

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО ТОЛЩИНЕ ЖИДКОСТИ ПРОДУКТОВ ОКИСЛЕНИЯ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАНОСЕКУНДНОГО КОРОННОГО СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

И.М. Пискарев¹, В.А. Ушканов¹, Г.М. Спиров²

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ; ² Российский федеральный ядерный центр, научно-исследовательский институт экспериментальной физики

E-mail: piskarev@depni.sinp.msu.ru

The mixing of 10% water solution KI under action nanosecond corona high current electric discharge was investigated. The initial colorization was occurred on the surface of solution by reaction products: molecular iod. Peculiarity of colorization spreading deep into liquid and colorization spreading dependence from experiment condition were discussed.

Введение. Воздействие коротких импульсов электрического разряда с малой частотой повторения на жидкости носит косвенный характер. При большой величине импульсного тока (до десятков ампер) средний ток разряда мал, так что влиянием электродных процессов на изменения в жидкости можно пренебречь. В данной работе рассмотрен случай, когда разряд происходит на воздухе между твердым электродом и поверхностью жидкости. Химически активные частицы генерируются в газовой фазе [1]. На поверхности жидкости эти частицы взаимодействуют с веществами, растворенными в воде. Продукты реакции перемешиваются с жидкостью, на поверхность поступают новые порции не прореагировавшего вещества. В настоящей работе экспериментально изучен процесс распространения продуктов, образующихся под действием сильноточного наносекундного коронного электрического разряда, вглубь жидкости.

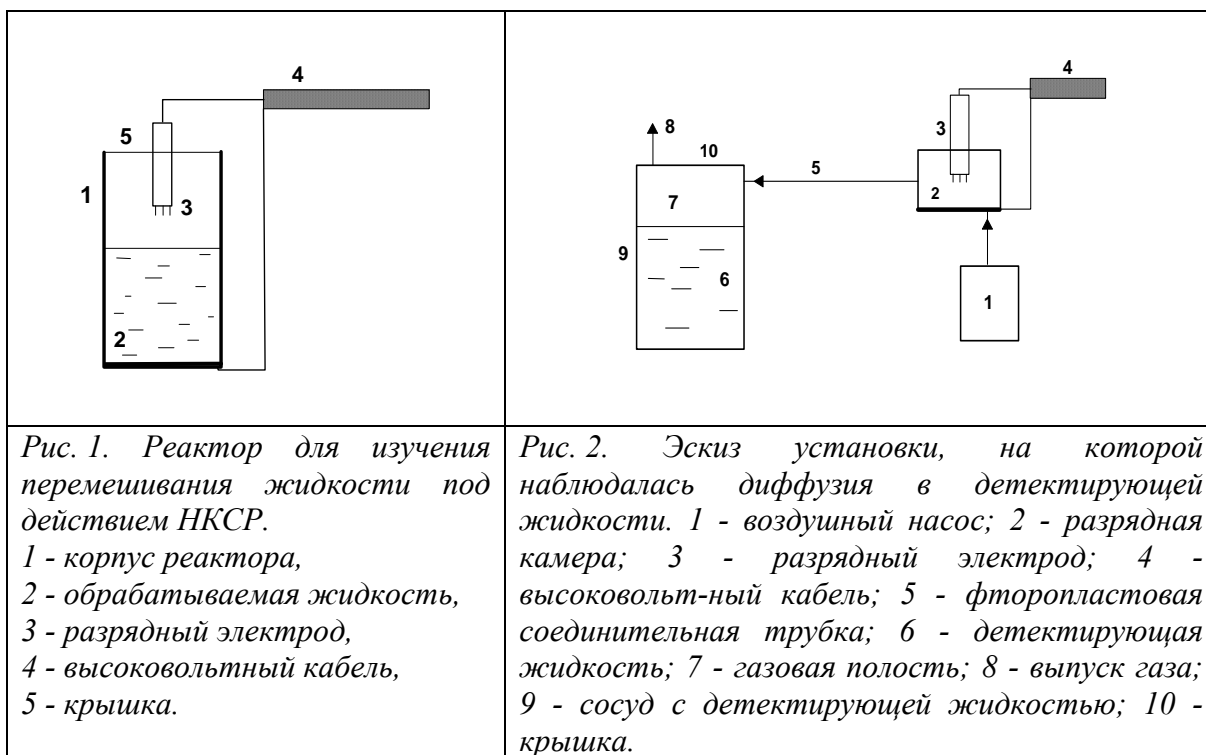
Методика эксперимента. Были выполнены два типа экспериментов:

1) перемешивание жидкости под действием электрического разряда между электродом и поверхностью жидкости; 2) диффузия в жидкости без воздействия электрического разряда. Эти процессы наблюдали в стеклянном реакторе с основанием $9 \times 9 \text{ см}^2$ и высотой 25 см, в который наливали детектирующую жидкость. Электропроводящее дно реактора (алюминиевое) контактировало непосредственно с жидкостью. Во всех экспериментах газовая полость реактора закрывалась крышкой.

В эксперименте 1 на высоте 5,5 см над поверхностью раствора помещали разрядный электрод, к которому по кабелю подводился импульс высокого напряжения амплитудой 75 кВ положительной полярности. Заземленная оплетка кабеля соединялась с алюминиевым дном реактора. При пробое воздушного промежутка возникал наносекундный коронный сильноточный электрический разряд с амплитудой тока 80 А и длительностью импульса 50 – 60 нс. Частота повторения импульсов составляла 1 Гц. Эскиз реактора представлен на рисунке 1.

В эксперименте 2 электрический разряд проводили в отдельном сосуде, расположенном на расстоянии ~ 50 см от сосуда с детектирующей жидкостью (см. рисунок 2). Область разряда продували потоком воздуха (3 л/мин.) и газ из разрядной камеры подавали по трубке в прежний реакционный сосуд.

В качестве детектирующей жидкости использовался 10% водный раствор KI с добавлением крахмала и серной кислоты. Во всех экспериментах в реактор наливали 1,1 л раствора KI, 10 мл 0,5 % раствора крахмала и 10 мл разбавленной (1:5) серной кислоты. Под действием активных частиц, образующихся при электрическом разряде, раствор KI в присутствии крахмала окрашивался в синий цвет. Обработка продолжалась до тех пор, пока вся жидкость становилась равномерно окрашенной и непрозрачной. В первом эксперименте время полного затемнения реактора составляло 53 минуты, во втором - 60 минут. Во время обработки электрическим разрядом реактор периодически фотографировали.



Результаты экспериментов. Разряд над поверхностью жидкости.

Фотографии жидкости в реакционном сосуде на разных стадиях обработки представлены на рис. 3А. В течение первых 20 - 30 секунд на поверхности образуется окрашенный слой. Примерно через минуту появляется первый трек внутри жидкости на глубину ~ 2 см. К поверхности трек перпендикулярен, его конец внутри жидкости изгибается и становится тоньше. Через 2 минуты сам трек становится размытым, от его конца отходят новые треки в глубину, но не перпендикулярно к поверхности. Количество треков, уходящих от поверхности в глубину увеличивается. Важно подчеркнуть, что появление треков происходит не на каждый импульс тока разряда. На глубине 2 - 3 см образуется сплошное затемнение, которое полосами распространяется вниз и достигает дна. При этом верхняя полоса жидкости толщиной ~ 2 см остается в целом

прозрачной, через неё проходят несколько размытых треков. Примерно через час вся жидкость оказывается непрозрачной.

Разряд во вспомогательной камере между твердыми электродами. Результаты эксперимента представлены на рис. 3Б. Реакционный сосуд находится на расстоянии около 50 см от разрядника. Разрядная камера продувается воздухом со скоростью 3 л/мин. Этот воздух поступает в реакционный сосуд, воздух с озоном попадает на поверхность жидкости. Размытое (диффузное) затемнение жидкости начинается с поверхности, постепенно толщина затемненного слоя увеличивается, через 60 минут вся жидкость до дна оказывается непрозрачной.

Итог. Подведём итог описанию экспериментальных результатов. Окрашенные продукты реакции образуются на поверхности жидкости. Диффузия этих продуктов вглубь жидкости характеризуется тем, что толщина окрашенного слоя постепенно увеличивается, заполняя весь сосуд до дна. Граница распространения зоны потемнения параллельна поверхности жидкости и всегда размытая. Под действием электрического разряда над поверхностью жидкости характер распространения окраски существенно отличается от простой диффузии, хотя время затемнения всего объема реактора меняется незначительно по сравнению с чистой диффузией.

Обсуждение. Наблюдались два разных варианта протекания процесса заполнения всего объема жидкости продуктами, образующимися на поверхности. Во всех случаях первая стадия процесса - потемнение поверхностного слоя жидкости.

1. Треки проникают на глубину порядка 2 см, потемнение жидкости происходит на глубине больше 2 см, поверхностный слой толщиной ~ 2 см остается светлым с отдельными темными треками до тех пор, пока не потемнеет вся жидкость глубже 2 см. Только потом темнеет поверхностный слой (рисунок 3А).

2. Толщина темного слоя, образовавшегося на поверхности, постепенно увеличивается, и потемнение заполняет весь объем. Отдельные треки, перпендикулярные поверхности жидкости, не наблюдаются (рисунок 3Б).

Распространение веществ с поверхности вглубь жидкости может быть обусловлено следующими процессами:

- диффузия в направлении градиента концентрации;
- увлечение молекул движением ионов, возникающим под действием электрического тока.

При времени ~ 50 нс электрическая прочность воды больше электрической прочности воздушного промежутка того же размера [2], поэтому при толщине слоя воды ~ 10 см за время длительности импульса разряда пробой воды не происходит. По завершении импульса разряда на поверхности жидкости в точке попадания ионов оказывается заряд Q . Величину заряда можно оценить, исходя из длительности импульса и амплитуды тока разряда. Амплитуда тока составляет 80 А, длительность импульса по основанию 50 нс.

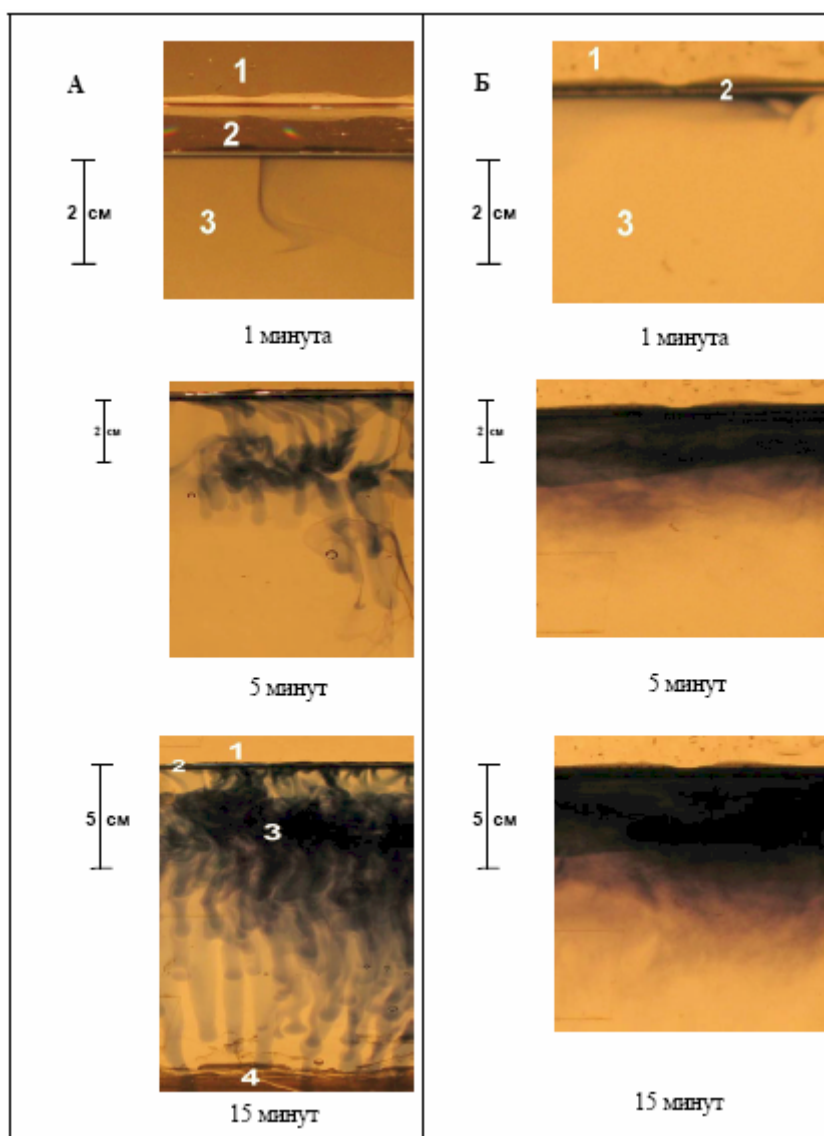


Рис. 3. Распространение продуктов окисления с поверхности вглубь жидкости. А - разряд над поверхностью жидкости. Б - диффузия (см. текст). Цифрами обозначены: 1 - воздух, 2 - поверхность жидкости, 3 - жидкость, 4 - дно реакционного сосуда.

Считая импульс тока разряда треугольным, получим:

$$\Delta q = \frac{1}{2} \cdot 80 \cdot 5 \cdot 10^{-8} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$$

Время стекания заряда с поверхности жидкости определяется емкостью поверхностного слоя относительно дна реакционного сосуда и сопротивлением слоя жидкости. Время движения носителей заряда через слой жидкости толщиной ~ 10 см при напряженности электрического поля $10^3 \div 10^4$ В/см может составить миллисекунды [3].

Таким образом, заряд, попавший на поверхность, будет там некоторое время находиться, и возможен пробой жидкости. Пробой возникает после окончания импульса тока. Образующиеся при пробое пары положительных и отрицательных ионов накапливаются по мере продвижения пробоя внутрь жидкости и экранируют электрический заряд. Поэтому пробой проникает на определенную глубину. Глубина, на которую происходит пробой,

увеличивается с ростом напряженности электрического поля, создаваемого зарядом на поверхности жидкости. Отметим, что пробой имеет определенную вероятность, не равную единице, поэтому треки в жидкости образуются не при каждом импульсе электрического разряда.

Для оценки влияния объемного заряда, который может попасть на диэлектрик, выполнялся дополнительный эксперимент. В тот же сосуд насыпали стеклянные шарики диаметром 3 – 4 мм. Заливали шарики детектирующей жидкостью так, чтобы над уровнем шариков оставался свободный слой жидкости толщиной 4 мм. В этом случае под действием электрического разряда окрашивался только свободный поверхностный слой. Ниже уровня, где шарики соприкасались между собой, никакого потемнения не было. Это означает, что заряд, попадающий на поверхность шариков, препятствовал движению ионов вглубь жидкости.

Выполненные эксперименты означают, что при обработке объекта, наполненного жидкостью, можно создать условия, когда вещества, образующиеся на поверхности, или искусственно введенные на поверхность, будут проникать на глубину больше 2 см, практически не задерживаясь в поверхностном слое.

1. Н.А.Аристова, И.М.Пискарев, А.В. Ивановский, В.Д.Селемир, Г.М.Спиров, С.И.Шлепкин. Инициирование химических реакций под действием электрического разряда в системе твердый диэлектрик - газ - жидкость //Журнал физической химии. 2004. Т. 78. № 7. С. 1326 - 1331.
2. Я.И. Корнев Обработка воды импульсными разрядами в водо-воздушном потоке. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Томский Политехнический университет. Томск, 2005.
3. В.В. Скорчелетти Теоретическая электрохимия. Л.: Государственное научно-техническое издательство химической литературы. 1959. С. 87.