

ИНИЦИИРОВАНИЕ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ВЗРЫВОМ ЭЛЕКТРОЛИТА

В.С. Тесленко, А.П. Дрожжин, Р.Н. Медведев, В.И. Манжале

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН
Россия, 630090 Новосибирск, просп. ак. Лаврентьева, 15
e-mail: teslenko@hydro.nsc.ru*

Экспериментально осуществлено инициирование зажигания стехиометрической пропан-кислородной газовой смеси в пузырьке, расположенном в электролите вблизи диэлектрической или металлической стенки. Показано, что инициирование зажигания горючего газа в пузырьке происходит в результате электрического взрыва-пробоя тонкого слоя электролита вдоль границы пузырька.

С целью оптимизации параметров зажигания горючих пузырьков в воде для создания тепловых генераторов, в которых топливо сжигается непосредственно в водном теплоносителе необходимо выявить механизм зажигания горючих смесей в пузырьках электрическим разрядом. Решению этой задачи и посвящены представленные результаты экспериментов. В работах [1,2] было осуществлено инициирование горения ацетилен-кислородного пузырька электрическим разрядом, происходящим в зазоре между металлическим электродом и электролитом. Механизм такого инициирования был не ясен, хотя основной гипотезой служила модель электрического пробоя в шейке пузырька по периметру металлической трубки, из которой выдувался пузырек. Для проверки данной гипотезы были поставлены специальные эксперименты с инертными и горючими пузырьками при электрическом взрыве тонкого слоя электролита располагаемом на межфазной границе диэлектрик-жидкость-газ.

Постановка экспериментов I

На Рис. 1 представлена постановка экспериментов для изучения разрядов и пробоев в трубке с инертными и горючими пузырьками. Испытательная ячейка представляла собой прозрачную силиконовую трубку (1) с двумя металлическими электродами в виде трубок (2), через отверстия в электродах заливался электролит (3) и вдувался пузырек (4) необходимого состава и размера, при этом между пузырьком и трубкой образовывался электролитный мениск (5). Расстояние между электродами варьировалось в пределах 5-20 мм. Внутренний диаметр силиконовой трубки был 2,5 мм, внешний диаметр 3,5 мм. В экспериментах использовался конденсаторный накопитель с емкостью 8 мкФ. Собственная индуктивность установки 3 мкГ. Эксперименты проводились при напряжениях $U = 300-1600$ В. В качестве электролита использовались водные растворы хлористого натрия или карбоната калия с концентрацией 1%. Во всех экспериментах совместно с теневой киносъемкой осуществлялась синхронная регистрация тока и напряжения.

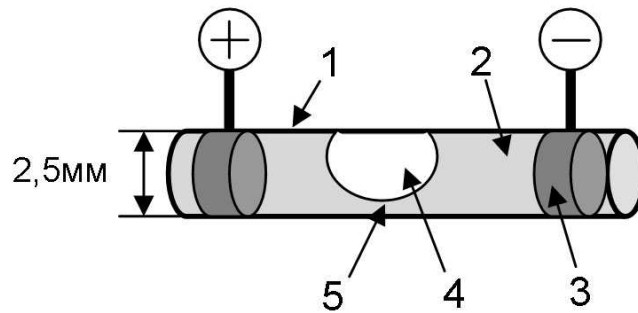


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 - прозрачная силиконовая трубка, 2 – электролит, 3 – металлические электроды, 4 - газовый пузырек, 5 – электролитный мениск между пузырьком и трубкой.

Результаты. На Рис. 2 представлены кадры киносъемки развития электрогидродинамических процессов в силиконовой трубке с воздушным пузырьком, в 1% водном растворе хлористого натрия. Из кинограммы следует, что в результате токового нагрева жидкого мениска в нижней части пузырька происходит взрывное вскипание жидкости с выбросом капель и пара в воздушный пузырек. В паровой зоне пузырька возникают световые сполохи, что соответствует процессам ионизации газа и выброшенного в воздушный пузырек пара. При этом области пробоев носят характер диффузных стримеров, скользящих по поверхности трубки. Затем светящаяся область расширяется, вытесняя электролит через трубки металлических электродов. В моменты касания расширяющегося пузырька металлических электродов происходит сквозной пробой уже между металлическими электродами. В среднем скорость движения границы пузырька вдоль оси трубки не превышала 1 м/с. Следует особо отметить, что зона свечения не заполняет всё пространство расширяющегося пузырька до момента сквозного пробоя.

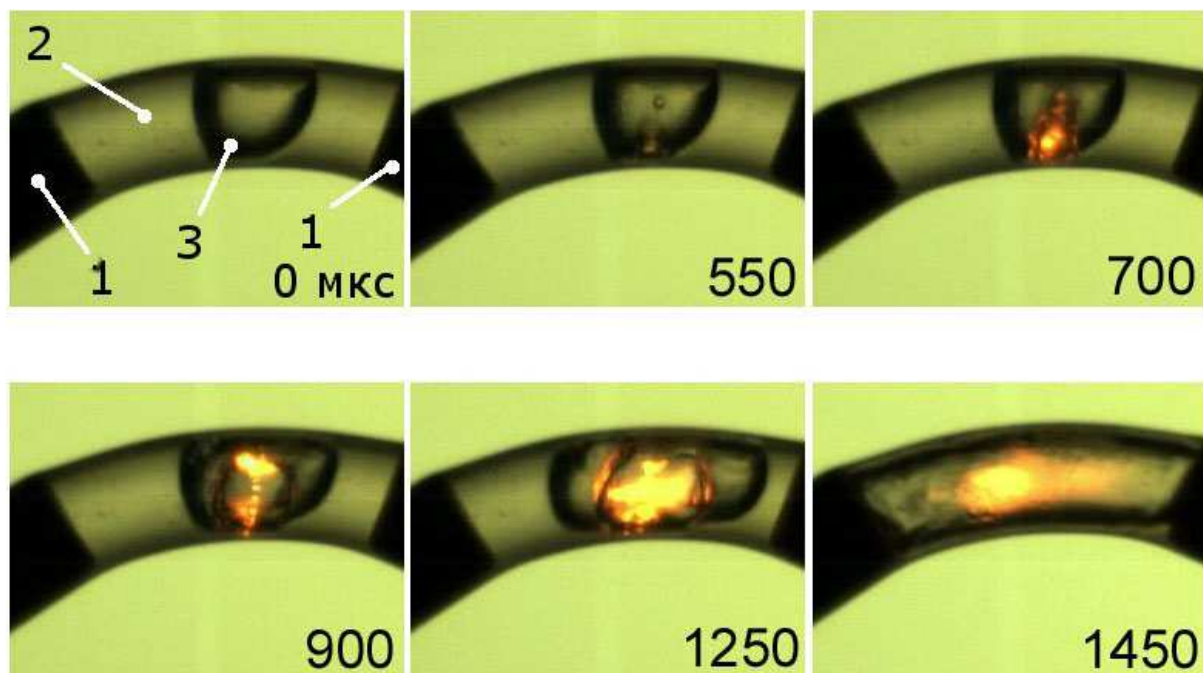


Рис. 2. Динамика электрического взрыва тонкого слоя электролита на границе с пузырьком воздуха. 1 – электроды, (слева +, справа -), 2 – электролит, 1% NaCl, 3 – пузырёк воздуха. $U = 1200 \text{ В}$.

На Рис. 3 представлены осциллограммы тока, напряжения и, соответственно, отдельные кадры динамики инициирования зажигания и горения в трубке пропан-кислородного пузыря.

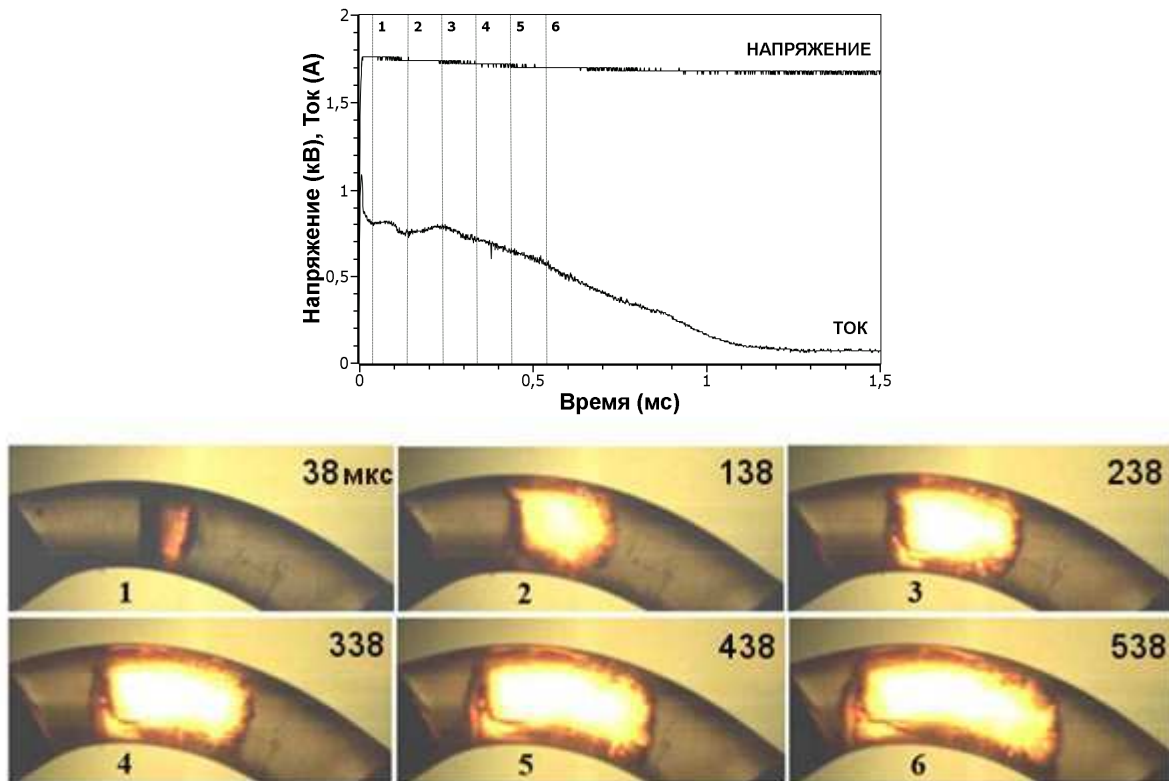


Рис. 3. Осциллограммы тока, напряжения и, соответственно, отдельные кадры динамики гидродинамических процессов при инициировании горения в пропан-кислородном пузырьке.

Отметим, что в отличие от процессов, развивающихся в воздушном пузырьке (Рис. 2), в данном случае наблюдалось свечение во всем объеме растущего пузырька. Это свидетельствует о том, что зажигание произошло на интервале первого кадра (38 мкс.). Средняя скорость движения границы пузырька вдоль оси трубки 5 м/с, что в 5 раз превышает скорость границы для экспериментов с воздушным пузырьком. При этом наблюдается радиальное расширение силиконовой трубки (см. 1 и 4 кадры, Рис. 3). Таким образом, изменение динамики расширения пузырька, наличие свечения во всем объеме пузырька и радиальное расширение трубки свидетельствуют о взрыве газа. При отсутствии зажигания горючего газа скорость роста пузырька соответствует значениям, полученным для воздушного пузырька, и свечение до пробоя не распространяется на весь объем пузырька.

Как следует из представленных результатов, инициирование горючего газа происходит в результате взрыва-пробоя электролитного мениска.

Постановка экспериментов II.

Для детального выявления механизма инициирования горючего газа в пузырьке за счет взрыва и пробоя электролитного мениска были проведены дополнительные модельные эксперименты по выявлению кинетики развития электрического разряда и пробоя в тонких слоях электролита с контролируемыми размерами зоны взрыва. С этой целью была изготовлена специальная стеклянная кювета, которая состояла из двух

секторов с электролитной перемычкой вблизи их вершин.

На первом кадре кинограммы Рис. 4 представлен вид этой кюветы, заполненной электролитом (1). Боковыми стенками кюветы являлись два стеклышка (2) с толщиной h . С помощью варьирования h задавалась толщина слоя электролита, заливаемого в кювету до верхней кромки. Ширина зазора перемычки d между секторами могла варьироваться при установке стеклышек 2. Металлические электроды из нержавеющей стали, в виде отрезков колец с радиусом 8 мм находились симметрично относительно перемычки.

На Рис. 4 представлены осциллограммы тока и напряжения с кадрами синхронной съемки динамики пробоя для 1% раствора хлористого натрия с толщиной слоя электролита $h \approx 100$ мкм ($\pm 20\%$), с шириной перемычки $d = 0,35$ мм (вид сверху).

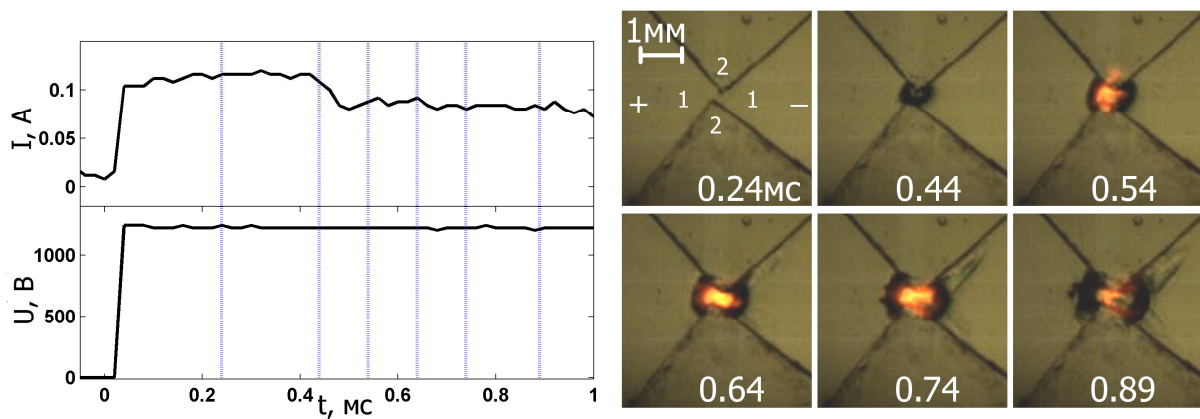


Рис. 4. Осциллограммы тока и напряжения с кадрами синхронной съемки развития пробоя при электрическом взрыве перемычки между секторами плоского слоя 1% NaCl электролита (вид сверху).

На Рис. 5 представлены осциллограммы тока и напряжения с кадрами синхронной съемки развития электрического взрыва перемычки с пробоем для 1% электролита хлористого натрия с толщиной слоя $h \approx 100$ мкм ($\pm 20\%$), с шириной перемычки $d = 0,35$ мм, съемка выполнена сбоку. Отметим, что амплитуда тока на Рис. 4, 5 зависит от начальных напряжений и толщины слоя электролита.

Из данных кинограмм и осциллограмм следует, что падение тока совпадает с разрывом электролитной перемычки. Разрыв электролитной перемычки происходит за счет нагрева электролита электрическим током и его испарения, причем тепловой взрыв за счет перегрева электролита внутри перемычки, с образованием пузырька в слое электролита и его последующего роста до разрыва пузырьком свободной поверхности жидкости. Вклад энергии в фазу образования пузырька и его роста до разрыва перемычки можно определять по моменту падения тока. Для осциллограмм 4 и 5 это соответствует моментам $t \approx 0,45$ мс. Оценка времени начала образования пузырька по току дает $t \approx 0,5$ мс без учета теплоотдачи стеклянной подложке, которая на порядок больше теплопередачи вдоль слоя электролита. По данным осциллограмм вклад энергии в пузырек находится в пределах $0,07$ Дж ($\pm 30\%$), что соответствует нагреву $2 \cdot 10^{-4}$ грамм воды до температуры 100° C.

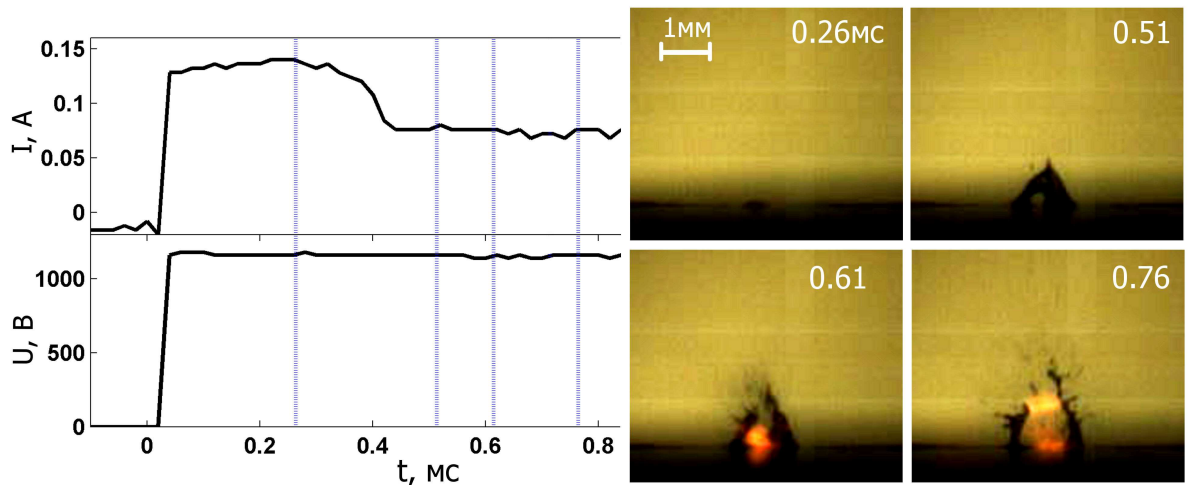


Рис. 5 Осциллограммы тока и напряжения с кадрами синхронной съемки динамики пробоя при электрическом взрыве перемычки между секторами плоского слоя 1% NaCl электролита (вид сбоку).

В целом из экспериментальных результатов следует, что пробой развивается после того, как электролитная перемычка разорвалась паровым пузырьком. После разрыв электролитного токопровода в паро-газовом промежутке δ между жидкими электродами возникает пробой. В начальный момент разрыва токопровода напряженность поля $E=U/\delta$ между возникшими жидкими электродами экстремально велика и существенно превышает среднее значение ($E \approx 1$ кВ/мм) на более поздних стадиях, эта особенность обеспечивает начальный пробой газа. При этом пробой наблюдается и выше высоты кюветы h между брызгами электролита (Рис. 5). Затем процесс пробоя может переходить в квази-стационарный режим разряда между жидкими электродами, с признаками дугового разряда. Возникающий дуговой разряд в зазоре между жидкими электродами выходит на квази-стационарные значения по параметру напряженности электрического поля E , т. е. при уменьшении напряжения ширина промежутка уменьшается пропорционально. С переходом пробоя на квази-стационарный режим наблюдается перемещение границ жидкого катода и анода в сектор катода. При этом расстояние между жидкими электродами δ поддерживается приблизительно на уровне соответствующего значению $E \approx 1$ кВ/мм до полного разряда конденсатора.

По результатам совместных киносъемок и осциллографических измерений тока и напряжения для каждого эксперимента можно оценивать энергию зажигания газа в пузырьке. Она определяется энергией, необходимой для испарения слоя электролита с пробоем. Непосредственно инициирование газа происходит после разрыва электролитической перемычки за счет развития ионизации газа в месте разрыва электролитного токопровода. Так, например, для экспериментов в постановке I суммарная энергия, затрачиваемая на зажигание стехиометрической пропан-кислородной смеси не превышала 0,1 Дж. В результате энергия инициирования зажигания газа пробоем между разлетающимися жидкими электродами не превышала 0,03 Дж.

Из данных экспериментов наглядно следует, что электрический взрыв-пробой тонкого слоя электролита развивается аналогично электрическому взрыву металлических проволок и фольг [3,4]. Однако отметим, что получение полного подобия в постановке экспериментов чрезвычайно затруднено из-за сложности получения цилиндрических электролитных проводников и геометрий типа фольг. Нестабильность в экспериментах обусловлена сложностью получения достаточной однородности сечения жидкого проводника. Именно эта особенность обусловила представленную постановку экспериментов II. Эта постановка экспериментов

обеспечивает удовлетворительную повторяемость за счет заранее задаваемого концентратора тока и позволяет избежать затрат энергии на плавление металла. Таким образом, можно обеспечивать взрывной процесс и пробой газа с инициированием зажигания при напряжениях в пределах 1500 В.

Выводы

Экспериментально показано, что в результате теплового взрыва тонкого слоя электролита в разрывах электролитного токопровода развиваются пробои в газе, которые обеспечивают зажигание газа.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 10-08-00788.

Литература:

1. В.С. Тесленко, В.И. Манжалей, Р.Н. Медведев, А.П. Дрожжин. Сжигание углеводородных топлив непосредственно в водном теплоносителе. // Физика горения и взрыва. – 2010. – Т. 46, № 4. – С. 132-135, <http://www.sws1.newmail.ru/publ/fgv2010.pdf>
2. В.С. Тесленко, А.П. Дрожжин, Р.Н. Медведев, В.И. Манжалей, В.Ю. Ульяницкий. Новые принципы создания тепловых генераторов на основе методов импульсного сжигания углеводородов непосредственно в водном теплоносителе. Сборник тезисов докладов первого международного научно-технического конгресса "ЭНЕРГЕТИКА В ГЛОБАЛЬНОМ МИРЕ" (16–18 июня 2010 г. Россия, Красноярск), С. 85-86, http://www.sws1.newmail.ru/publ/tesl_tepl.pdf
3. Г.В. Иваненков, С.А.Пикуз,Т.А. Шелковенко, В.М. Романова, И.В.Глазырин, О.Г. Котова, А.Н. Слесарева. Обзор литературы по моделированию процессов электрического взрыва тонких металлических проволочек. // Препринт ФИАН 2004г. в.№ 9, ч. 1, 26с., http://ellphi.lebedev.ru/wp-content/uploads/2011/12/2004_9.pdf
4. С.И. Ткаченко, А.П. Мингалеев, В.М. Романова, А.Е. Тер-Оганесян, Т.А. Шелковенко, С.А. Пикуз. Распределение вещества в токопроводящей плазме и плотном керне в канале разряда при взрыве проволочек // Физика плазмы. -2009. –Т.35, № 9. – С.789-818.