

СРОЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 662.61+536.2+537.5

ИНИЦИИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ГАЗОВОЙ СМЕСИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ВЗРЫВОМ ЭЛЕКТРОЛИТА

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

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, teslenko@hydro.nsc.ru

Экспериментально осуществлено инициирование горения стехиометрической пропанокислородной смеси в пузырьке, находящемся в электролите вблизи диэлектрической или металлической стенки. Показано, что инициирование горения в пузырьке происходит в результате электрического взрыва-пробоя тонкого слоя электролита вдоль границы пузырька.

Ключевые слова: электрический взрыв электролита, разряд в газе, пробой в парогазовой среде, инициирование горения.

С целью оптимизации параметров зажигания горючих пузырьков в воде для создания тепловых генераторов, в которых топливо сжигается непосредственно в водном теплоносителе, необходимо установить механизм зажигания горючих смесей в пузырьках электрическим разрядом. Решению этой задачи и посвящены представленные результаты экспериментов. В работах [1, 2] было осуществлено инициирование горения ацетиленокислородного пузырька электрическим разрядом 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, располагаемого на межфазных границах диэлектрик — жидкость — газ.

На рис. 1 представлена постановка первой серии экспериментов для изучения разрядов и пробоев в трубке с инертными и горючи-

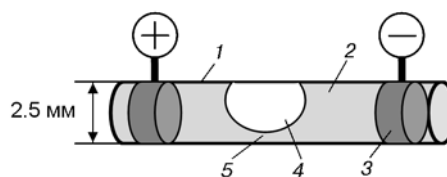


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — прозрачная силиконовая трубка, 2 — электролит, 3 — металлические электроды, 4 — газовый пузырек, 5 — электролитный мениск между пузырьком и трубкой

ми пузырьками. Испытательная ячейка представляла собой прозрачную силиконовую трубку с двумя металлическими электродами в виде трубок. Через отверстия в электродах заливался электролит и вдувался пузырек необходимого состава и размера, при этом между пузырьком и трубкой образовывался электролитный мениск. Расстояние между электродами варьировалось в пределах $5 \div 20$ мм. Внутренний диаметр силиконовой трубки 2.5 мм, внешний — 3.5 мм. Использовался конденсаторный накопитель емкостью 8 мкФ. Собственная индуктивность установки 3 мкГн. Эксперименты проводились при напряжениях $U = 300 \div 1800$ В. В качестве электролита использовались водные растворы хлористого натрия или карбоната калия с концентрацией 1%. Во всех экспериментах совместно с теневой кино-

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 10-08-00788).

© В. С. Тесленко, А. П. Дрожжин, Р. Н. Медведев, В. И. Манжалей, 2012.

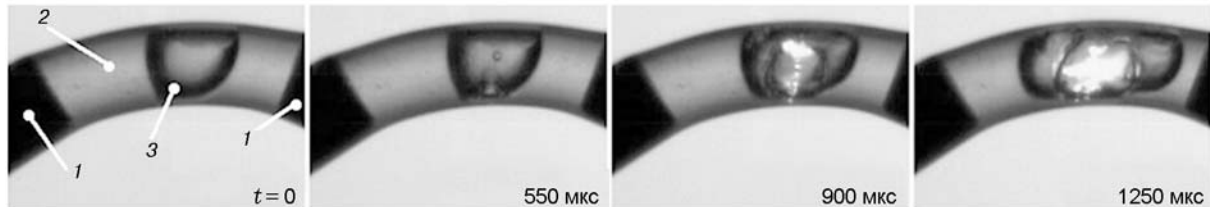


Рис. 2. Динамика электрического взрыва тонкого слоя электролита на границе с пузырьком воздуха:

1 — электроды (слева +, справа –), 2 — электролит (1%-й раствор NaCl), 3 — пузырек воздуха; $U = 1200$ В; скорость съемки 20 000 кадр/с, экспозиция 41 мкс

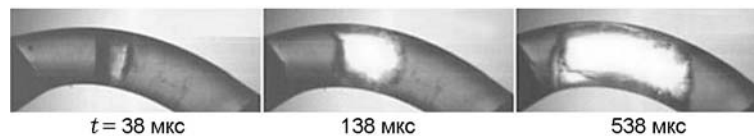


Рис. 3. Динамика гидродинамических процессов при инициировании горения в пропанокислородном пузырьке ($U = 1750$ В, скорость съемки 20 000 кадр/с, экспозиция 41 мкс)

съемкой осуществлялась синхронная регистрация тока и напряжения на электродах с помощью осциллографа TDS-210.

На рис. 2 приведены кадры киносъемки развития электрогидродинамических процессов в силиконовой трубке с воздушным пузырьком в 1%-м водном растворе хлористого натрия. Из кинограммы следует, что в результате нагрева током 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, обусловленные ионизацией 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 расширяющимся пузырьком 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 все пространство расширяющегося пузырька до момента сквозного пробоя. При увеличении начального напряжения на конденсаторе до 1800 В качественная динамика пробоя сохраняется, при этом уменьшается время

начальной стадии взрыва мениска.

На рис. 3 представлены отдельные кадры, иллюстрирующие динамику инициирования зажигания и горения в трубке пропанокислородного пузырька. Отметим, что в отличие от процессов, развивающихся в воздушном пузырьке, в данном случае свечение наблюдалось во всем объеме растущего пузырька. Это свидетельствует о том, что зажигание произошло в интервале $38 \div 79$ мкс от момента подачи напряжения (первый кадр). Средняя скорость движения границы пузырька вдоль оси трубки 5 м/с, что в пять раз превышает скорость границы в экспериментах с воздушным пузырьком при таком же начальном напряжении. При этом наблюдается радиальное расширение силиконовой трубки (см. 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 соответствовала значениям, полученным при пробое в воздушном пузырьке. Минимальное напряжение, при котором инициировалось зажигание газа в данной постановке, было 1500 В. Порог зажигания газа в трубке зависит от двух параметров: начального напряжения на конденсаторе и размеров электролитного мениска. В данной постановке эксперимен-

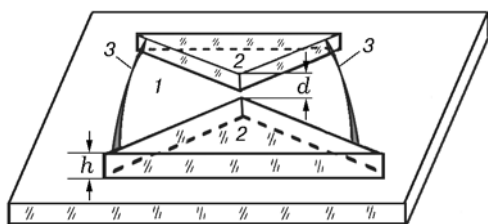


Рис. 4. Кювета для исследования электрического разряда и пробоя в тонком слое электролита:

1 — электролит, 2 — стенки кюветы (стекло), 3 — металлические электроды; d — ширина перемычки, h — высота кюветы

тов минимальную толщину мениска контролировать не удается.

Была проведена вторая серия модельных экспериментов с целью изучения развития электрического разряда и пробоя в тонких слоях электролита с контролируруемыми размерами зоны взрыва. Для них была изготовлена специальная стеклянная кювета, схема которой представлена на рис. 4.

Кювета состояла из двух секторов, заполняемых электролитом, с открытой перемычкой шириной d вблизи их вершин. Боковыми стен-

ками кюветы являлись две стеклянные пластинки толщиной h . Металлические электроды из нержавеющей стали в виде отрезков колец с радиусом кривизны 8 мм находились симметрично относительно перемычки. Путем варьирования высоты пластины h задавали толщину слоя электролита, заливаемого в кювету до верхней кромки кюветы. Ширину зазора перемычки d между секторами изменяли, устанавливая стеклянные пластинки 2. На первом кадре кинограммы рис. 5, *a* показан реальный вид этой кюветы сверху, заполненной электролитом.

На рис. 5, *a* представлены кадры съемки динамики пробоя (вид сверху), а на рис. 5, *б* — кадры съемки развития электрического взрыва перемычки с пробоем (съемка выполнена сбоку) в эксперименте с 1%-м раствором хлористого натрия с толщиной слоя $h \approx 100$ мкм ($\pm 20\%$) и шириной перемычки $d = 0.35$ мм. Отметим, что амплитуда тока зависит от начальных напряжений и толщины слоя электролита. В данных экспериментах падения напряжения до начала пробоя не наблюдалось.

Из кинограмм и осциллограмм следует, что падение тока совпадает с разрывом электролитной перемычки, что соответствует уве-

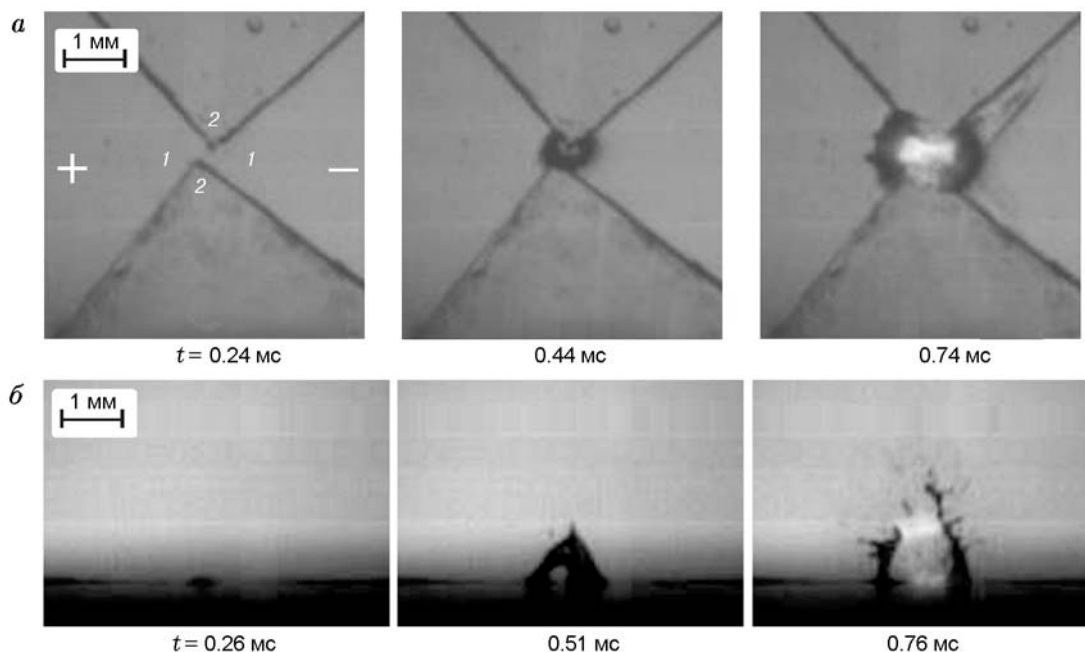


Рис. 5. Кадры съемки развития пробоя при электрическом взрыве перемычки между секторами плоского слоя электролита (1%-го раствора NaCl):

a — вид сверху, 1, 2 соответствуют рис. 4, $U = 1200$ В, *б* — вид сбоку, $U = 1100$ В; скорость съемки 20 000 кадр/с, экспозиция 41 мкс

личению сопротивления за счет разрыва электролита и началу пробоя между образовавшимися жидкими электродами. Разрушение электролитной перемычки происходит внутри нее из-за перегрева электролита током с образованием пузырька и его последующим ростом до разрыва пузырьком свободной поверхности жидкости. Вклад энергии в образование пузырька и его рост до разрыва перемычки определялись путем интегрирования осциллограммы тока и напряжения до момента падения тока. Для регистрируемых осциллограмм тока это соответствует моменту времени $t \approx 0.45$ мс. Оценка времени начала образования пузырька по току дает значение $t \approx 0.5$ мс без учета теплоотдачи стеклянной подложке, которая на порядок больше теплопередачи вдоль слоя электролита. По данным интегрирования осциллограмм вклад энергии в пузырек примерно составляет 0.07 Дж ($\pm 30\%$), что соответствует нагреву $2 \cdot 10^{-4}$ г воды до температуры 100°C .

В целом из экспериментальных результатов следует, что пробой развивается после того, как электролитная перемычка разрывается паровым пузырьком. После разрыва в парогазовом промежутке δ между жидкими электродами возникает пробой. В начальный момент разрыва токопровода напряженность поля $E = U/\delta$ между возникшими жидкими электродами достигает порогового значения пробоя газа в пузырьке. При этом пробой наблюдается и выше высоты кюветы h между брызгами электролита (см. рис. 5, б; $t = 0.46$ мс). Затем процесс пробоя переходит в квазистационарный режим разряда между жидкими электродами с признаками дугового разряда. Возникающий дуговой разряд в зазоре между жидкими электродами выходит на квазистационарные значения напряженности электрического поля E , среднее значение $E \approx 1$ кВ/мм. С переходом пробоя на квазистационарный режим наблюдается перемещение границ жидкого катода и анода в сектор катода. При этом расстояние между жидкими электродами δ поддерживается приблизительно на уровне, соответствующем значению $E \approx 1$ кВ/мм. На более поздних стадиях разряда, при уменьшении напря-

жения на электродах, зазор в дуговом разряде уменьшается. При этом среднее значение напряженности электрического поля сохраняется на уровне $E \approx 1$ кВ/мм, т. е. при уменьшении напряжения ширина промежутка уменьшается пропорционально.

По результатам киносъемок и осциллографических измерений тока и напряжения для каждого эксперимента можно оценить энергию зажигания газа в пузырьке. Она определяется энергией, необходимой для испарения слоя электролита и пробоя. Непосредственно иницирование горения газа происходит после разрыва электролитической перемычки за счет ионизации газа в месте разрыва электролитного токопровода. Так, например, для экспериментов в первой постановке суммарная энергия, затрачиваемая на испарение и ионизацию, в случае зажигания стехиометрической пропанокислородной смеси не превышала 0.1 Дж. В результате энергия зажигания газа пробоем, возникшим между разлетающимися жидкими электродами, составляла не более 0.03 Дж.

Итак, в работе экспериментально показано, что в результате теплового взрыва тонкого слоя электролита в разрывах электролитного токопровода развиваются пробой в парогазовой среде, которые обеспечивают зажигание горючей газовой смеси.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тесленко В. С., Манжалей В. И., Медведев Р. Н., Дрожжин А. П. Сжигание углеводородных топлив непосредственно в водном теплоносителе // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 4. — С. 132–135.
2. Тесленко В. С., Дрожжин А. П., Медведев Р. Н., Манжалей В. И., Ульяницкий В. Ю. Новые принципы создания тепловых генераторов на основе методов импульсного сжигания углеводородов непосредственно в водном теплоносителе // Сборник тез. докл. 1-го междунар. науч.-техн. конгресса «Энергетика в глобальном мире» (16–18 июня 2010 г., Россия, Красноярск). — С. 85–86. — <http://www.sws1.newmail.ru/publ/tesl.tepl.pdf>.

Поступила в редакцию 5/VI 2012 г.