электрического разряда, рассмотрено в работе [2].

Излучение плазмы импульсного электрического разряда производит в воде сильный химический эффект [3, 4]. В этих работах и в выполненном нами эксперименте импульсный электрический разряд происходил между электродами, удаленными от поверхности воды на значительное расстояние (30 мм). Направленного потока газа из области разряда к обрабатываемому объекту нет. Поэтому продукты, образующиеся в плазме, не могут непосредственно контактировать с водой. Но относительно долгоживущие продукты (окислы азота  $\text{NO}^*$  и  $\text{NO}_2^*$ ) могут диффундировать к поверхности воды и поглощаться в ней. Эти же окислы азота образуются в воде под действием импульсного излучения плазмы. Взаимодействие окислов азота с водой приводит к уменьшению pH [5]. В работе [4] установлено, что энергетические затраты на изменение химического состава воды, приводящего к уменьшению pH, в случае импульсного излучения искрового разряда оказываются меньше, чем при обработке воды скользящим разрядом. Поэтому представляет интерес изучение механизма процессов под действием излучения плазмы, так как использование излучения плазмы в технологических процессах может оказаться более выгодным.

Целью данной работы является изучение электропроводности воды, возникающей под дей-

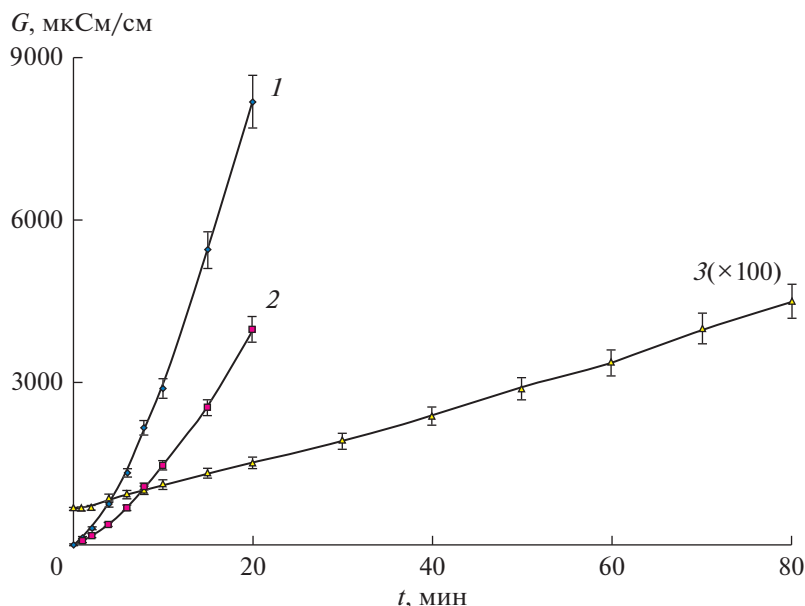
ствием импульсного и непрерывного излучения УФ-С диапазона.

Источником импульсного излучения служил генератор ИР50 [3]. Искровой разряд происходил между твердыми электродами, соединенными с разрядным конденсатором  $C = 680$  пф. На конденсатор через балластное сопротивление 8 МОм подавалось высокое напряжение 11 кВ. При включении высокого напряжения начинался самостоятельный искровой разряд. Полная длительность импульса 5 мкс, передний фронт 50 нс, энергия в импульсе  $8.1 \times 10^{-3}$  Дж, частота повторения импульсов 50 Гц, мощность разряда 0.4 Дж/с. Ток, потребляемый от источника питания, составлял  $0.7 \pm 0.02$  мА.

Использовались два режима. 1) Режим “со светом”, когда прямое направление от области разряда до поверхности жидкости было открыто. При этом на воду действовало как излучение плазмы, так и продукты, образовавшиеся в разряде. 2) Режим “без света”, когда прямое направление на область разряда было перекрыто непрозрачной пластиной, но продукты, образовавшиеся в самом разряде, могли беспрепятственно диффундировать к поверхности воды.

Источником непрерывного излучения служила ртутная лампа низкого давления ДКБ-9, длина волны излучения  $\lambda = 253.7$  нм. Мощность лампы 9 Дж/с. Корпус лампы из увиолевого стекла, не пропускающего излучение с  $\lambda < 200$  нм. Для обеспечения стабильного режима работы лампа прогревалась перед началом измерений 2 ч.

Проводимость воды измеряли кондуктометром Эконикс-Эксперт-002. Объем пробы составлял 5 мл. Использовалась дважды дистиллированная



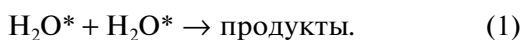
**Рис. 1.** Зависимость проводимости пробы воды ( $G$ , мкСм/см) от времени обработки  $t$ , мин для случаев: 1 – режим “со светом”; 2 – режим “без света”; 3 – излучение ртутной лампы ( $\times 100$ ).

вода, рН 6.5, проводимость  $G = 7-10$  мкСм/см. Расстояние от поверхности воды до области искрового разряда 30 мм, до поверхности ртутной лампы тоже 30 мм.

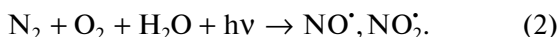
Результаты эксперимента представлены на рисунке. Проводимость после 20 мин обработки составляла: в режиме “со светом”  $8200 \pm \pm 400$  мкСм/см, “без света”  $4000 \pm 250$  мкСм/см, под действием ртутной лампы  $15.5 \pm 0.5$  мкСм/см.

Зависимость от времени при обработке искровым разрядом параболическая, а при обработке излучением ртутной лампы – линейная. Характер зависимости позволяет сделать выводы о механизме реакций образования продуктов. Проводимость воды будет определяться выходом вторичных продуктов. Выход первичных продуктов, из которых образуются вторичные, будет пропорционален времени обработки.

Рассмотрим выход вторичных продуктов в режиме “со светом”. В работе [5] предполагалось, что первичными активными частицами, образующимися в воде под действием излучения, являются возбужденные молекулы воды. На пучке импульсного излучения мгновенная концентрация возбужденных молекул велика, и они могут с заметной вероятностью взаимодействовать между собой:



В присутствии растворенного азота образуются окислы:



Они взаимодействуют в водном растворе:

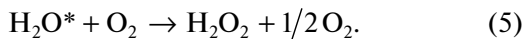
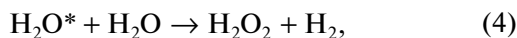


Продукты, образующиеся в реакциях (1) и (3), будут определять проводимость воды. Концентрация молекул воды в реакциях (1) и (3) не меняется. Поэтому выход реакции (1) будет определяться реакцией второго порядка. Если, как предполагалось в работе [5], окислы  $\text{NO}^*$  и  $\text{NO}_2^*$  образуются независимо, то реакция (3) также будет иметь второй порядок. Наблюдаемая зависимость проводимости от времени (рис. 1, кривая 1) подтверждает механизм взаимодействий, предложенный в работе [5].

Рассмотрим выход вторичных продуктов в режиме “без света”. В искровом электрическом разряде, согласно механизма Зельдовича, образуются радикалы  $\text{NO}^*$ , которые в присутствии кислорода окисляются до  $\text{NO}_2^*$ . Поглотившись водой, они взаимодействуют согласно реакции (3). Параболическая зависимость проводимости от времени, наблюдаемая экспериментально (кривая 2) означает, что окислы  $\text{NO}^*$  и  $\text{NO}_2^*$  образуются в области разряда независимо, диффундируют до поверхности воды и поглощаются в ней.

Под действием излучения ртутной лампы проводимость воды увеличивается намного слабее, и проводимость линейно зависит от времени обработки. Под действием ртутной лампы, также как и под действием излучения искрового разряда, образуются радикалы  $\text{HO}_2^*$  и перекись водорода.

Механизм их образования рассмотрен в [6]. В работе [6] образование перекиси водорода идентифицировано непосредственно. Излучение не импульсное. Ввиду малой плотности возбужденных молекул воды они практически не взаимодействуют между собой. Тогда они взаимодействуют с молекулами воды или с растворенным кислородом в реакциях первого порядка (предполагается, что концентрация воды и растворенного кислорода не меняются):



Выход перекиси водорода, которая определяет проводимость воды в этом процессе, должен линейно зависеть от концентрации  $\text{H}_2\text{O}^*$  и от времени обработки. Линейная зависимость наблюдается экспериментально (кривая 3). Таким образом,

выполненный эксперимент подтверждает механизм образования перекиси водорода под действием света, предложенный в работе [6].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Thirumdas R., Kotahakota A., Annapure U., Siliveru K., Blundell R., Gatt R., Valdramidis V.P.* // Trends in Food Science & Technology. 2018. V. 77. P. 21.
2. *Bruggeman P.J., Kushner M.J., Locke B.R. et al.* (41 автор) // Plasma Sources Sci. Technol. 2016. V. 25. 053002 (59 p).
3. *Пискарев И.М., Иванова И.П., Трофимова С.В.* // ХВЭ. 2013. Т. 47. № 5. С. 376.
4. *Пискарев И.М.* // ХВЭ. 2016. Т. 50. № 4. С. 311.
5. *Пискарев И.М., Иванова И.П., Трофимова С.В.* // ХВЭ. 2013. Т. 47. № 2. С. 152.
6. *Пискарев И.М.* // ХВЭ. 2018. Т. 52. № 3. С. 194.