

# ПЕРЕМЕШИВАНИЕ ЖИДКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАНОСЕКУНДНОГО КОРОННОГО СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

Пискарев И. М. (piskarev@depni.sinp.msu.ru) (1), Ушканов В. А. (1),  
Селемир В. Д. (2), Спиров Г.М. (2), Карелин В.И. (2), Шлепкин С. И. (2)  
(1) НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова  
(2) Российский федеральный ядерный центр, РФЯЦ-ВНИИЭФ

Исследовано перемешивание 10 % водного раствора KI под действием наносекундного коронного сильноточного импульсного электрического разряда (НКСР). Амплитуда импульса напряжения составляла 75 кВ, импульса тока 80 А, длительность импульса 50 - 60 нс, частота повторения импульсов 1 Гц. Объем жидкости, в котором изучалось перемешивание, составлял 1,1 л. Под действием электрического разряда прозрачный водный раствор окрашивался, и за ~1 час происходило полное окрашивание всего раствора. Изменения окраски периодически фотографировались. Обсуждаются возможные механизмы распространения окрашенных продуктов, образующихся на поверхности водного раствора, 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.

**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 непрореагировавшего вещества. В настоящей работе экспериментально изучен процесс распространения продуктов, образующихся под действием сильноточного наносекундного коронного электрического разряда, вглубь жидкости.

**Методика эксперимента.** Были выполнены три типа экспериментов:

1) перемешивание жидкости под действием электрического разряда между электродом и поверхностью жидкости; 2) перемешивание жидкости в случае, когда разряд происходит между электродом и заземленной металлической пластиной, находящейся над поверхностью жидкости и не связанной с ней электрически; 3) 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  $\sim 50 - 60$  нс. Частота повторения импульсов составляла 1 Гц. Эскиз реактора представлен на рисунке 1. Исследования проводились для случаев, когда в реакторе была только жидкость, либо в жидкость помещали пробные тела. В качестве пробных тел использовались: изолированный от дна реактора проводник; пластина из диэлектрика такого же размера; электрически соединенный с дном проводник. Место расположения пробных тел обозначено на рисунке 1 цифрой 2. Детально характеристики пробных тел описаны при рассмотрении каждого конкретного опыта.

В эксперименте 2 электрический разряд с теми же параметрами происходил между электродом и алюминиевой пластиной, закреплённой на высоте 3 см над поверхностью детектирующей жидкости (см. рисунок 2). Пластина соединялась с оплёткой кабеля, по которому подавался импульс высокого напряжения. Детектирующая жидкость не имела электрического контакта с высоковольтным кабелем. Алюминиевое дно реактора при этом было электрически изолировано. В пластине 2 (см. рисунок 2) имелись семь отверстий диаметром 8 мм, к тому же пластина не плотно вставлялась в реактор, так что активные частицы, генерируемые при электрическом разряде, могли диффундировать под пластину и контактировать с поверхностью жидкости.

В эксперименте 3 электрический разряд проводили в отдельном сосуде, расположенном на расстоянии  $\sim 50$  см от сосуда с детектирующей жидкостью (см. рисунок 3). 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. Во время обработки электрическим разрядом реактор периодически фотографировали. Длительность обработки разрядом в каждом опыте составляла порядка 1 часа. Время полного окрашивания и затемнения раствора приведено в таблице.

	Условия опыта *)					
	1	2	3	4	5	6
Время полного затемнения	53 мин.	50 мин.	53 мин.	42 мин.	68 мин.	60 мин.

\*) 1, 2, 3, 4 - разряд между электродом и поверхностью жидкости.

1 - жидкость без предметов;

2 - в жидкости изолированный проводник;

3 - в жидкости изолятор;

4 - в жидкости проводник, соединённый с дном реакционного сосуда;

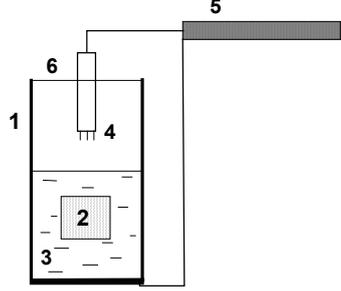
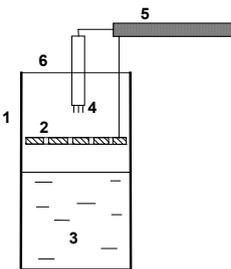
5 - разряд происходит на пластину, поднятую над жидкостью;

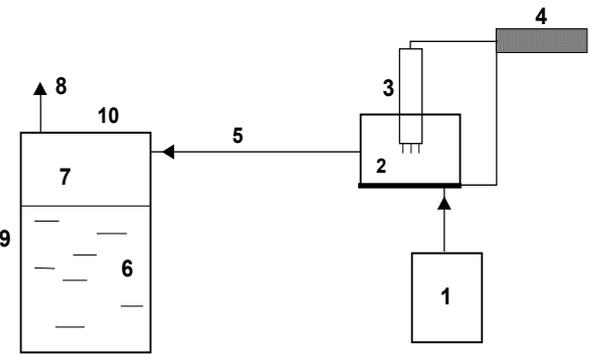
6 - разряд вне камеры, только диффузия.

**Результаты экспериментов.** Эксперименты 1 – 4, приведенные в таблице 1, выполнены в соответствии с блок-схемой представленной на рис. 1.

**Жидкость без предметов.** Фотографии жидкости в реакционном сосуде на разных стадиях обработки представлены на рис. 4. 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

	
<p>Рисунок 1. Реактор для изучения перемешивания жидкости под действием НКСП. 1 - корпус реактора, 2 - место, где располагались вводимые предметы, 3 - обрабатываемая жидкость, 4 - разрядный электрод, 5 - высоковольтный кабель, 6 - крышка.</p>	<p>Рисунок 2. Эскиз реактора, в котором изучалось перемешивание жидкости под действием НКСП между разрядным электродом и алюминиевой пластиной, размещенной над поверхностью воды. 1 - корпус реактора; 2 - алюминиевая пластина; 3 - обрабатываемая жидкость; 4 - разрядный электрод; 5 - высоковольтный кабель, 6 - крышка.</p>

	<p>Рисунок 3. Эскиз установки, на которой наблюдалась диффузия в детектирующей жидкости. 1 - воздушный насос; 2 - разрядная камера; 3 - разрядный электрод; 4 - высоковольтный кабель; 5 - фторопластовая соединительная трубка; 6 - детектирующая жидкость; 7 - газовая полость; 8 - выпуск газа; 9 - сосуд с детектирующей жидкостью, 10 - крышка.</p>
---	--

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.

Время полного затемнения – 53 минуты.

**Внутри жидкости - изолированный проводник** (см. рисунок 5).

Изолированный проводник - диск из алюминия диаметром 6 см толщиной 5 мм, помещён на фторопластовую подставку. Подставка держится на трех алюминиевых ножках. Расстояние от проводника до поверхности жидкости 4 см. Первая стадия изменений - потемнение поверхности жидкости. В начальной стадии обработки четко выраженных треков не образуется, за первую минуту изменения внутри жидкости незаметны. Через примерно 3 минуты становится заметным потемнение верхнего слоя

жидкости толщиной около 2 см. Потом отдельные области темнеют сильно, потемнение носит характер переплетающихся тонких нитей. Через 12 минут слой толщиной 2–3 см затемнен жирными темными полосами. Область потемнения постепенно опускается до уровня изолированного проводника, идет ниже проводника и заполняет всю область. Верхний слой всегда остается густо окрашенным.

Время полного затемнения - 50 минут.

#### **В жидкости - изолятор (см. рис. 6).**

Использовалась та же фторопластовая подставка на проволочных ножках, что и в предыдущем опыте, но на ней никаких предметов не было. Расстояние от изолятора до поверхности жидкости 4,5 см. На первой стадии потемнения жидкости появляются отдельные треки длиной 2–3 см, перпендикулярные поверхности жидкости и изгибающиеся внутри. Густота и толщина треков увеличивается, причем густота треков на глубине более 2 см растет быстрее. Через 21 минуту внутри жидкости полное затемнение, в полосе жидкости толщиной порядка 2 см по-прежнему видны отдельные треки, полного затемнения не происходит. Время полного затемнения – 53 минуты.

**Электрод в виде фланца из нержавеющей стали (проводник), имеющий электрический контакт с дном реактора (см. рис. 7).** Электрод имеет форму кольца, внешний диаметр 8 см, внутренний 4 см. Кольцо приварено к металлической трубе с внутренним диаметром 4 см, внешним - 4,5 см. Труба стоит на дне реактора. Потемнение верхнего слоя жидкости имеет диффузный (размытый) характер, постепенно распространяется от поверхности на глубину. Толщина потемневшего слоя растет, он достигает края металлического предмета и опускается дальше до дна реактора. Время полного потемнения - 42 минуты.

**Заземленный электрод, расположенный выше поверхности жидкости, на который происходит разряд с электрода.** Блок-схема эксперимента приведена на рис. 2, фотографии жидкости на рис. 8. Сначала темнеет поверхность жидкости. Отдельных треков первое время не видно. Примерно через 4 минуты становится заметным почти равномерное слабое затемнение верхнего слоя жидкости толщиной ~ 2 см. Далее затемнение усиливается, преимущественно на глубине больше 2 см. Темные полосы тянутся до дна сосуда. В последнюю очередь темнеет поверхностный слой толщиной ~ 2 см. Время полного затемнения - 68 минут

**Разряд во вспомогательной камере между твердыми электродами (рис. 9).** Блок-схема эксперимента представлена на рис. 3. 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.

Характер распространения окрашенных продуктов, возникающих при электрическом разряде и напоминающий диффузию, наблюдается только в одном случае, когда в жидкость погружена полая металлическая труба с кольцом (фланцем) на конце, ближайшем к поверхности жидкости. В остальных случаях характер распространения окраски существенно отличается от простой диффузии, хотя время затемнения всего объема реактора меняется незначительно по сравнению с чистой диффузией.

**Обсуждение.** Наблюдались три 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 (рисунки 4, 6, 8). Только потом темнеет поверхностный слой.

2. На поверхности образуются треки, их глубина увеличивается, темнеет поверхностный слой до 2 см, потом треки продвигаются глубже и толщина затемнения увеличивается (рисунки 5, 7).

3. Толщина темного слоя, образовавшегося на поверхности, постепенно увеличивается и потемнение заполняет весь объем. Отдельные треки, перпендикулярные поверхности жидкости, не наблюдаются (рисунок 9).

Время затемнения всего объема жидкости в зависимости от условий эксперимента (помещения в объем различных предметов) меняется в пределах 20 – 30 % и составляет около 1 часа.

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 разряда 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. 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. Охарактеризуем с этой точки зрения процессы, наблюдавшиеся в жидкости.

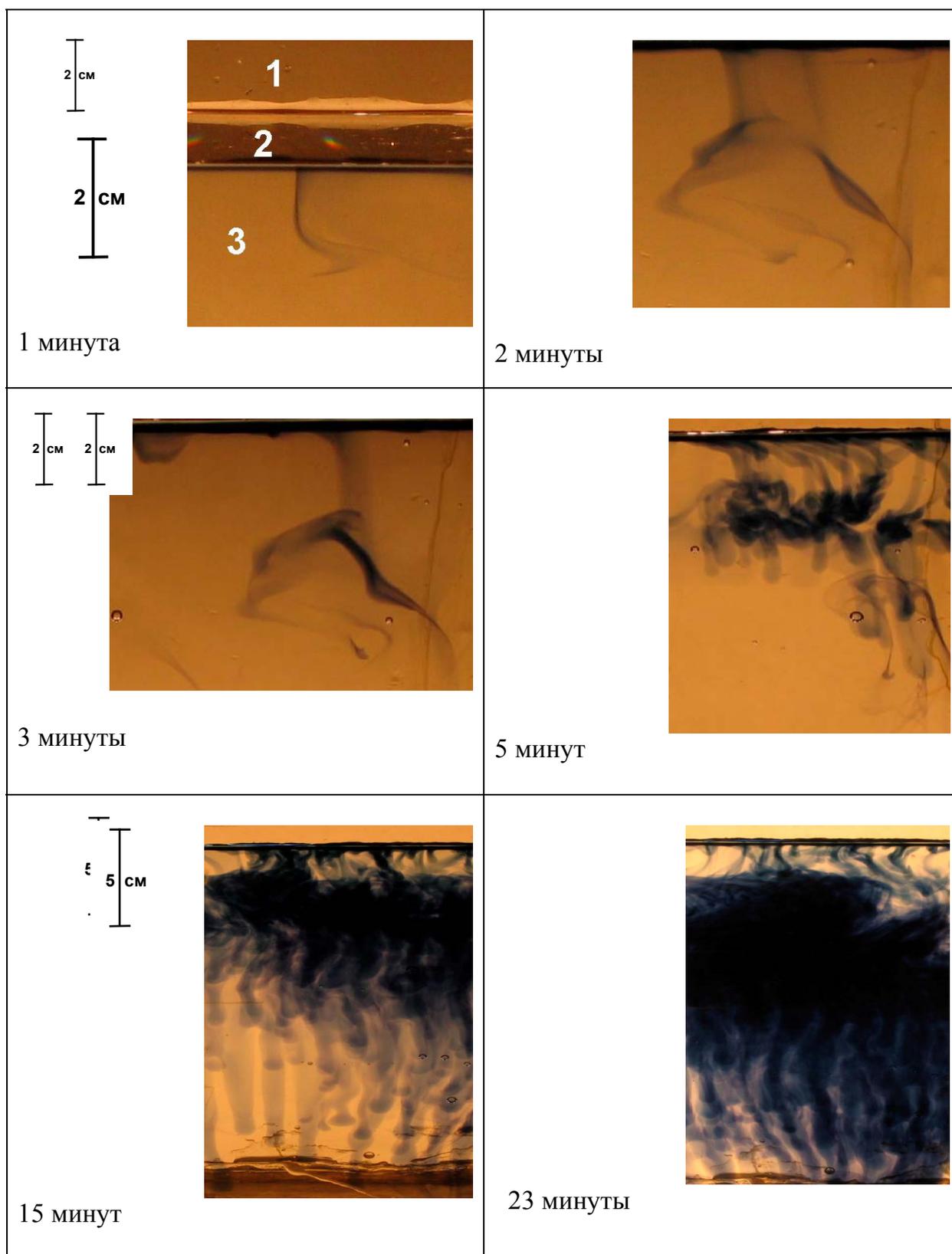


Рисунок 4. Жидкость без предметов внутри. 1 - воздух, 2 - поверхность жидкости, 3 - жидкость.

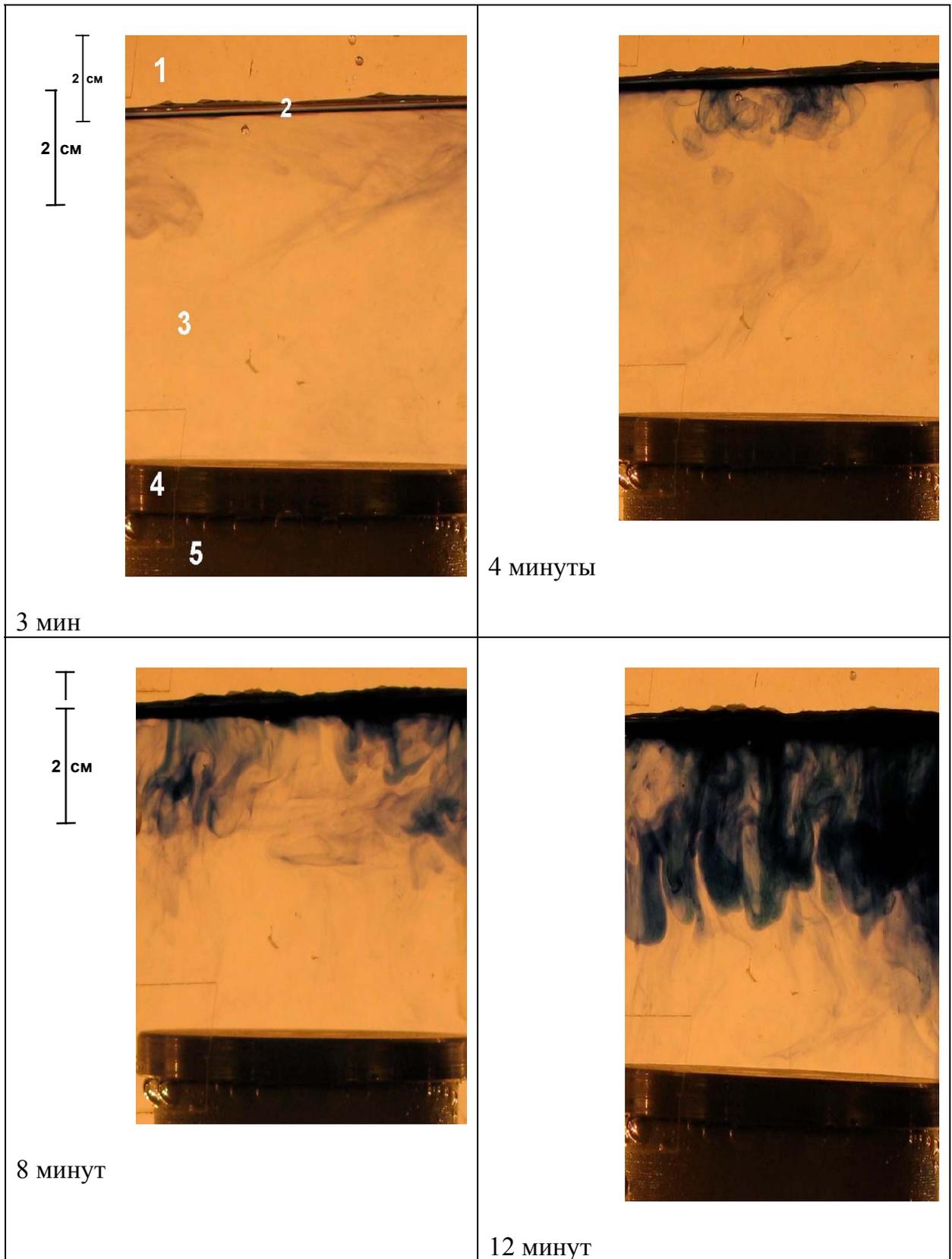


Рисунок 5. Внутри жидкости - проводник. 1 - воздух, 2 - поверхность жидкости, 3 - жидкость, 4 - проводник (алюминий), 5 - изоляционная подставка (фторопласт).

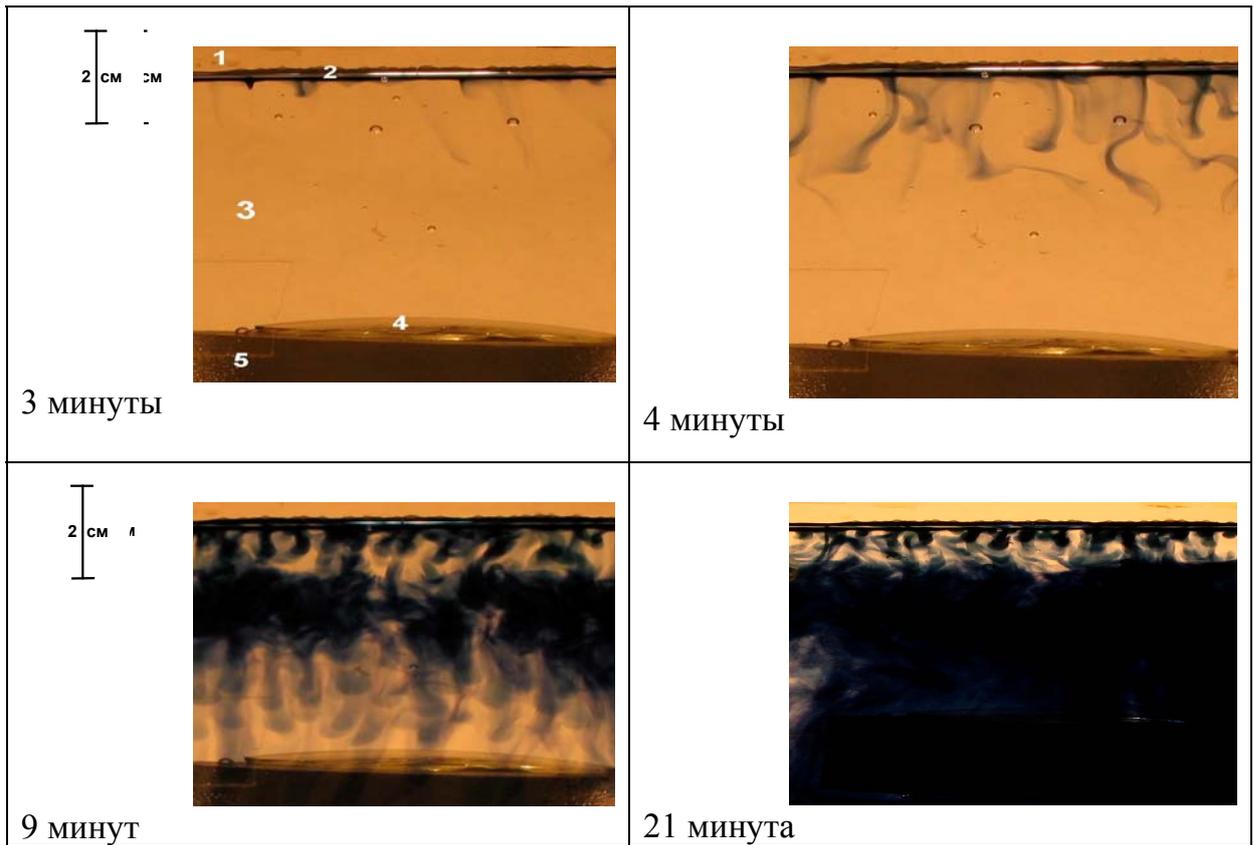


Рисунок 6. Внутри жидкости - изолятор. 1 - воздух, 2 - поверхность жидкости, 3 - жидкость, 4 - изолятор (стекло), 5 - изоляционная подставка (фторопласт).

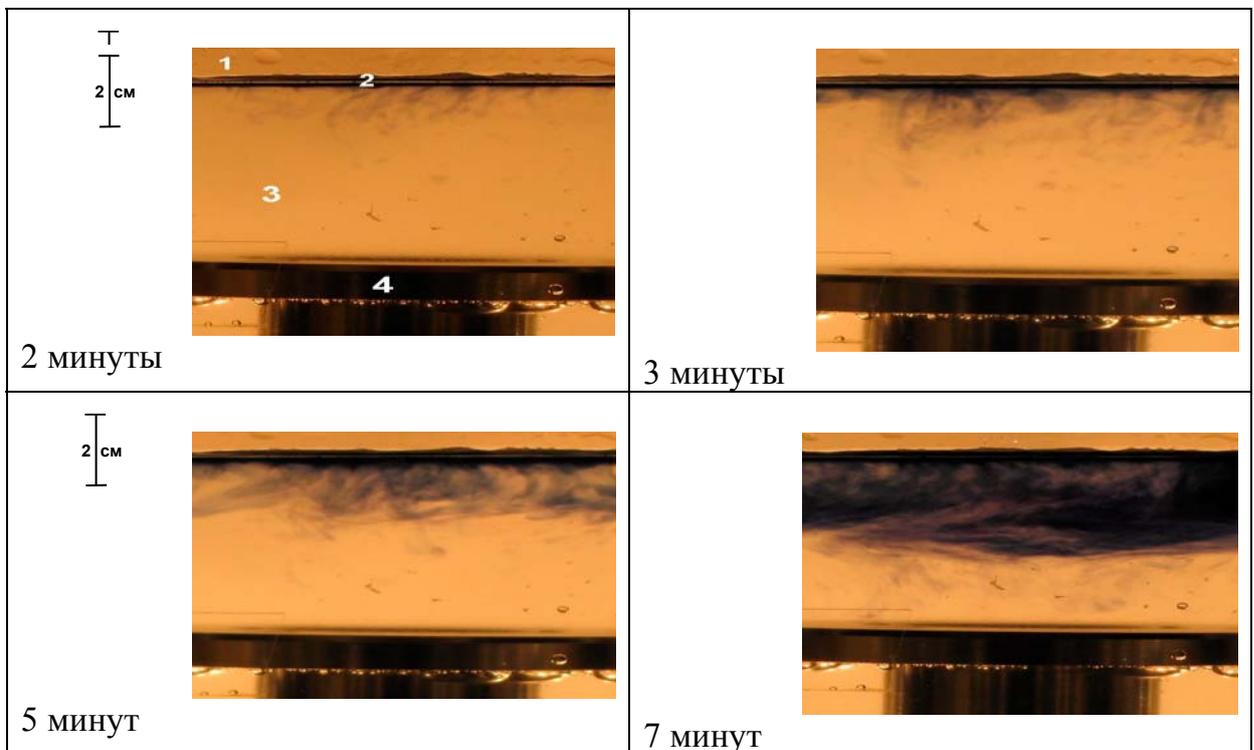


Рисунок 7. Фланец из нержавеющей стали (проводящее кольцо, соединенное трубой с дном сосуда). 1 - воздух, 2 - поверхность жидкости, 3 - жидкость, 4 - фланец.

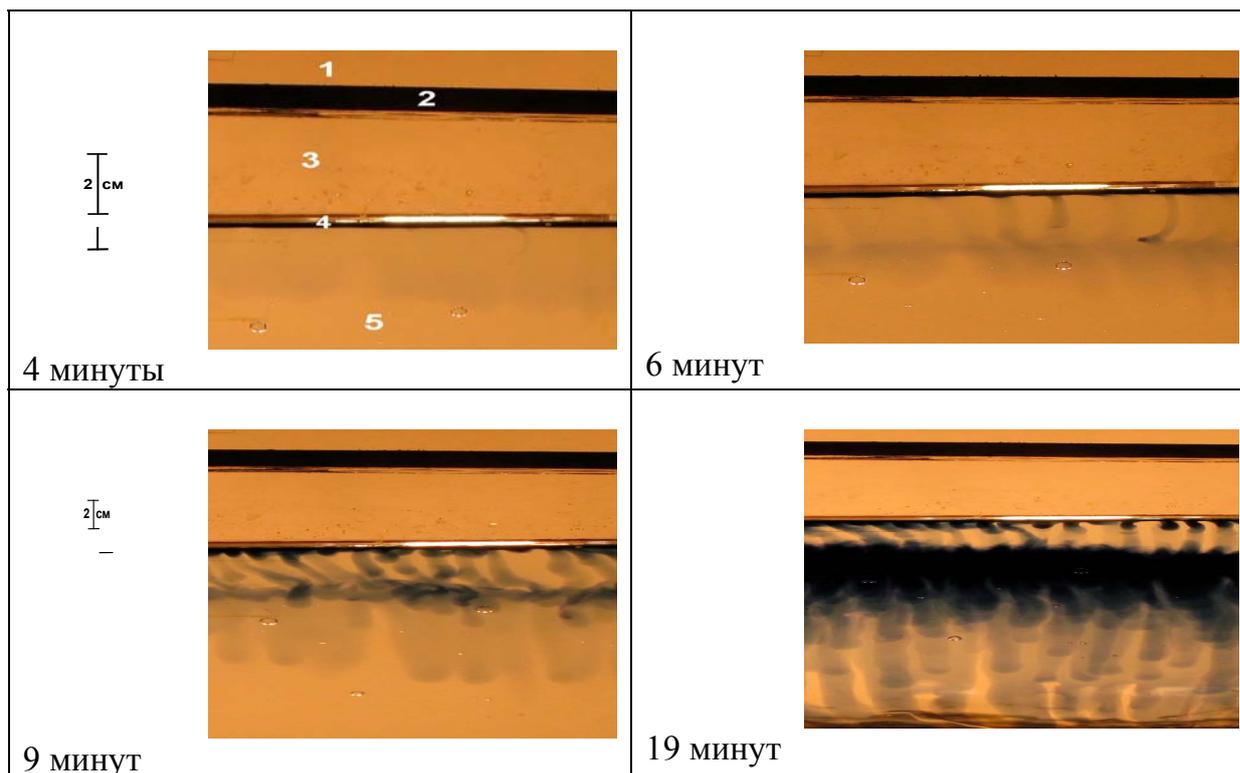


Рисунок 8. Разряд на металлическую пластину. Блок-схема эксперимента - рисунок 2. 1 - воздух, 2 - алюминиевая пластина с отверстиями, 3 - воздух, 4 - поверхность жидкости, 5 - жидкость.

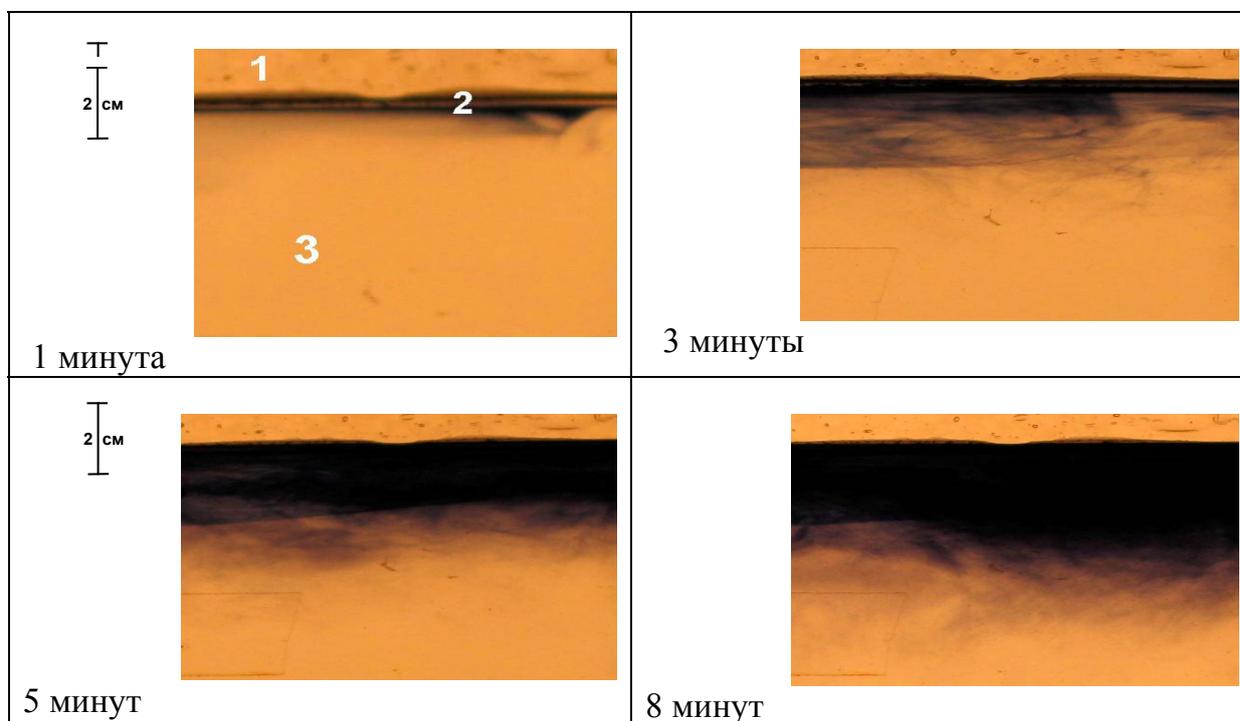


Рисунок 9. Диффузия с поверхности жидкости. Блок-схема эксперимента - рисунок 3. В газовую фазу подается озон. Какого-либо воздействия на жидкость нет. 1 - воздух, 2 - поверхность жидкости, 3 - жидкость.

1. Треки с поверхности длиной порядка 2 см, поверхностный слой затемняется в последнюю очередь. Когда жидкость без введенных предметов, (рис. 4) поверхностный заряд вызывает пробой жидкости. Продукты реакции импульсом тока в жидкости, возникающем при пробое, увлекаются на глубину больше 2 см, и там начинают диффундировать во все стороны, постепенно затемняя жидкость. Когда в жидкость помещен диэлектрик (рис. 6), ничего в принципе не меняется. Можно было ожидать, что на диэлектрике будут оседать заряды, и картина распределения поля в жидкости изменится. Однако диэлектрик находится на глубине, куда пробой не достает. На движение ионов обоих знаков диэлектрик не оказывает влияния.

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.

Когда разряд происходил на металлическую пластину, расположенную над поверхностью жидкости (рис. 8), через эту пластину проходил большой электрический заряд ( $\sim 2 \cdot 10^{-6}$  Кл). Этот заряд индуцировал на поверхности жидкости заряд такой же величины, но противоположный по знаку. В жидкости также мог происходить пробой, и картина была аналогичной описанной выше.

2. На поверхности жидкости образуются треки, но их длина меньше, и затемнение происходит от поверхности вглубь жидкости. Наблюдается в случае, когда близко к поверхности расположен проводник, заземленный (рис. 7) или не заземленный (рис. 5). Емкость этого проводника относительно поверхности жидкости существенно больше, чем емкость поверхностного слоя относительно дна жидкости. Поэтому при попадании на поверхность заряда определенной величины напряженность поля, создаваемого в жидкости этим зарядом, будет меньше. При меньшей напряженности поля пробой будет происходить на небольшую глубину, и продукты реакции, окрашивающие жидкость, будут почти равномерно диффундировать до дна сосуда.

3. Когда в реакционный сосуд сверху поступает озон, и никакого электрического поля в сосуде нет (рис. 9), происходит обыкновенная диффузия. Затемненный слой постепенно заполняет весь объем.

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.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Н.А.Аристова, И.М.Пискарев, А.В. Ивановский, В.Д.Селемир, Г.М.Спилов, 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.