

В.Г. Жекул, О.В. Хвошан, А.П. Смирнов, Э.И. Тафтай, И.С. Швец

АНАЛИЗ И РАЗВИТИЕ ПУЗЫРЬКОВОЙ МОДЕЛИ СТАДИИ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПРОБОЯ ВОДНОГО ПРОМЕЖУТКА

Виконано огляд і аналіз сучасних уявлень про передпробійні процеси при високовольтному електричному розряді в рідині. Показано, що «бульбашкова» («bubble») модель запалювання розряду може бути застосована при напруженості електричного поля (36 – 180) кВ/см. За результатами експериментальних досліджень електричних характеристик розряду у водному електроліті при підвищеному гідростатичному тиску і мінімальній напрузі, що забезпечує запалювання розряду, отримала подальший розвиток бульбашкова модель стадії формування його високовольтного пробоя. Запропоновано якісний опис трьох фаз стадії формування плазмового каналу в рідкому електроліті. Бібл. 19, рис. 4.
Ключові слова: високовольтний електричний розряд, рідкий електроліт, осцилограма, передпробійні процеси, бульбашкова модель.

Выполнен обзор и анализ современных представлений о предпробойных процессах при высоковольтном электрическом разряде в жидкости. Показано, что «пузырьковая» («bubble») модель зажигания разряда применима при напряженности электрического поля (36 – 180) кВ/см. По результатам экспериментальных исследований электрических характеристик разряда в водном электролите при повышенном гидростатическом давлении и минимальном напряжении, обеспечивающем зажигание разряда, получила дальнейшее развитие пузырьковая модель стадии формирования его высоковольтного пробоя. Предложено качественное описание трех фаз стадии формирования плазменного канала в жидком электролите. Библ. 19, рис. 4.

Ключевые слова: высоковольтный электрический разряд, жидкий электролит, осциллограмма, предпробойные процессы, пузырьковая модель.

Введение. Развитие электрогидравлических технологий во второй половине двадцатого века вызвало повышенный интерес к изучению характеристик импульсного электрического разряда в жидкости во всем мире. При высоковольтном подводном электровзрыве, реализуемом разрядом конденсатора на водный промежуток [1], выделяют три основные стадии:

- 1) стадия формирования плазменного канала, замыкающего межэлектродный промежуток;
- 2) канальная стадия, характеризующаяся резким возрастанием разрядного тока и быстрым выделением электрической энергии в канале высокой проводимости, замыкающем противоположные электроды;
- 3) послеразрядная стадия – пульсация парогазовой полости после окончания выделения электрической энергии в разрядном канале.

В значительной степени канальная и послеразрядная стадии, а, следовательно, эффективность выделения энергии в канале и усиление воздействия на объект зависят от параметров стадии формирования.

Целью работы являлся обзор существующих механизмов формирования канала высоковольтного разряда с анализом и развитием пузырьковой модели стадии формирования пробоя водного промежутка.

Основные определения. На рис. 1 приведены типичные осциллограммы тока и напряжения при высоковольтном пробое проводящей жидкости [2]. По данным осциллограммам определяют следующие параметры стадии формирования токопроводящего канала:

- долидерное время (время зажигания разряда) t_{dl} – время от момента приложения напряжения к электродной системе U_0 до момента начала возрастания тока, соответствующего моменту появления плазменного лидера на одном из электродов;
- лидерное время t_l – время от момента начала возрастания тока до начала резкого спада напряжения U_{0a} и одновременного увеличения скорости нараста-

ния тока, что характеризует наступление канальной стадии разряда.

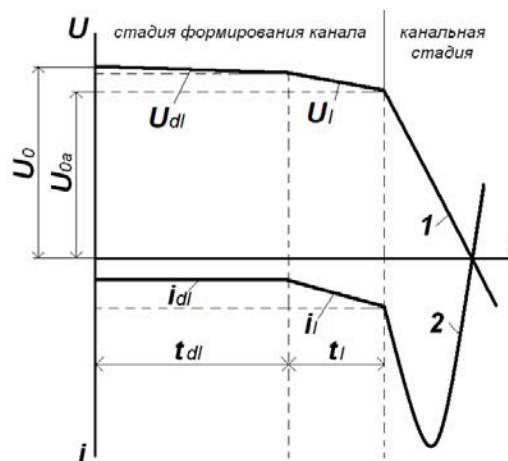


Рис. 1. Осциллограммы тока и напряжения при пробое проводящей жидкости: 1 – напряжение U ; 2 – ток i

Долидерной стадии соответствуют примерно постоянный ток i_{dl} и медленно спадающее напряжение U_{dl} , крутизна которого определяется постоянной времени разряда накопителя. Рост системы лидеров на лидерной стадии ведет к уменьшению сопротивления промежутка, увеличению тока i_l и снижению напряжения U_l . Под напряжением зажигания разряда U_z будем понимать то минимальное напряжение, при котором на электроде формируется плазменная ветвь, под напряжением пробоя – то минимальное напряжение, при котором разряд переходит в канальную стадию. Время предпробойной стадии формирования токопроводящего канала t_{pp} вычисляется по формуле:

$$t_{pp} = t_{dl} + t_l. \quad (1)$$

Краткий обзор представлений о предпробойных процессах в жидкости. Непосредственно после подачи напряжения на электродную систему в жидкости,

© В.Г. Жекул, О.В. Хвошан, А.П. Смирнов, Э.И. Тафтай, И.С. Швец

заполняющей межэлектродный промежуток, начинаются процессы, которые могут привести, в конечном итоге, к формированию плазменных ветвей. Воздействии поля сопровождается появлением токов, которые можно зарегистрировать с помощью специальной аппаратуры. Дальнейшее изменение электрического поля в межэлектродном промежутке будет наблюдаться за счет снижения напряжения на конденсаторе и явлений, происходящих в самой жидкости при приложении поля.

Теория развития пробойных явлений в жидкостях первоначально базировалась на исследовании разрядов в газах. В тридцатых годах двадцатого века советский ученый Л.А. Юткин получил первые экспериментальные результаты по электрогидравлическому эффекту, а особое внимание процессам при высоковольтном пробое жидкостей начало уделяться, начиная со второй половины двадцатого века.

Первоначально выделялись две группы гипотез о механизме формирования разряда в жидкостях в зависимости от того, каким образом в них объясняется появление носителей заряда. Первая группа объединяла гипотезы, в которых процесс формирования разряда не предполагал нарушения фазовой однородности жидкости. Вторая группа предусматривала газообразование в жидкости и лишь затем – ионизацию и пробой. В.Я. Ушаков объединил первую группу механизмов термином электрический пробой, вторую – электротепловой пробой [3]. Электрический пробой предусматривает развитие ионизационных процессов в жидкости, электротепловой – развитие первичных ионизационных процессов в газовой фазе после вскипания жидкости.

Под электротепловым механизмом инициирования разряда автор подразумевал следующую совокупность явлений: протекание под действием приложенного электрического поля тока проводимости, разогрев жидкости в приэлектродных областях с максимальной напряженностью поля, вскипание жидкости, ионизация парогазовых полостей, формирование зачатка плазменного канала. Этот механизм может реализовываться при больших значениях произведения удельной электропроводности жидкости на длительность воздействия напряжения. Поскольку при импульсных воздействиях длительность приложенного к противоположным электродам напряжения обычно не превосходит нескольких сотен микросекунд, то такой механизм инициирования вероятен в жидкостях с большой удельной электропроводностью, прежде всего в электролитах. Электротепловой механизм инициирования автор считал редким для импульсного пробоя жидкостей.

И.П. Кужекин трактовал механизм пробоя воды с удельной электропроводностью $2,5 \cdot 10^{-4}$ См/см электротепловым [4] при напряженностях поля у острых электродов $E = (8 - 36)$ кВ/см. Через сотни – тысячи микросекунд от момента приложения напряжения вблизи острия возникает свечение, расширение которого приводит к пробое промежутка. При $E = (36 - 180)$ кВ/см имеет место лидерная форма разряда, причем образованию лидеров предшествует свечение высоковольтного электрода. При $E > 180$ кВ/см свечение до

возникновения лидеров не наблюдается. При малых E движение лидеров ступенчатое, при больших – непрерывное.

Расчет динамики образования газового пузыря в воде и его нагрева под воздействием приложенного к электродам напряжения по электротепловой модели при напряженности электрического поля до 10 кВ/см приведен в [5]. Использование мультифизической модели расчета в программе COMSOL показало, что разряд в воде с удельной проводимостью 3 См/м накопительной емкости 5 мФ, заряженной до напряжения 3 кВ, ведет к повышению температуры в межэлектродном промежутке до (300 – 800) К и переходу воды в парообразное состояние.

Электрический механизм пробоя идентифицировался В.Я. Ушаковым [3] по отсутствию газообразования в жидкости до появления свечения, высокой скорости прорастания ветви пробоя (до 10^5 м/с и более), отсутствию зависимости электрической прочности от температуры жидкости вплоть до точки кипения и от электропроводности жидкости.

Рассматривая пробой низкопроводящих и диэлектрических жидкостей, авторы работы [6] выдвигают идею о значительной роли эмиссии, ударной ионизации и автоионизации молекул жидкости. По их мнению, автоионизация происходит в приэлектродном слое жидкости под действием поля микрорельефа поверхности электрода. Напряженность такого поля может на три порядка превосходить среднюю напряженность поля в промежутке, а возникающие при автоионизации электроны движутся к аноду, размножаясь по пути за счет ударной ионизации.

В [7] изучалось влияние импульсов напряжения наносекундной длительности на пробой дистиллированной воды с обоснованием электрострикции как фактора развития возмущений оптической плотности и разрежения воды, инициирующего пробой.

В кратком обзоре механизмов формирования стримерных разрядов в жидкости [8] упомянуты влияние факторов молекулярной ионизации и ионной диссоциации, зависящей от электрического поля, механизма Аугера (Auger mechanism), сопровождающих электрический механизм пробоя.

Исследованию электрических и гидродинамических характеристик разряда в воде при повышенном гидродинамическом давлении (до 8 МПа) посвящена работа [9]. Здесь изучался разряд емкостного накопителя на 60 мкФ, заряженного до (8 – 13) кВ. Исследование показало, что в диапазоне (0,1 – 4) МПа в воде присутствуют газовые пузырьки, которые влияют как на предпробивные характеристики разряда, так и на амплитуду возбуждаемой разрядом волны давления. При этом в диапазоне до 3 МПа с увеличением гидростатического давления амплитуда импульса давления возрастает, а при дальнейшем увеличении гидростатического давления до 8 МПа – уменьшается.

Таким образом, исследователи четко выделяют механизм формирования разряда в жидкости по электротепловой модели (при напряженности электрического поля до 36 кВ/см) и по электрической модели (при напряженности свыше 180 кВ/см). В диапазоне напряженностей, ограниченном указанными числен-

ными значениями, ученые предложили «пузырьковую» («bubble») модель зажигания разряда в жидкости.

«Пузырьковая» модель зажигания разряда. Одна из первых гипотез о механизме импульсного электрического пробоя воды на основе «пузырьковой» модели зажигания как части электротепловой модели была выдвинута Э.В. Яншиным. Результаты исследований [10] позволили авторам сделать вывод о том, что движение электронов в конденсированной среде будет сопровождаться выделением в ней энергии в таком количестве, которое обеспечит ударное вскипание жидкости и образование микропузырьков, приводящее к нарушению оптической однородности жидкости. В этих пузырьках развиваются ионизационные явления, что и приводит к формированию ветви пробоя. Э.В. Яншин отмечает возможность развития неустойчивостей в этой стадии, связывая с ними неупорядоченную структуру дендритов. После пробоя газового микропромежутка вновь происходит вскипание соседнего слоя жидкости у головки проросшего лидера, далее процесс повторяется.

Дальнейшее развитие «пузырьковая» модель пробоя полярных и неполярных диэлектрических жидкостей получила в работах С.М. Коробейникова [11]. Согласно результатам эксперимента, в условиях низкого гидростатического давления пузырьки могут как существовать вблизи электродов, так и образовываться с течением времени после приложения к ним напряжения за счет микрокавитации, локального перегрева жидкости и электрострикционных явлений. Модель процессов, приводящих к пробоям диэлектрика, предполагала разряд в пузырьке при достижении на нем критического напряжения, деформацию пузырька кулоновскими силами, усиление поля в области полюсов пузырька и переход разряда в жидкость после достижения критической напряженности поля. На основании теоретического анализа автор аналитически получил частное решение для оценки времени роста пузырька, которое он связывает с предпробойным временем при подаче ступенчатого напряжения.

Согласно гипотезе автора [11], под действием электрического поля после достижения на пузырьке некоторого значения падения напряжения (обусловленного как ростом пузырька, так и величиной приложенного к электродам напряжения) в нем возникают ионизационные процессы (частичные разряды). После разряда поле в пузырьке уменьшается вследствие экранирования внешнего поля осевшими зарядами, что вызывает ослабление либо прекращение ионизационных процессов. Действие электрического поля на осевший заряд приводит к вытягиванию пузырька вдоль поля, а также к продвижению заряда вглубь жидкости со скоростью, определяемой подвижностью носителей заряда. При этом возможны две ситуации: поддержание разряда в виде тлеющего разряда либо прекращение разряда.

В первом случае на пузырьке поддерживается напряжение, по-видимому, соответствующее закону Пашена. В последнем случае напряжение на пузырьке растет, что ведет к повторному разряду и движению в жидкости новой волны зарядов. Определяющий параметр – давление на стенку пузырька – обусловлен

действием кулоновских сил на инжектированный и поверхностный заряды и ростом давления в пузырьке за счет нагрева газа в нем. Зажигание разряда в жидкости произойдет, когда напряженность поля вблизи полюса пузырька достигнет критического значения.

Критерием зажигания разряда в жидкости автор считал достижение некоторой критической напряженности $E_{\max} = (10^7 - 10^8)$ В/см. Предложенная пузырьковая модель позволяет, по мнению автора, считать предпробойное время. Однако, величина напряженности поля, при которой происходит пробой жидкостей, определялась по формуле Мартина:

$$E_b = \frac{A}{t^{0,5} \cdot S^{0,1}}, \quad (2)$$

где A – постоянная, зависящая от сорта жидкости и полярности иницирующего электрода, t – длительность импульса приложенного напряжения, S – параметр, зависящий от оголенной части электрода.

Исследования пробоя проводящих недегазированных жидкостей, результаты которых приведены в [12], позволили авторам сделать вывод о том, что в диапазоне электропроводности жидкости ($2 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-3}$) См/см в промежутках (3,5 – 13) см ее пробой в неоднородном поле не связан с предварительным образованием сплошного газового мостика даже при временах в несколько десятков микросекунд. Газовые пузырьки образуются вблизи электрода или головки канала разряда, а ионизация этих пузырьков способствует развитию разрядного канала.

В [13] исследовались процессы иницирования и распространения положительных подводных стримеров в воде при применении импульсного напряжения с длительностью 10 мкс на основании осциллографирования электрических характеристик разряда и теневой съемки развития разряда ультравысокоскоростной камерой. Так, при напряженности поля у острейшего электрода 10 МВ/см были зафиксированы кластеры микропузырьков вблизи электрода, внутри которых происходили микроразряды, характеризовавшиеся свечением в жидкости.

Приведенные результаты говорят о том, что исследованием предпробойных характеристик жидкостей занимались ученые многих стран мира. Основой исследований практически всегда был эксперимент с использованием наиболее современной техники для получения необходимых эмпирических зависимостей.

Зажигание разряда в проводящих жидкостях. Исследованием механизмов формирования разряда в проводящих жидкостях на протяжении ряда лет занимались специалисты ИИПТ НАН Украины. Так, единый подход к описанию быстрых и медленных искровых разрядов в конденсированных средах как волн фазовых превращений предложен в [14]. В [15] изложены результаты экспериментального исследования влияния высокого гидростатического давления (до 50 МПа) и температуры (до 373 К) на стадию формирования канала разряда в жидкости и каналную стадию разряда. На основе этих экспериментальных данных величина напряжения зажигания разряда для водных промежутков от 30 до 40 мм оценивается эмпирической формулой [15]:

$$U_z = 32,9 \cdot P_{gs}^n \cdot \left(\frac{r_{el}}{\sigma_0} \right)^{0,45}, \quad (3)$$

$$n = \begin{cases} 0,1 - 0,12; & \sigma_0 = (0,5 - 0,1) S/m \\ 0,12 - 0,13; & \sigma_0 = (0,1 - 0,03) S/m \end{cases}$$

где U_z – величина напряжения зажигания разряда, кВ; P_{gs} – гидростатическое давление, Па; σ_0 – удельная электропроводность водного электролита, См/м; r_{el} – радиус закругления стержневого электрода, м.

Теоретическое описание начальной стадии разряда в проводящей жидкости, основанное на гипотезе о развитии неустойчивостей в ее объеме под действием электрического поля, представлено в [16]. Математическая модель включала систему дифференциальных уравнений, описывающих развитие перегретой неустойчивости с учетом электрогидродинамических явлений и стабилизирующих факторов теплопередачи. Отмечалась возможная роль электроконвективной неустойчивости в процессе прорастания ветви пробоя. Результаты расчета постоянной времени развития перегретой неустойчивости для сферической геометрии электродной системы сравнились с длительностью долидерной стадии разряда, измеренной экспериментально при скоростном фотографировании предпробойной стадии разряда высоковольтного конденсатора на водный промежуток с синхронным осциллографированием его электрических характеристик. Сравнение результатов расчета и эксперимента подтвердило правильность выдвинутой теории.

Развитие теории пробоя проводящих жидкостей представлено в [2, 17]. Было выдвинуто предположение, что порог зажигания разряда в проводящей жидкости определится условиями, обеспечивающими самостоятельность разряда в образовавшейся парогазовой каверне. Картина зажигания представлялась следующим образом. Парогазовая полость образуется у электрода с максимальной напряженностью, в результате продолжающегося нагрева жидкости увеличивается в своем размере d . Рост полости сопровождается увеличением приложенного к ней напряжения $U(d)$, величина которого определяется в том числе разностью потенциалов между электродами. Пробой полости возможен при достижении пробивного напряжения и размера газового промежутка критических значений, которые можно оценить формулой Пашена:

$$U(d) = U_{cr}(p \cdot d), \quad (4)$$

где p – давление газа в пузырьке.

Величина критических значений напряжения и диаметра рассчитывалась для системы сферических концентрических электродов с пренебрежением неоднородностью поля в каверне. Результаты расчетов сравнивались с экспериментальными данными. Эксперимент проводился на электродной системе «острие – плоскость», причем стержень выступал из-под изолирующего наконечника в виде полусферы. Схема экспериментальных исследований обеспечивала практически прямоугольный импульс напряжения в стадии зажигания разряда. Эксперимент проводился в воде с удельной проводимостью ($10^{-1} - 10^{-3}$) См/м при атмосферном гидростатическом давлении. Сравнение расчетных и экспериментальных значений напряжения

зажигания показало неплохую сходимость в диапазоне изменения радиуса электрода-острия (0,5 – 5,0) мм и межэлектродного промежутка (60 – 100) мм.

В соответствии с приведенной в [18] моделью напряжение зажигания U_z должно определяться как максимальное из двух величин:

$$U_z = \max(U_{por}, U_{cr}), \quad (5)$$

где U_{por} – пороговое (минимальное) напряжение, при котором возможно развитие перегретой неустойчивости; U_{cr} – критическое напряжение ионизации газа в образующихся в зонах нагрева пузырьках, которое приводит к пробую пузырька и последующему образованию плазменной ветви пробоя.

Порог развития перегретой неустойчивости определяется энергоемкостью источника и обеспечивается поддержанием постоянного напряжения в межэлектродном промежутке. В случае, когда источником напряжения является заряженная конденсаторная батарея, пороговое напряжение определяется согласно выражению

$$U_{por} = \left(\frac{\rho \cdot c_p \cdot r_{el}^2}{\alpha \cdot \sigma_0 \cdot R \cdot C} \right), \quad (6)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³; c_p – удельная теплоемкость жидкости, Дж/(кг·К); σ_0 – электропроводность жидкости, См/м; α – температурный коэффициент электропроводности жидкости, К⁻¹; R – сопротивление межэлектродного промежутка, Ом; C – емкость конденсаторной батареи, Ф; r_{el} – радиус анода, м.

Для электродной системы стержень – плоскость сопротивление межэлектродного промежутка может быть рассчитано по выражению (7) с использованием расчетной схемы, представленной на рис. 2, в которой электродная система моделируется концентрическими полусферами [2].

$$R = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_0} \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right), \quad (7)$$

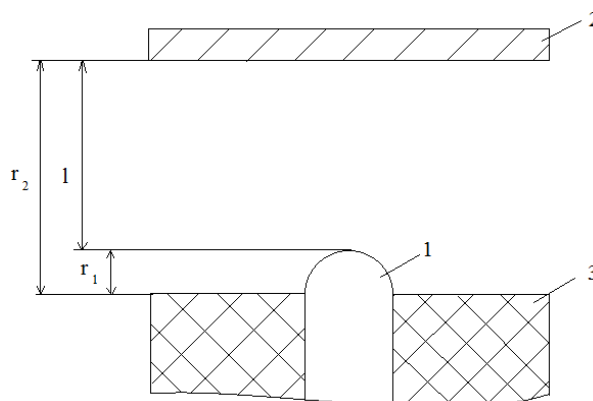


Рис. 2. Схема расчета сопротивления промежутка в электродной системе стержень – плоскость: 1 – электрод-анод (стержень); 2 – электрод-катод (плоскость); 3 – изолятор; l – длина межэлектродного промежутка, м; $r_2 = l + r_1$

Критическое напряжение U_{cr} определяется как напряжение пробоя пузырька диаметром d_{cr} , появляющегося в зонах максимального нагрева жидкости. Согласно [2], для электродной системы, приведенной

на рис. 2, критическое напряжение пробоя газового пузырька можно определить по выражению

$$U_{cr} = \frac{B \cdot p_0 \cdot d_{cr}}{c + \ln(p_0 \cdot d_{cr})} \cdot \left[1 - \frac{1}{h-1} \cdot \left(\frac{h}{1 + \frac{d_{cr}}{r_1}} - 1 \right) \right]^{-1}, \quad (8)$$

где B , c – эмпирические константы, зависящие от состава газа внутри пузырька (например, для паров воды при $E/p = 120 - 800$ (В·м)/Н константы $B = 290$, $c = 0,3 - 0,6$); p_0 – нормальное атмосферное давление, $p_0 \approx 10^5$ Па; $h = r_2/r_1$; d_{cr} – критический (минимальный) размер пузырька, при котором происходит его пробой, определяется согласно (9):

$$d \cdot [c + \ln(p_0 \cdot d) - 1] = r_1. \quad (9)$$

Расчет по формуле (8) предполагает следующие допущения:

- поле внутри пузырька однородно;
- давление внутри пузырька равно атмосферному;
- напряжение $U(d)$, приложенное к пузырьку, определяется как разность потенциалов между поверхностью электрода-анода и эквипотенциальной поверхностью, отстающей от нее на расстоянии d ;
- искажения, вносимые пузырьком в распределение поля в приэлектродной области, не учитываются;
- напряжение пробоя пузырька определяется законом подобия Пашена.

Представленная пузырьковая модель позволяет оценить напряжение зажигания электрического разряда в воде при нормальных атмосферных условиях.

Обоснование пузырьковой модели разряда по результатам осциллографирования его электрических характеристик. Физическая сущность пузырьковой модели хорошо анализируется при обработке осциллограмм пороговых режимов разряда в водном электролите при повышенном гидростатическом давлении (рис. 3). В этих режимах можно наблюдать зажигание разряда (свечение) вблизи анода, но стример либо не достигает противоположного электрода-катода (рис. 3,а), либо остаточное напряжение на конденсаторе на момент начала канальной стадии настолько мало, что ток активной стадии разряда сравним с предпробойными токами (рис. 3,б). Осциллограммы были получены на лабораторном стенде, позволяющем моделировать высоковольтный пробой водного промежутка в условиях высокого гидростатического давления [19].

Как видно из рис. 3,а, момент срабатывания фотодиодного датчика, установленного на расстоянии 60 мм напротив канала разряда для регистрации начала свечения, совпадает с характерным изгибом кривой тока на стадии формирования разряда. Для качественного анализа физических процессов, происходящих на этой стадии разряда, были построены временные зависимости изменения активного сопротивления водного промежутка в электродной системе (отношение напряжения на промежутке к току в нем). Зависимости приведены на рис. 4. Они соответствуют результатам обработки осциллограмм, изображенных на рис. 3.

Анализ данных рис. 4 показал, что стадию формирования электрического разряда в жидкости можно разбить на ряд временных фаз.

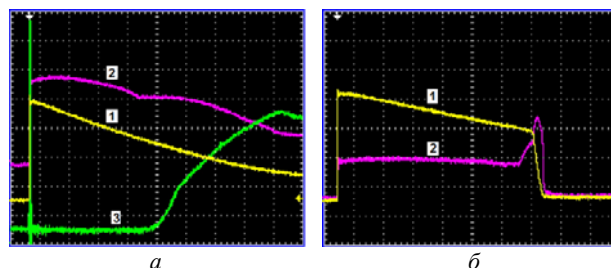


Рис. 3. Осциллограммы пороговых режимов электрического разряда емкости $C = 2,47$ мкФ, заряженной до напряжения U_0 , в электродной системе «острие-плоскость» с радиусом острия-анода $r_{el} = 1,5$ мм и длиной межэлектродного промежутка $l = 24$ мм, заполненной водным электролитом с удельной электропроводностью $\sigma_0 = 0,2$ См/м при гидростатическом давлении $P_{gs} = 10$ МПа:

1 – напряжение на разрядном промежутке; 2 – разрядный ток; 3 – сигнал фотодиодного датчика, регистрирующего свечение вблизи анода; а – $U_0 = 17$ кВ; б – $U_0 = 18,5$ кВ

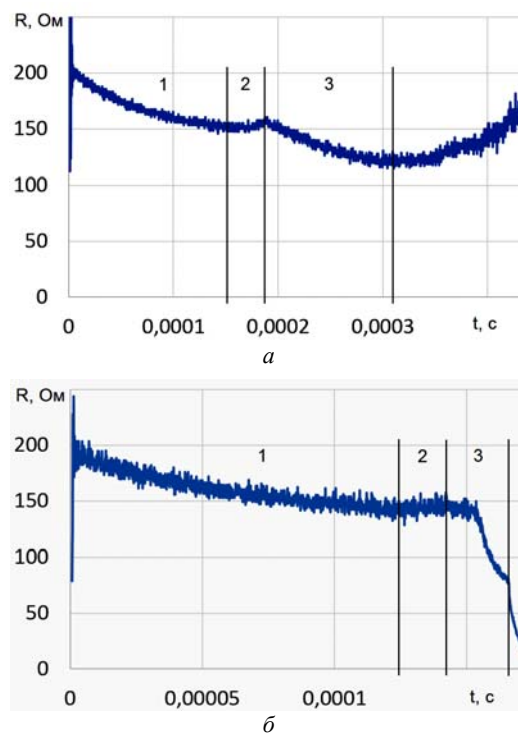


Рис. 4. Изменение сопротивления водного промежутка, рассчитанное по осциллограммам рис. 3: а – $U_0 = 17$ кВ; б – $U_0 = 18,5$ кВ

В момент приложения напряжения к межэлектродному промежутку в водном электролите через него начинают протекать предпробойные токи. Под их действием происходит джоулев нагрев, что сопровождается повышением температуры электролита и снижением активного сопротивления промежутка в фазе 1.

На границе фаз 1 и 2 происходит стабилизация сопротивления с его последующим ростом в фазе 2. Мы предполагаем, что данное изменение вызвано началом процесса образования газовых пузырьков вблизи электрода-катода. В результате площадь поверхности катода, соприкасающейся с электролитом,

уменьшается, а плотность тока и температура границы соприкосновения продолжают возрастать.

На границе фаз 2 и 3 сопротивление снова начинает уменьшаться. Мы считаем, что в этот момент времени размер газового пузырька достигает критического значения, при котором остаточное напряжение, приложенное к электродной системе, способствует пробоем пузырька с образованием стримера. Следует отметить, что при относительно малом гидростатическом давлении жидкость уже насыщена газовыми включениями, поэтому длительность фаз 1 и 2 в этом случае гораздо меньше, чем при повышенном давлении, что неоднократно было подтверждено опытным путем. Рост стримера (либо системы стримеров) ведет к уменьшению сопротивления за счет уменьшения расстояния между его головкой и катодом, а также дальнейшего увеличения температуры электролита. Фаза роста стримеров может завершиться затуханием (рис. 4,а) с последующим восстановлением сопротивления промежутка, либо достижением стримером катода, образованием канала малой проводимости с выделением оставшейся в накопителе энергии в активной стадии разряда и резким уменьшением сопротивления (рис. 4,б).

Выводы.

1. Выполнен обзор и анализ современных представлений о предпробойных процессах при высоковольтном электрическом разряде в жидкости, который показал, что «пузырьковая» («bubble») модель зажигания разряда в жидкости применима при напряженности электрического поля (36 – 180) кВ/см.

2. По результатам экспериментальных исследований электрических характеристик разряда в водном электролите при повышенном гидростатическом давлении и минимальном напряжении, обеспечивающем зажигание разряда, получила дальнейшее развитие пузырьковая модель стадии формирования его высоковольтного пробоя. Предложено качественное описание трех фаз стадии формирования плазменного канала в жидком электролите.

3. Дальнейшее развитие методики расчета предпробойных характеристик электрического разряда в жидкости на основе пузырьковой модели может определить пути повышения эффективности работы ряда высоковольтных электроразрядных устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гулый Г.А. Основы разрядноимпульсных технологий. – К.: Наукова думка, 1990. – 208 с.
2. Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости. – К.: Наукова думка, 1986. – 208 с.
3. Ушаков В.Я. Физика пробоя жидких диэлектриков // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т.307. – №2. – С. 80-87.
4. Кужекин И.П. Исследование пробоя жидкости в неоднородном поле при прямоугольных волнах напряжения // Журнал технической физики. – 1966. – Т.36. – Вып.12. – С. 2125-2130.
5. Wang Y., Liao D., Zhang W., Sun H. A COMSOL modeling of the pre-breakdown heating phase in the electro-thermal breakdown of conductive water // 3rd International Conference on Materials Engineering, Manufacturing Technology and Control (ICMEMTC 2016). – 2016. – pp. 704-707. doi: 10.2991/icmemtc-16.2016.141.

6. Bragg J.K., Sharbough A.H., Crowe R.W. Cathode effects in the Dielectric Breakdown of Liquids // Journal of Applied Physics. – 1954. – vol.25. – no.3. – pp. 382-391. doi: 10.1063/1.1721645.
7. Seepersad Y., Fridman A., Dobrynin D. Anode Initiated Impulse Breakdown in Water: the Dependence on Pulse Rise Time For Nanosecond and Sub-Nanosecond Pulses and Initiation Mechanism Based on Electrostriction // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2015. – vol.48. – no.42. – p. 424012. doi: 10.1088/0022-3727/48/42/424012.
8. Sun A., Zhuang J., Huo C. Formation mechanism of streamer discharges in liquids: a review // High Voltage. – 2016. – vol.1. – no.2. – pp. 74-80. doi: 10.1049/hve.2016.0016.
9. Yan D., Bian D., Zhao J., Niu S. Study of the Electrical Characteristics, Shock-Wave Pressure Characteristics, and Attenuation Law Based on Pulse Discharge in Water // Shock and Vibration. – 2016. – vol.2016. – pp. 1-11. doi: 10.1155/2016/6412309.
10. Яншин Э.В., Овчинников И.Т., Вершинин Ю.Н. Механизм импульсного электрического пробоя воды // Докл. АН СССР. – 1974. – Т.214. – №6. – С. 1303-1306.
11. Ушаков В.Я., Клишкин В.Ф., Коробейников С.М., Лопатин В.В. Пробой жидкостей при импульсном напряжении. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 488 с.
12. Clements J.S., Sato M., Davis R.N. Preliminary investigation of prebreakdown phenomena and chemical reaction using a paused high-voltage discharge in water // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1987. – vol.IA-23. – no.2. – pp. 224-235. doi: 10.1109/TIA.1987.4504897.
13. Fujita H., Kanazawa S., Ohtani K., Komiyama A., Kaneko T., Sato T. Initiation process and propagation mechanism of positive streamer discharge in water // Journal of Applied Physics. – 2014. – vol.116. – no.21. – p. 213301. doi: 10.1063/1.4902862.
14. Кускова Н.И. Искровые разряды в конденсированных средах // Журнал технической физики. – 2001. – Т.71. – Вып.2. – С. 51-54. doi: 10.1134/1.1349273.
15. Поклонов С.Г. Высоковольтные электроразрядные погружные установки со стабилизацией электрогидроимпульсного воздействия: автореф. дисс. канд. техн. наук: спец. 05.09.03. – Киев: Полигр. уч. ИЭД НАНУ, 2004. – 18 с.
16. Жекул В.Г., Раковский Г.Б. К теории формирования электрического разряда в проводящей жидкости // Журнал технической физики. – 1983. – Т.53. – Вып.1. – С. 8-14.
17. Раковский Г.Б., Хайнацкий С.А., Жекул В.Г. К расчету напряжения зажигания разряда в проводящих жидкостях // Журнал технической физики. – 1984. – Т.54. – Вып.2. – С. 368-370.
18. Раковский Г.Б. Перегревная неустойчивость в начальной стадии электрического разряда в проводящей жидкости: автореф. дисс. канд. физ.-мат. наук: спец. 01.04.13. – Л.: Изд-во НИИЭФА, 1984. – 23 с.
19. Смирнов А.П., Жекул В.Г., Мельхер Ю.И., Тафтай Э.И., Хвоцан О.В., Швец И.С. Экспериментальное исследование волн давления, генерированных электрическим взрывом в закрытом объеме жидкости // Электронная обработка материалов. – 2017. – Т.53. – №4. – С. 47-52. doi: 10.5281/zenodo.1053757.

REFERENCES

1. Gulyi G.A. *Osnovy razriadnoimpul'snykh tekhnologii* [Basics of discharge impulse technologies]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1990. 208 p. (Rus).
2. Krivitskii E.V. *Dinamika elektrovzryva v zhidkosti* [Dynamics of electric explosion in a liquid]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1986. 208 p. (Rus).
3. Ushakov V.Ia. Physics of breakdown of liquid dielectrics. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2004, vol.307, no.2, pp. 80-87. (Rus).

4. Kuzhekin I.P. Investigation of the breakdown of a liquid in an inhomogeneous field with rectangular wave stresses. *Technical Physics*, 1966, vol.36, no.12, pp. 2125-2130. (Rus).
5. Wang Y., Liao D., Zhang W., Sun H. A COMSOL modeling of the pre-breakdown heating phase in the electro-thermal breakdown of conductive water. *3rd International Conference on Materials Engineering, Manufacturing Technology and Control (ICMEMTC 2016)*, 2016, pp. 704-707. doi: **10.2991/icmemtc-16.2016.141**.
6. Bragg J.K., Sharbough A.H., Crowe R.W. Cathode effects in the Dielectric Breakdown of Liquids. *Journal of Applied Physics*, 1954, vol.25, no.3, pp. 382-391. doi: **10.1063/1.1721645**.
7. Seepersad Y., Fridman A., Dobrynin D. Anode Initiated Impulse Breakdown in Water: the Dependence on Pulse Rise Time For Nanosecond and Sub-Nanosecond Pulses and Initiation Mechanism Based on Electrostriction. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2015, vol.48, no.42, p. 424012. doi: **10.1088/0022-3727/48/42/424012**.
8. Sun A., Zhuang J., Huo C. Formation mechanism of streamer discharges in liquids: a review. *High Voltage*, 2016, vol.1, no.2, pp. 74-80. doi: **10.1049/hve.2016.0016**.
9. Yan D., Bian D., Zhao J., Niu S. Study of the Electrical Characteristics, Shock-Wave Pressure Characteristics, and Attenuation Law Based on Pulse Discharge in Water. *Shock and Vibration*, 2016, vol.2016, pp. 1-11. doi: **10.1155/2016/6412309**.
10. Ianshin E.V., Ovchinnikov I.T., Vershinin Iu.N. Mechanism of pulsed electric water breakdown. *Reports of AS of the USSR*, 1974, vol.214, no.6, pp. 1303-1306. (Rus).
11. Ushakov V.Ia., Klimkin V.F., Korobeinikov S.M., Lopatin V.V. *Proboi zhidkosti pri impul'snom napriazhenii* [Breakdown of liquids under impulse voltage]. Tomsk, NTL Publ., 2005. 488 p. (Rus).
12. Clements J.S., Sato M., Davis R.N. Preliminary investigation of prebreakdown phenomena and chemical reaction using a paused high-voltage discharge in water. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1987, vol.1A-23, no.2, pp. 224-235. doi: **10.1109/TIA.1987.4504897**.
13. Fujita H., Kanazawa S., Ohtani K., Komiya A., Kaneko T., Sato T. Initiation process and propagation mechanism of positive streamer discharge in water. *Journal of Applied Physics*, 2014, vol.116, no.21, p. 213301. doi: **10.1063/1.4902862**.
14. Kuskova N.I. Spark discharges in condensed media. *Technical Physics*, 2001, vol.46, no.2, pp. 182-185. doi: **10.1134/1.1349273**.
15. Poklonov S.G. *Vysokovol'tnye elektrorazriadnye pogruchnye ustanovki so stabilizatsiei elektrogidroimpul'snogo vozdeistviia*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [High-voltage electric discharge submersible devices with stabilization of electrohydropulse impact. Abstracts of cand. tech. sci. diss.]. Kiev, 2004. 18 p. (Rus).
16. Zhekul V.G., Rakovskii G.B. To the theory of the formation of an electrical discharge in a conducting liquid. *Technical Physics*, 1983, vol.53, no.1, pp. 8-14. (Rus).
17. Rakovskii G.B., Khainatskii S.A., Zhekul V.G. To calculation of the discharge ignition voltage in conducting liquids. *Technical Physics*, 1984, vol.54, no.2, pp. 368-370. (Rus).
18. Rakovskii G.B. *Peregrevnaia neustoichivost' v nachal'noi stadii elektricheskogo razriada v provodiashchei zhidkosti*. Avtoref. diss. kand. fiz.-mat. nauk [Overheating instability in the initial stage of an electrical discharge in a conducting fluid. Abstracts of cand. phys.-math. sci. diss.]. Leningrad, 1984. 23 p. (Rus).
19. Smirnov A.P., Zhekul V.G., Mel'kher Iu.I., Taftai E.I., Khvoshchan O.V., Shvets I.S. Experimental study of pressure waves generated by an electric explosion in a closed volume of a liquid. *Elektronnaya obrabotka materialov*, vol.53, no.4, pp. 47-52. (Rus). doi: **10.5281/zenodo.1053757**.

Поступила (received) 05.04.2018

Жекул Василий Григорьевич¹, к.т.н., ст. науч. сотр.,
Хвоцан Олег Вильямович¹, к.т.н., ст. науч. сотр.,
Смирнов Алексей Петрович¹, к.т.н., ст. науч. сотр.,
Тафтай Эдуард Иванович¹, мл. науч. сотр.,
Швец Иван Сафронович¹, к.ф.-м.н., вед. науч. сотр.

¹ Институт импульсных процессов и технологий (ИИПТ)

НАН Украины,

54018, Николаев, просп. Богоявленский, 43-А,

тел/phone +380 512 224113,

e-mail: Smirnovap1978@gmail.com, Khvoshchan@gmail.com

V.G. Zhekul¹, O.V. Khvoshchan¹, O.P. Smirnov¹, E.I. Taftai¹,
I.S. Shvets¹

¹ Institute of Pulse Processes and Technologies (IPPT) of NAS of Ukraine,

43-A, Bohoyavlensky Ave., Mykolayiv, 54018, Ukraine.

Analysis and development of the bubble model of the formation stage of high-voltage breakdown of the water gap.

Purpose. A high-voltage underwater electric explosion, realized by discharging a capacitor into a water gap, is characterized by three main stages: the stage of formation of the plasma channel, the channel stage and post-discharge one. Substantially, the channel, post-discharge stages and the efficiency of energy release in the channel and the increase in the hydrodynamic effect on the object being processed depend on the parameters of the stage of formation. The purpose of the work was to review the existing mechanisms for the formation of a high-voltage discharge channel with the analysis and development of a bubble model of the stage of formation of water gap breakdown. **Methodology.** We have applied the analysis of existing theories on the formation of a high-voltage discharge channel, the carrying out of electrophysical studies with the processing of the obtained data. **Results.** A review and analysis of modern concepts of pre-breakdown processes in a high-voltage electric discharge in a liquid showed that the «bubble» model of the ignition of a discharge is applicable at an electric field strength (36 – 180) kV/cm. We have further developed the bubble model of the stage of formation of high-voltage breakdown on the results of experimental studies of the electrical characteristics of the discharge in the aqueous electrolyte with increased hydrostatic pressure and minimum voltage providing ignition of the discharge. A qualitative description of three phases of the stage of formation of the plasma channel in the liquid electrolyte is proposed. **Originality.** We have further developed the bubble model of the stage of formation of high-voltage breakdown of the liquid electrolyte on the results of experimental studies of the electrical characteristics of the discharge in the aqueous electrolyte with increased hydrostatic pressure and minimum voltage providing ignition of the discharge. A qualitative variation of the resistance of the gap in the pre-breakdown stage of the discharge is considered. **Practical value.** Determination of the scientific basis for creating a methodology for calculating the pre-breakdown characteristics of an electric discharge to improve the efficiency of electric discharge devices. References 19, figures 4.

Key words: high-voltage electric discharge, liquid electrolyte, oscillogram, pre-breakdown processes, bubble model.