

# Импульсный электрический пробой проводящей воды с пузырьками

В. А. Панов, Л. М. Василяк, С. П. Ветчинин, В. Я. Печеркин и Э. Е. Сон  
Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва  
125412, Россия

E-mail: panovvladislav@gmail.com

Статья поступила в редакцию 26 ноября 2018 г.

**Аннотация.** В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования влияния искусственно созданных парогазовых пузырьков, распределенных в объеме жидкости и на поверхности электродов, на развитие импульсного электрического разряда в воде с проводимостью 35 и 330 мкСм/см в промежутке длиной 1 см между острым анодом и цилиндрическим катодом. Проведен сравнительный анализ полученных результатов для разряда в воде без пузырьков, с пузырьками только в объеме жидкости, с пузырьками только на поверхности электродов, с пузырьками в объеме и на поверхности электродов. Установлено, что при напряжении, близком к пробойному в воде без пузырьков, оба типа пузырьков (объемные и на поверхности) приводят к изменению механизма развития разряда: изначально тепловой механизм с анода переходит в стримерно-лидерный с анода в воде с объемными пузырьками, а при наличии поверхностных — развивается с катода. Скорость распространения каналов при этом увеличивается на три и один порядок соответственно. <https://doi.org/10.33849/2018101>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большое внимание уделяется разработке новых плазменных методов очистки воды от различного рода загрязнений на основе электрического разряда в жидкости и на её поверхности [1–9].

В отличие от стационарных режимов (дуговые и т.п.), импульсный характер воздействия позволяет достигнуть неравновесного состояния плазмы внутри разрядного канала. Неравновесная низкотемпературная электроразрядная плазма в водных растворах может выступать в качестве экологичного источника химически активных радикалов и ультрафиолетового излучения. Такая плазма находит широкое применение в технологиях водоподготовки, для медицинских и биологических целей (стерилизация инструментов и т.п.), и в других областях. Большую роль при этом играют процессы переноса активных частиц (которые в большинстве случаев образуются в газовой фазе) в жидкости через границу раздела фаз и окислительные процессы в жидкой фазе [10]. Однако, отвлекаясь от конкретных химических процессов, ясно, что эффективность обработки жидкости будет тем выше, чем больше будет площадь контакта газ-жидкость. Следуя этой логике, наибольшую эффективность можно ожидать в мелком аэрозоле, однако с технологической точки зрения более предпочтительной является схема с барботированием жидкости, особенно в случае необходимости обработки в промышленных масштабах.

Предварительное насыщение обрабатываемой жидкости паровоздушными пузырьками, с одной стороны, поставляет в жидкость дополнительный окислитель, а с другой — обеспечивает дополнительную потенциальную поверхность контакта плазма-жидкость, особенно необходимые в случае сложных загрязнений с высокими концентрациями.

Одной из основных проблем при прямой электроразрядной обработке является контракция плазменного канала, приводящая к уменьшению эффективного обрабатываемого объема вследствие прохождения большей части жидкости вдали от канала. Одним из возможных решений может быть использование многоэлектродной системы [11]. Применение составного анода в виде мас-

сива игольчатых электродов, каждый из которых имеет свою собственную линию питания, позволит получить квазиобъемный разряд и большую долю обработанной жидкости. Форма острия способствует фиксации точки инициации разряда и позволяет распределить разряд по объёму обрабатываемой жидкости.

Сложный процесс пробоя, включающий в себя ионизацию пузырьков и растекание тока в многофазной проводящей среде с фазовыми переходами, представляет интерес при разработке фундаментальных основ плазменных методов очистки воды. Разделяя задачу исследования квазиобъемного разряда в многофазной среде на отдельные составляющие, настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию развития разряда с одиночного острия в присутствии искусственно созданных паровоздушных пузырьков в объеме жидкости и на поверхности электродов.

Наличие газовых пузырьков в жидкости резко меняет качественно и количественно пороговые условия пробоя [12], а также динамику развития стримерного и искрового каналов разряда в зависимости от проводимости воды, а также длительности и полярности приложенного импульса напряжения.

Важная роль газовых пузырьков при пробое в жидкости в микросекундном диапазоне времён вблизи высоковольтного электрода в сильном электрическом поле была впервые экспериментально показана в дистиллированной воде [13, 14]. Благодаря применению аппаратуры с высоким пространственным и временным разрешением и с высокой оптической чувствительностью удалось выяснить условия ионизации микропузырьков и построить физическую модель зажигания разряда [15, 16].

Зажигание разряда и развитие первичных стримеров начинается именно в пузырьках. Ионизационные процессы, развивающиеся в микропузырьках, приводят к формированию затем основного плазменного канала-лидера. В настоящее время пузырьковый механизм пробоя диэлектрических жидкостей с малой проводимостью является общепризнанным [12], а наличие микропузырьков приводит к уменьшению времени формирования разряда. Ионизация в пузырьке начинается по-

сле достижения на нём напряжения соответствующего минимуму кривой Пашена. Пробой возникает только в пузырьках, размер которых больше критического. По данным [17] при  $E = (0.5-1)$  МВ/см радиус канала  $r_c = (10-20)$  мкм.

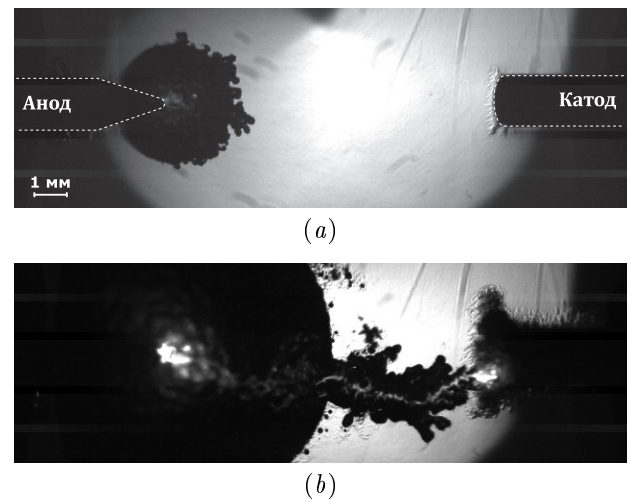
Более того, взаимное расположение и деформация пузырьков также влияют на развитие стримерного пробоя внутри пузырьков на наносекундном масштабе [18, 19].

Сравнительное исследование влияния пузырьков, распределенных в объёме жидкости и на поверхности электродов, на развитие пробоя в проводящих жидкостях, в которых развивается не “стримерно-лидерный”, а “тепловой” механизм пробоя, представляется нерешенной задачей, актуальной как для понимания физики происходящих явлений, так и для технических приложений при применении плазменных технологий.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В настоящих экспериментах использовалась установка, подробно описанная в [20], со следующими основными параметрами: геометрия вольфрамовых электродов “острие–штырь”, диаметр цилиндрической части электродов 1.6 мм, торец острейного анода заточен на конус с полным углом при вершине  $30^\circ$ , радиус скругления острия около 100 мкм, кромка рабочего торца катода скруглена, длина в воде неизолированной части каждого из электродов около 4 мм. Межэлектродное расстояние 1 см. Импульс высокого напряжения положительной полярности с длительностью переднего фронта 0.4 мкс амплитудой до 30 кВ и длительностью на полувысоте до 3 мс подавался на острейный анод через последовательно включенное балластное сопротивление 5.5 кОм. Геометрические размеры внутренней полости прозрачной разрядной камеры, изготовленной из оргстекла, составляют  $8 \times 3 \times 15$  см (Ш  $\times$  Г  $\times$  В), толщина стенки 1 см.

Микропузырьки в объёме создавались методом декомпрессии. Для этого вода предварительно насыщалась воздухом при давлении 7 атм. Перед подачей высоковольтного импульса давление в разрядной камере резко сбрасывалось до атмосферного и растворенный воздух выделялся в виде микропузырьков со средним диаметром  $(40 \pm 10)$  мкм во всем объёме воды. Такой метод обеспечивает квазиоднородное распределение пузырьков в объёме. Контроль размеров и распределения в межэлектродном пространстве микропузырьков проводился теневым методом. Для того чтобы на поверхности электродов не образовались микропузырьки, электроды были закрыты тонкими чехлами, которые после декомпрессии убирались. Пузырьки на поверхности электродов образовывались при декомпрессии воды в том случае, если поверхность электродов была открыта в жидкость и не была специально защищена чехлами. В отличие от объёмных пузырьков, в отсутствие возможности управлять размером пузырьков, образующихся на поверхности электродов, контроль их размеров осуществлялся в каждом отдельном эксперименте. Приведенные ниже результаты справедливы для пузырьков диаметром 100–500 мкм, находящихся вблизи кончиков электродов. Наличие или отсутствие микропузырьков на поверхности электродов специально проверялось.



**Рисунок 1.** Картина развития импульсного электрического разряда в проводящей воде без пузырьков при электропроводности 330 мкСм/см: (а) 435 мкс; (б) 2093 мкс. Пунктирной линией обозначены контуры электродов.

Фоторегистрация теневых изображений, полученных при использовании лампы с нитью накала в качестве подсветки, производилась скоростной камерой Phantom v2012 с частотой следования кадров 130 кГц и экспозицией 6 мкс. Этой же камерой регистрировалось свечение при развитии разряда в воде.

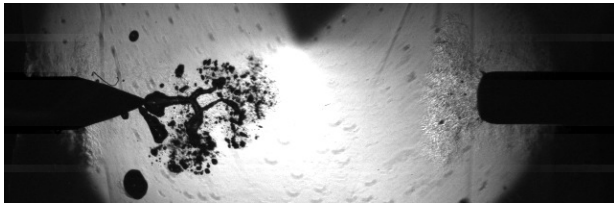
## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Эксперименты были проведены при двух значениях электропроводности воды: 330 мкСм/см — характерно для водопроводной воды, и 35 мкСм/см — на порядок меньшее значение, с целью проследить тенденции при снижении проводимости. Исследованы три конфигурации микропузырьков в разрядном промежутке:

1. без пузырьков;
2. микропузырьки только в объёме воды;
3. пузырьки только на поверхности электродов;
4. одновременное присутствие пузырьков на поверхности электродов и в объёме воды.

Проведено сравнение между конфигурациями с учетом полученных ранее результатов для конфигурации 1 (при 330 мкСм/см) и для конфигураций 2–4 (при 35 мкСм/см) из предыдущих исследований [21] и [20].

В отсутствие видимых в объёме и на поверхности электродов пузырьков, при приложении пробойного напряжения, пробой развивается по “тепловому” механизму [21] при обоих исследованных значениях проводимости 330 и 35 мкСм/см. Пробойное напряжение при этом составило около 9 и 22 кВ соответственно. “Тепловой” механизм был подробно исследован нами ранее [21] при проводимости воды 330 мкСм/см и геометрии электродов “острие–штырь”. После подачи напряжения на острейный анод, вблизи его кончика, в области повышенных напряженности электрического поля и плотности тока, начинается интенсивный нагрев жидкости под действием протекающих токов проводимости, реализуется взрывной режим вскипания, и образуется оптически непрозрачная область с парогазовыми пузырьками. Дальнейшая ионизация внутри пузырьков приводит к локальному повышению проводимости и развитию



(a)

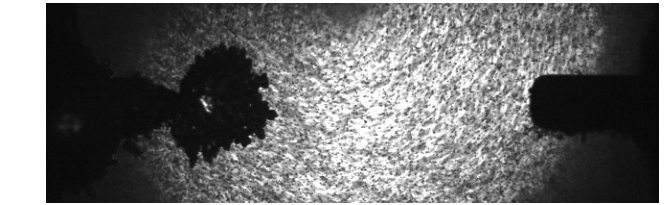


(b)

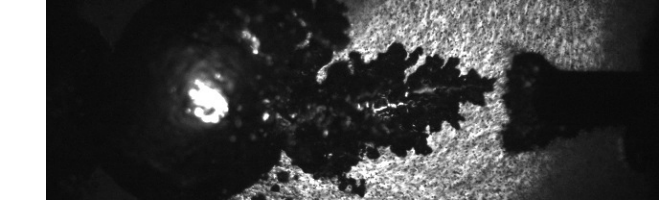
**Рисунок 2.** Картина развития импульсного электрического разряда в проводящей воде без пузырьков при электропроводности 35 мкСм/см: (a) 1367 мкс; (b) 2480 мкс.

тепловой неустойчивости. После этого появляется плазменная область, в которой происходит усиленное тепловыделение вследствие возрастания протекающего через нее тока, и начальная парогазовая область начинает активно расширяться (рисунок 1(a)). Затем с её поверхности выделяется основной канал разряда (рисунки 1(b) и 2(b)), прораствание которого к катоду по вышеописанному механизму, локализованному уже на переднем крае разрядного канала, приводит к замыканию промежутка (рисунок 2(b)). Скорость распространения канала составляет 5–10 м/с. При пониженной проводимости объём начальной парогазовой области значительно меньше (рисунки 1(a) и 2(a)). Время зажигания разряда по “тепловому” механизму, т.е. время от подачи напряжения до возникновения плазменной области у анода, составляет порядка нескольких сотен микросекунд, а полное время пробоя находится на уровне единиц миллисекунд. При этом при пониженной электропроводности стадия зажигания разряда может незначительно затягиваться ввиду меньших величин протекающего тока. **Таким образом, в отсутствие объемных и поверхностных пузырьков при пробойном напряжении разряд развивается по одному же и тому же “тепловому” сценарию при обоих значениях проводимости.**

Исследования влияния микропузырьков на пробой в воде с повышенной проводимостью (330 мкСм/см) проводились при напряжениях, близких к пробойному для воды без пузырьков  $U_{br} \approx 9$  кВ, и при перенапряжении до  $1.5U_{br}$ . Пробойное напряжение при этом составило около 9 и 22 кВ соответственно. Далее по тексту под пробойными напряжениями понимаются именно эти величины — для воды без пузырьков. Методика их измерения подробно изложена в [21]. Развитие пробоя в воде с микропузырьками в объёме представлено на рисунках 3. В указанном диапазоне напряжений и исследованном диапазоне газосодержания (до 0.2%) механизм разряда не отличался от наблюдаемого в той же воде без пузырьков, т.е. реализовывался “тепловой” механизм разряда, временные характеристики которого также оставались неизменными. Инициация разряда происходила в формирующейся прианодной парогазовой области без видимого влияния микропузырьков в объёме разрядного промежутка.

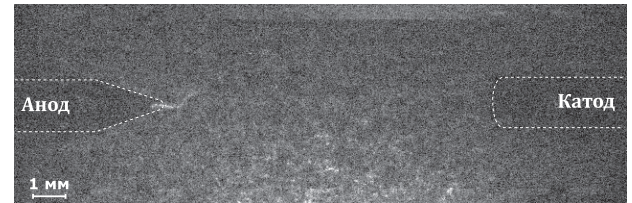


(a)

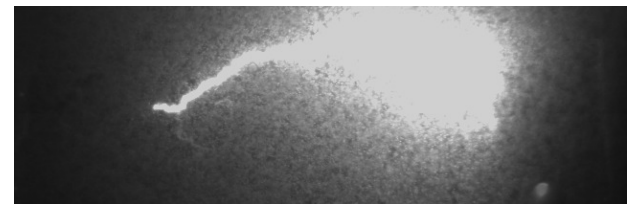


(b)

**Рисунок 3.** Картина развития импульсного электрического разряда в проводящей воде с объёмными пузырьками при электропроводности 330 мкСм/см: (a) 208 мкс; (b) 1268 мкс.



(a)

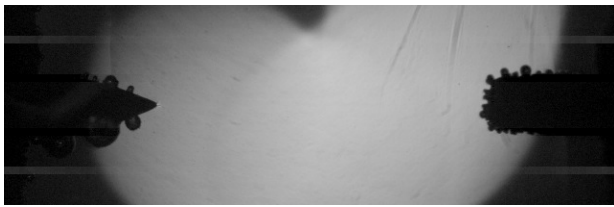


(b)

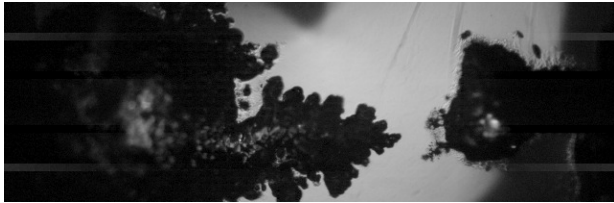
**Рисунок 4.** Картина развития импульсного электрического разряда в проводящей воде с объёмными пузырьками при повышенном газосодержании ( $\sim 0.2\%$ ) при электропроводности 35 мкСм/см: (a) 16 мкс; (b) 23 мкс.

зовой области без видимого влияния микропузырьков в объёме разрядного промежутка.

В воде с меньшей проводимостью (35 мкСм/см) влияние пузырьков в межэлектродном объёме на картину развития разряда более значительно. Следует отметить, что в исследованном диапазоне напряжений (до  $1.5U_{br}$ ,  $U_{br} \approx 20$  кВ) в отсутствие пузырьков возможно развитие разряда как по медленному “тепловому” механизму при напряжениях  $(1-1.3)U_{br}$ , так и по быстрому “стримерно-лидерному” механизму при более высоких напряжениях. Возможность реализации обоих механизмов в проводящей воде при варьировании напряжения и неизменной электропроводности воды была продемонстрирована ранее для 90 мкСм/см [22, 23]. Для определения влияния на механизм разряда микропузырьков в межэлектродном объёме была проведена серия экспериментов, в которой электроды оставались изолированными от газированного объёма жидкости до момента подачи напряжения, для того чтобы на поверхности электродов не образовывалось дополнительных пузырьков.

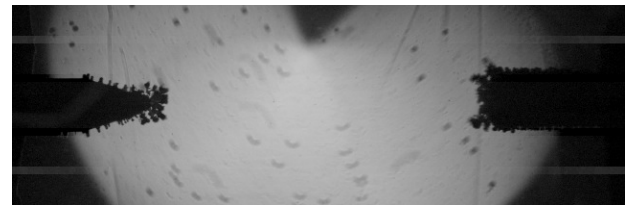


(a)

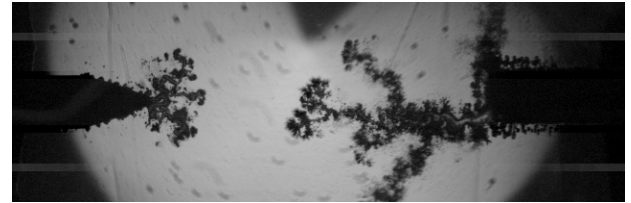


(b)

**Рисунок 5.** Картина развития импульсного электрического разряда в проводящей воде с пузырьками на поверхности электродов при электропроводности 330 мкСм/см: (a) 22 мкс; (b) 1097 мкс.



(a)



(b)

**Рисунок 6.** Картина развития импульсного электрического разряда в проводящей воде с пузырьками на поверхности электродов при электропроводности 35 мкСм/см: (a) 28 мкс; (b) 136 мкс.

ков. Было установлено, что при пробойном напряжении наличие микропузырьков в объеме приводит к смене механизма пробоя, в результате чего время пробоя уменьшается на два порядка, до 15–20 мкс (рисунки 4), по сравнению с 1.5 мс в воде с той же проводимостью без микропузырьков, и увеличению скорости распространения разрядного канала почти на три порядка, до 1.2–1.3 км/с, что больше скорости звука в газожидкостной среде, которая при реализуемом газосодержании была много меньше 1 км/с. Понижение объёмного газосодержания на порядок, с 1 до 0.1%, приводит к незначительному увеличению времени пробоя — до 20–25 мкс.

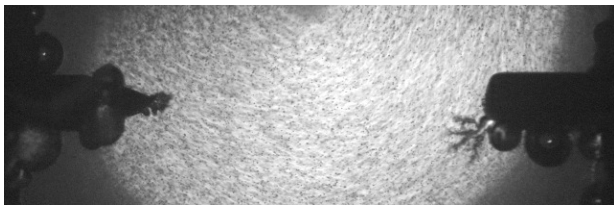
При более высоком перенапряжении и при отсутствии микропузырьков на поверхностях электродов микропузырьки в объеме не оказывают заметного влияния на временные характеристики реализующегося “стримерно-лидерного” механизма: время зажигания разряда около 20–30 мкс, а полное время пробоя на уровне 40 мкс. Наблюдаемая сквозь завесу микропузырьков структура канала не отличается от канала при сходных условиях в воде без пузырьков. **Таким образом, добавка объёмных микропузырьков влияет только на пробой слабопроводящей воды. Изменяется механизм пробоя, полное время пробоя сокращается почти на два порядка, а скорость канала увеличивается на три порядка.**

Влияние микропузырьков на поверхности электродов при повышенной проводимости (рисунок 5(a)) проявляется в инициации разрядных каналов на обоих электродах. На аноде инициация происходит в первые микросекунды после подачи напряжения сразу в нескольких пузырьках, расположенных ближе к острию. Образующиеся плазменные области после расширения объединяются в одну, с поверхности которой выделяется основной канал (рисунок 5(b)). Инициация разряда на катоде происходит со значительной задержкой. Сразу после подачи напряжения пузырьки деформируются, вытягиваясь вдоль линий напряженности, приблизительно через 0.1 мс по экватору пузырьков возникает перетяжка и пузырек разделяется на два. Одна

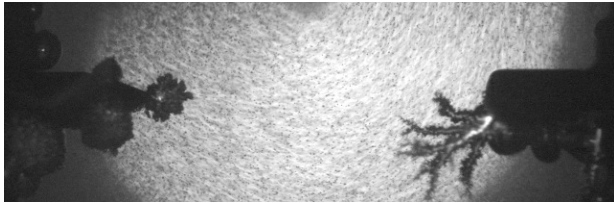
его половина уходит в объём жидкости и не участвует в развитии разряда, а вторая возвращается на поверхность катода, где вместе с парогазовыми пузырьками, появляющимися под действием нагрева протекающим током, образует единую парогазовую область вокруг рабочего торца катода. Появление свечения в ней, сопровождающееся инициацией разрядного канала с катода (рисунок 5(b)), наблюдается к моменту времени порядка 1 мс. Смыкание движущихся навстречу разрядных каналов с анода и с катода приводит к пробую промежуток. К моменту замыкания катодный канал перекрывает примерно четверть промежуток, что соответствует средней скорости на уровне 10–15 м/с, остальная часть перекрывается анодным каналом со скоростью 5–10 м/с.

При пониженной проводимости также наблюдается инициация разряда на обоих электродах (рисунок 6), однако теперь она происходит одновременно к 15–20 мкс. Инициация происходит в нескольких пузырьках, находящихся в области наибольшей напряженности поля: на аноде — вблизи острия, а на катоде — вблизи скругленной кромки. После возникновения каналов оставшиеся пузырьки не участвуют в формировании пробоя. Скорость распространения канала с анода составила около 15–20 м/с, с катода — 60–65 м/с. Общее время пробоя сокращается, по сравнению с “тепловым” механизмом, с 1.5 мс до 160 мкс. Замыкание также происходит при смыкании встречных каналов, а большая часть промежуток перекрывается каналом с катода (рисунок 6(b)). Следует отметить, что анодный канал представляет собой некое единое целое с достаточно гладкой поверхностью, в то время как катодный канал ближе к его фронту состоит как бы из отдельных мелких пузырьков и только ближе к катоду, где прогрев более интенсивный и видно свечение, канал имеет более гладкую поверхность.

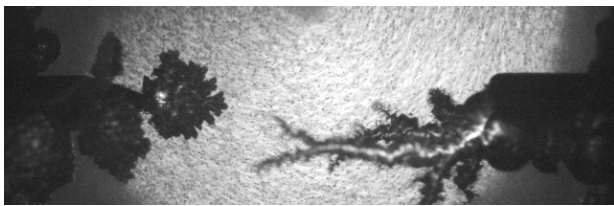
**Таким образом, поверхностные пузырьки приводят к инициации разрядных каналов с обоих электродов при обеих проводимостях. При большей проводимости преимущественно развивается канал с анода, при меньшей — с катода. Скорость канала с катода значительно выше**



(a)



(b)



(c)

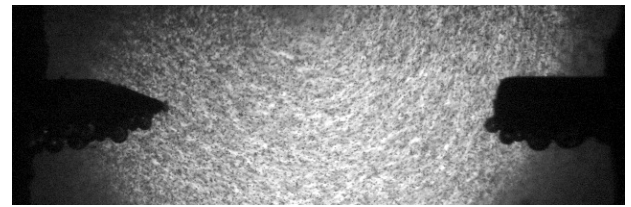
**Рисунок 7.** Картина развития импульсного электрического разряда в проводящей воде с пузырьками в объеме жидкости и на поверхности электродов при электропроводности 330 мкСм/см: (a) 27 мкс; (b) 58 мкс; (c) 135 мкс.

анодного, что приводит к уменьшению характерных времен пробоя на порядок.

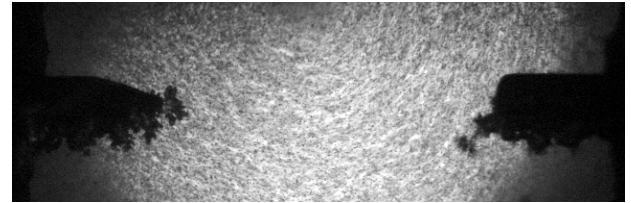
При одновременном присутствии в разрядном промежутке объемных и поверхностных пузырьков в воде с повышенной проводимостью (рисунок 7) определяющими становятся процессы на катоде. Инициация происходит одновременно на обоих электродах в первые 20 мкс, и выражается в возникновении свечения в пузырьках, расположенных на поверхности электродов, и последующем выделении с их поверхности разрядных каналов. После инициации анодный канал развивается по “тепловому” механизму с характерными для него скоростями 5–10 м/с. Скорость распространения катодного канала такая же, как и в слабопроводящей воде в присутствии только поверхностных пузырьков — около 60 м/с, что значительно превышает 10–15 м/с, зарегистрированные для катодного канала в случае присутствия поверхностных пузырьков без объемных. Общее время пробоя сокращается на порядок, до 160 мкс.

В воде с более низкой электропроводностью (рисунок 8) картина мало меняется по сравнению с конфигурацией с поверхностными пузырьками. Разряд по-прежнему развивается преимущественно с катода со скоростью 60–65 м/с при общем времени пробоя около 160 мкс.

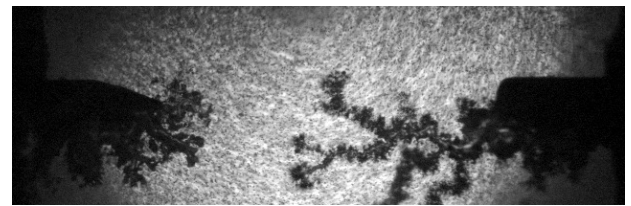
**Таким образом, одновременное присутствие и поверхностных и объемных пузырьков приводит к тому, что пробой развивается одинаково при низкой и высокой электропроводности воды: инициация происходит на обоих электродах, но быстрее прорастает канал с катода, который и приводит к пробую промежутка.**



(a)



(b)



(c)

**Рисунок 8.** Картина развития импульсного электрического разряда в проводящей воде с пузырьками в объеме жидкости и на поверхности электродов при электропроводности 35 мкСм/см: (a) 11 мкс; (b) 34 мкс; (c) 141 мкс.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненных работ показано, что электрический разряд в проводящей воде может развиваться по двум механизмам: “тепловой” и “стримерно-лидерный”, с характерными скоростями распространения плазменного канала 10–20 м/с и 1–10 км/с соответственно. При этом оба механизма могут наблюдаться при одной и той же проводимости из исследованного диапазона 35–330 мкСм/см при изменении величины приложенного напряжения.

Пузырьки в объеме жидкости и на поверхности электродов существенно меняют картину распределения напряженности электрического поля и условия инициации разряда, что приводит к появлению новых режимов разряда: при пробойном напряжении в отсутствие пузырьков разряд развивается по “тепловому” механизму при обеих проводимостях, величина пробойного напряжения выше при меньшей проводимости, характерная скорость “теплого” разрядного канала с анода 5–10 м/с; наличие микропузырьков в объеме влияет только на пробой слабопроводящей воды, полное время пробоя сокращается почти на два порядка, а скорость канала увеличивается на три порядка, до 1.3 км/с; микропузырьки на поверхности электродов приводят к инициации разрядных каналов с обоих электродов при обеих проводимостях, при большей проводимости преимущественно развивается канал с анода, при меньшей — с катода, скорость катодного канала 60–65 м/с значительно выше анодного 5–10 м/с, что приводит к уменьшению характерных времен пробоя до 160 мкс; одновременное присутствие микропузырьков на поверхности электродов в межэлектродном объеме приводит к тому,

что пробой развивается одинаково при высокой и низкой удельной электропроводностях: инициация происходит на обоих электродах, но быстрее прорастает канал с катода, который и приводит к пробую промежутка, общее время пробоя 160 мкс.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 16-08-00088)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kirkpatrick M J and Locke B R 2005 *Ind. Eng. Chem. Res.* **44** 4243–4248
2. Locke B R, Sato M, Sunka P, Hoffmann M R and Chang J S 2006 *Ind. Eng. Chem. Res.* **45** 882–905
3. Bruggeman P and Leys C 2009 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** 053001
4. Foster J, Sommers B S, Gucker S N, Blankson I M and Adamovsky G 2012 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **40** 1311–1323
5. Thagard S M, Stratton G R, Dai F, Bellona C L, Holsen T M, Bohl D G, Paek E and Dickenson E R V 2017 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50** 014003
6. Foster J E, Mujovic S, Groele J and Blankson I M 2018 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **51** 293001
7. Ceriani E, Marotta E, Schiorlin M, Ren X, Ceretta C, Gobbo R, Tampieri F and Paradisi C 2018 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **51** 274001
8. Takeuchi N, Ishibashi N, Sugiyama T and Kim H H 2018 *Plasma Sources Sci. Technol.* **27** 055013
9. Magureanu M, Bradu C and Parvulescu V I 2018 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **51** 313002
10. Bruggeman P J *et al* 2016 *Plasma Sources Sci. Technol.* **25** 053002
11. Панов В А, Куликов Ю М и Сон Э Е 2013 Ячейка для плазмохимической очистки загрязненной жидкости *Патент РФ* 134921
12. Ushakov V Ya, Klimkin V F and Korobeynikov S M 2007 *Impulse Breakdown of Liquids* (Springer Berlin Heidelberg)
13. Yanshin E V, Ovchinnikov I T and Vershinin Yu N 1973 *Zh. Tekh. Fiz.* **43** 1067–1071
14. Korobeynikov S M, Yanshin E V and Yanshin K V 1998 Experimental evidence of bubble model of discharge initiation 1998 *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* vol 2 pp 436–439
15. Korobejnikov S M and Yaoshin E V 1987 Model of prebreakdown processes in liquids under pulse voltage 1987 *Ninth International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids* pp 398–402
16. Korobeinikov S M 1998 *High Temp.* **36** 340–345
17. An W, Baumung K and Bluhm H 2007 *J. Appl. Phys.* **101**
18. Babaeva N Yu, Tereshonok D V and Naidis G V 2015 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **48** 355201
19. Babaeva N Yu, Naidis G V, Tereshonok D V and Smirnov B M 2017 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50** 364001
20. Tereshonok D V, Babaeva N Yu, Naidis G V, Panov V A, Smirnov B M and Son E E 2018 *Plasma Sources Sci. Technol.* **27** 045005
21. Panov V A, Vasilyak L M, Vetchinin S P, Pecherkin V Ya and Son E E 2016 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **49** 385202
22. Panov V A, Vasilyak L M, Pecherkin V Ya, Vetchinin S P and Son E E 2018 *J. Phys.: Conf. Ser.* **946** 012160
23. Panov V A, Vasilyak L M, Vetchinin S P, Pecherkin V Ya and Son E E 2018 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **51** 354003