

03;04;12

О скорости и каналах ионизации водной среды сильноточным импульсным высоковольтным разрядом

© Е.И. Скибенко, В.Б. Юферов, И.В. Буравилов, А.Н. Пономарев

Национальный научный центр „Харьковский физико-технический институт“ НАН Украины,
61108 Харьков, Украина
e-mail: v.yuferov@kipt.kharkov.ua

(Поступило в Редакцию 31 июля 2006 г.)

Проведено сравнение экспериментально определенной динамики нарастания плотности плазмы в сильноточном импульсном высоковольтном разряде в жидкости с расчетом на основе эффективных сечений ионизации электронным ударом и других элементарных процессов. Установлено наличие стадии линейного роста плотности плазмы, а при плотностях больше $3 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ — экспоненциального роста за счет ускорения электронов плазмы в результате коллективных взаимодействий. Ионизация газопаровой фракции водной среды осуществляется двумя группами электронов: низкоэнергетичной с энергией порядка нескольких десятков eV и высокоэнергетичной с энергией электронов keV-диапазона. Проведена оценка энергетических затрат на ионизацию водной среды. Ионизационные потери энергии в жидкости в несколько раз выше, чем в разреженном газе.

PACS: 52.80.Wq

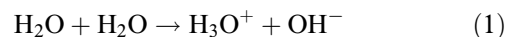
Согласно [1], существует два принципиально различных подхода к явлению электрического разряда в жидкости. По первому варианту, электрический разряд в жидкости является неким аналогом разряда в газовых полостях, которые либо присутствуют в жидкости и на электродах, либо образуются под воздействием высокого напряжения (вследствие электролиза, кипения, разложения вследствие электронной бомбардировки). По второму варианту, разряд в жидкости рассматривается как следствие лавинообразного размножения свободных носителей зарядов в самой жидкости. Согласно этой модели, в сильных полях электроны могут ускоряться в жидкости и ионизировать молекулы и атомы. Существует также гипотеза о том, что при ионизационном механизме пробоя жидкостей начальные электроны, вызывающие ударную ионизацию, появляются в жидкости вследствие эмиссии с катода, т.е. основным процессом формирования пробоя принимается автоэлектронная эмиссия с катода. При этом начальные частичные разряды малой интенсивности связываются с процессами ударной ионизации, а возникновение критических разрядов — с резким увеличением интенсивности газовой выделения и образования локальных газовых пузырьков. В то же время ударная ионизация как основа электрического механизма пробоя жидкости не была убедительно подтверждена экспериментально.

В настоящей работе предпринята попытка экспериментального определения плотности электронов образующейся плазмы сильноточного импульсного высоковольтного разряда в водной среде и сравнения полученных данных с расчетом, проведенным на основе эффективных сечений ионизации электронным ударом [2]. Рассмотрим процессы столкновения электронов с атомами, молекулами и радикалами, приводящие к ионизации. Ионизация может быть либо однократной,

как, например, $e + x \rightarrow e + x^+ + e$, либо многократной. При изучении данного процесса чаще всего измеряют число образующихся положительных ионов или электронов. Молекулярные ионы проявляются при пороговом потенциале, так называемом потенциале появления, соответствующем энергии электронов E_e , равной „вертикальной энергии ионизации“ $E_e = E_{iv}$. Согласно принципу Франка–Кондона, E_{iv} равна энергии вертикального перехода между кривыми потенциальной энергии, соответствующими молекуле и молекулярному иону.

Следует отметить, что при энергии электронов порядка 50 eV или более эффективные сечения ионизации и диссоциативной ионизации данной многоатомной молекулы мало отличаются друг от друга. Поэтому в реальных расчетах и оценках можно воспользоваться одним из этих значений при учете обоих каналов ионизации. При прецизионном анализе состава ионов, образуемых при электронной бомбардировке многоатомных (в том числе и двухатомных) молекул, необходимо учитывать следующие факторы: наличие метастабильных ионов, ионизацию свободных радикалов и процессы ионно-атомного обмена при тепловых энергиях.

Необходимо подчеркнуть, что равновесная термическая ионизация молекулярных газов, а также смеси газов в сильной степени определяется наличием экзотермических ионно-атомных процессов обмена. Например, вертикальный потенциал ионизации воды в реакции



составляет 11.7 eV, а потенциал появления ионов в результате процесса (1) составляет всего 8.5 eV (энергия сродства к электрону принята равной 1.7 eV). Номенклатура частиц, участвующих и образующихся в результате элементарных процессов на начальной стадии разряда

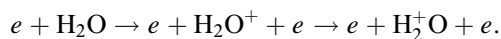
состоит из следующих молекул, атомов и ионов: H_2O , H_2 , O_2 , OH , H , O , O^+ , H^+ , H_2^+ , O_2^+ , OH^- и др.

Основными типами столкновений между упомянутыми выше различными частицами могут быть следующие:

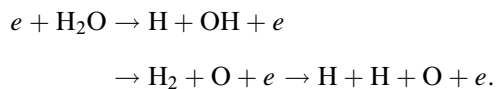
- электронов с атомами и молекулами;
- электронов с возбужденными атомами и возбужденными молекулами;
- электронов с ионизированными атомами и молекулами;
- электронов с атомными и молекулярными отрицательными ионами;
- возбужденных атомов и возбужденных молекул с атомами и молекулами;
- возбужденных атомов и возбужденных молекул с возбужденными атомами и возбужденными молекулами;
- возбужденных атомов и возбужденных молекул с ионизированными атомами и молекулами;
- возбужденных атомов и возбужденных молекул с атомными и молекулярными отрицательными ионами;
- ионизованных атомов и молекул с атомами и молекулами;
- ионизованных атомов и молекул с ионизованными атомами и молекулами;
- ионизованных атомов и молекул с атомными и молекулярными отрицательными ионами;
- атомных и молекулярных отрицательных ионов с атомами и молекулами;
- атомных и молекулярных отрицательных ионов с атомными и молекулярными отрицательными ионами;
- атомов и молекул с атомами и молекулами.

Среди всего многообразия возможных типов столкновений необходимо выделить основные элементарные процессы физики атомных и электронных столкновений — это ионизация и возбуждение электронным ударом, диссоциация и диссоциативная ионизация электронным ударом, ионно-атомный обмен. Эти процессы столкновений можно записать следующим образом.

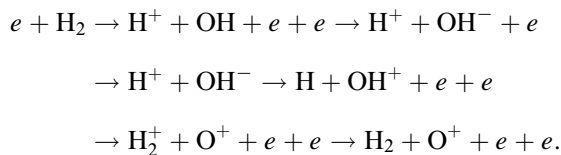
1. Ионизация электронным ударом



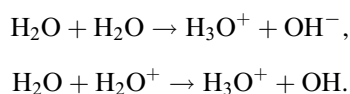
2. Диссоциация электронным ударом



3. Диссоциативная ионизация электронным ударом



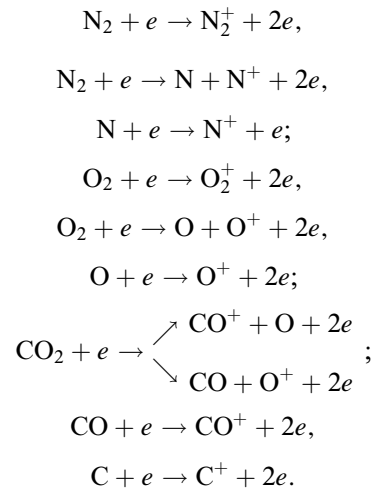
4. Ионно-атомный обмен



Значение работы выхода электронов из металла в жидкость

№	Название материала	Работа выхода W , eV
1	Фосфористая бронза	0.025
2	Хром	1.0–1.2
3	Сталь	0.52–1.25

Для полноты картины в ионизационном процессе необходимо учитывать также газы, растворенные в жидкости. К ним относятся H_2 , O_2 , CO_2 . Процессы столкновений с участием частиц N_2 , N , O_2 , O , CO_2 , CO можно записать следующим образом:



Ионизация парогазовой фракции водной среды может производиться двумя группами электронов: низкоэнергетичной с энергией порядка нескольких десятков eV и высокоэнергетичной с энергией электронов keV-диапазона. Диапазон энергий электронов в первом случае (низкие энергии) задавался с учетом того факта, что, по предположению, основным источником начальных электронов в разряде является автоэлектронная эмиссия с катода. В таблице приведены значения работы выхода электронов из металла в жидкость для некоторых катодных материалов.

Следует отметить, что возможна ситуация, когда реализуется „Малтер-эффект“ — это эффект автоэлектронной эмиссии в условиях существования окисных пленок на эмитирующей поверхности. Когда под внешним радиационным воздействием происходит разрушение (десорбции) окисных пленок, работа выхода электронов с поверхности основного материала уменьшается.

В первом случае (низкие энергии) значение эффективного сечения ионизации лежит в диапазоне 10^{-18} – 10^{-16} см² и во втором случае (высокие энергии) порядка 10^{-18} см². Возможное наличие двух групп электронов — тепловых и ускоренных, — связано, с одной стороны, с автоэлектронной эмиссией электронов с поверхности катода и, с другой — наличием в разряде напряженностей электрических полей порядка 10^5 В/см [3].

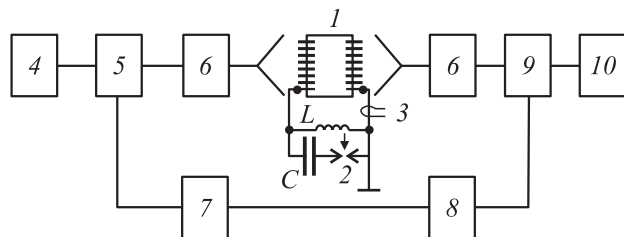


Рис. 1. Блок-схема экспериментального устройства для измерения плотности плазмы: 1 — разрядный промежуток; 2 — разрядник; 3 — пояс Роговского; 4 — генератор СВЧ-излучения; 5 — ответвитель; 6 — антенна; 7 — аттенюатор; 8 — фазовращатель; 9 — измерительный СВЧ-диод; 10 — регистрирующее устройство; C — одиночный емкостной накопитель; L — индуктивность.

Как указывалось [4], при изучении процесса ионизации нейтральных молекул и атомов электронным ударом определяется число образующихся положительных ионов или электронов. В исследуемом высоковольтном сильноточном импульсном разряде проводилось измерение плотности N_e электронной компоненты образующейся плазмы методом СВЧ-интерферометрии на длине волны $\lambda = 8 \text{ mm}$, что в принципе позволяет определить N_e в диапазоне значений $1.8 \cdot 10^{13} - 1.8 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. На рис. 1 представлена схема экспериментального устройства совместно с системой импульсного электропитания и диагностики плазмы. Восьмиэлектродный разрядный промежуток имел следующие размеры: ширина 2,3, длина 16 см, объем около 600 cm^3 . Система электропитания обеспечивала следующие параметры разряда: напряжение 20–25 кВ, общий ток до 25 кА, длительность $\sim 100 \mu\text{s}$, запасенная энергия до 100 Дж.

В данном случае в отличие от классического разряда в жидкости [5] или электрогидравлического эффекта (ЭГЭ) рассматривается так называемый тихий режим разряда, когда нет стягивания, а пробой равномерен по всему объему.

Для выяснения сущности процессов, происходящих при ионизации водной среды электрическим высоковольтным разрядом, сравним экспериментальные результаты с расчетными (рис. 2).

При прохождении электронного потока с плотностью n_e и скоростью v_e через нейтральную среду (например, пары воды и растворенные в ней газы) плотностью n_0 образуется плазма с плотностью N_p , определяемая выражением [2]:

$$N_p = n_e v_e \sigma_e n_0 \tau, \quad (2)$$

где σ_e — сечение ионизации нейтрального газа электронами [6]; τ — время жизни плазмы.

Если сюда подставить значение τ , равное экспериментально определенному времени жизни плазмы (пролетное время), то получим значение равновесной плотности плазмы, создаваемой электронным потоком. На рис. 2 кривыми 2–4 представлены зависимости

изменения плотности плазмы во времени, образующейся за счет столкновительной (ударной) ионизации, рассчитанные по формуле (2), для различных энергий электронного потока. Видно, что через несколько μs после начала разряда плотность плазмы при $E_e = 30 \text{ keV}$ не превышает $1 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, т.е. плотность образовавшейся плазмы превосходит более чем на порядок величину плотности первичного электронного пучка. Таким образом, в дальнейшем ионизация нейтральной газопаровой среды может осуществляться в основном не электронами первичного пучка, а ускоренными за счет коллективных взаимодействий [7,8] электронами плазмы. В этом случае изменение плотности будет уже определяться уравнением

$$dN = \langle \sigma_e v_e \rangle n_0 N_p dt,$$

где N_p — текущая плотность плазмы.

Экстраполяция экспериментальной кривой $N_p = f(t)$ в область низких значений плотности плазмы до пересечения с аналогичной расчетной кривой дает значение стартовой плотности плазмы, после чего начинается экспоненциальный рост плотности плазмы, примерно до $3 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. Исходя из этого попытаемся оценить значение произведения $\langle \sigma_e v_e \rangle$, соответствующее экспериментальной кривой ионизации и соответственно энергию электронов, участвующих в ионизации водной среды. Из наклона экспериментальной кривой (1) рис. 2 и ей подобных можно определить величину произведения $\langle \sigma_e v_e \rangle$. Используя зависимость $\langle \sigma_e v_e \rangle = f(T_e)$ [4] и сравнив литературные данные (кривая 1 на рис. 3) с

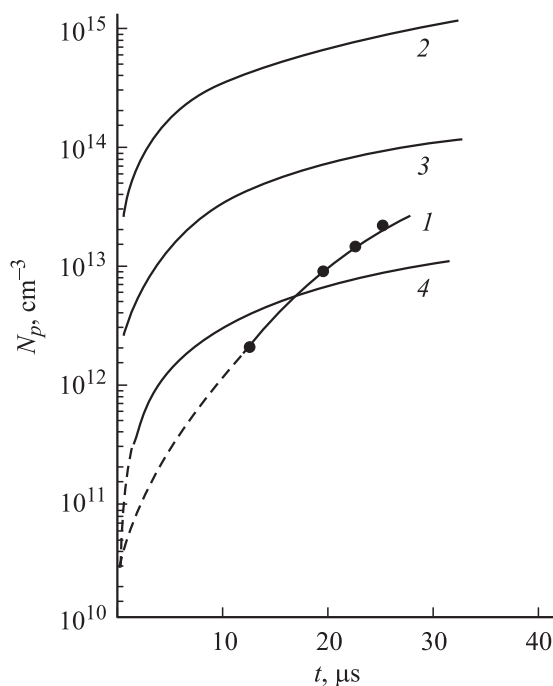


Рис. 2. Сравнение экспериментальных результатов с расчетными. Кривая 1 — эксперимент; кривые 2, 3, 4 — расчет при энергии электронов, производящих ионизацию, соответственно 80 eV, 5, 30 keV.

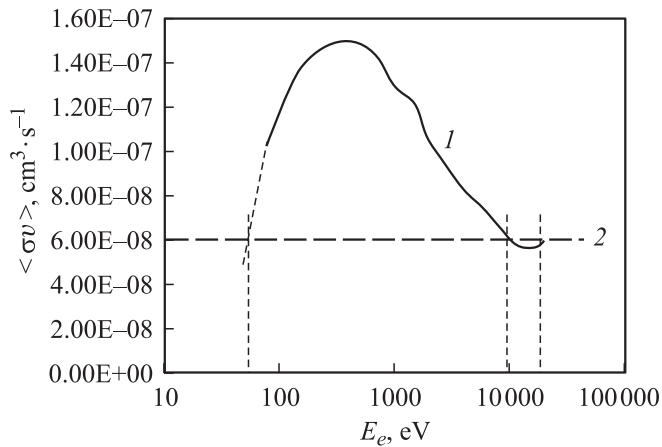


Рис. 3. Зависимость усредненного произведения $\langle \sigma v \rangle$ от энергии электронов, производящих ионизацию: 1 — литературные данные [6], 2 — эксперимент.

экспериментальной (рис. 3, кривая 2), можно оценить скорость (энергию) плазменных электронов, производящих ионизацию среды в начальный период разряда.

Такая оценка дает следующие величины E_e : в низкоэнергетической части спектра ~ 60 eV и в высокоэнергетической области спектра ~ 10 – 20 keV. Проведенная оценка энергетических затрат на ионизацию среды аналогично [9] дает значение удельных энергозатрат на создание плазмы ~ 2 – $4 \cdot 10^{-2}$ J/cm³. Полные энергозатраты по объему 600 cm³ могут достигать 25 J.

Итак, проведенные измерения и оценки позволяют сделать следующие выводы.

1. На основе проведенного анализа определен состав частиц, участвующих и образующихся в результате элементарных процессов на начальной — ионизационной — стадии разряда. Среди многообразия возможных типов столкновений можно выделить следующие основные элементарные процессы физики атомных и электронных столкновений, протекающие в электрическом разряде в жидкой среде: ионизация и возбуждение электронным ударом, диссоциация и диссоциативная ионизация электронным ударом, ионно-атомный обмен.

2. Впервые при исследовании электрического разряда в жидкости для определения плотности плазмы использован СВЧ интерферометрический метод на длине волны $\lambda = 8$ mm. Измеренная величина плотности плазмы составляет $1.8 \cdot 10^{13}$ cm⁻³ и более. Этим же методом определена динамика роста и спада плотности плазмы в разряде.

3. Проведенный анализ прозволлил определить наличие стадии линейного роста плотности плазмы, образующейся за счет ударной ионизации первичными электронами, а также стадии экспоненциального роста плотности плазмы, когда ионизация нейтральной газопаровой среды осуществляется в основном не электронами первичного пучка, а ускоренными за счет коллективных взаимодействий электронами плазмы. Стартовое

значение плотности плазмы, по достижении которого начинается экспоненциальный рост плотности плазмы, равно примерно $3 \cdot 10^{10}$ cm⁻³.

4. Высказано предположение об ионизации газопаровой фракции водной среды двумя группами электронов: низко- и высокоэнергетичной. Сравнение литературной зависимости $\langle \sigma_e v_e \rangle = f(T_e)$ с экспериментально определенной позволило оценить энергию электронов низкоэнергетичной части спектра порядка 60 eV и высокоэнергетичной — ~ 10 – 20 keV.

5. Проведенная оценка энергетических затрат на ионизацию водной среды дает величину удельных энергозатрат на создание плазмы $\sim (2$ – $4) \cdot 10^{-2}$ J/cm³. Полные энергозатраты на объем 600 cm³ могут достигать ~ 25 J при полном энергокладе 100 J. Ионизационные затраты в жидкости в несколько раз больше, чем в разряженном газе. Этапы развития электрического разряда в жидкости можно представить следующим образом: образование газопаровой фазы — пробой — растворение газопаровой фазы в жидкости.

Список литературы

- [1] Ушаков В.Я. Импульсный электрический пробой жидкостей. Томск: Изд-во ТГУ, 1975. 256 с.
- [2] Хастед Дж. Физика атомных столкновений. М.: Мир, 1965. 710 с.
- [3] Энциклопедия низкотемпературной плазмы / Под ред. В.Е. Фортова. М.: Наука, 2000. Т. 1. 586 с.
- [4] Скибенко Е.И., Юферов В.Б., Буравиллов И.В., Пономарев А.Н. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 9. С. 133.
- [5] Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Л.: Машиностроение, 1986. 253 с.
- [6] Barnett C.F., Ray J.A., Ricci E., Wilker M.I., McDaniel, Thomas E.W., Gilbody H.V. Atomic Data for Controlled Fusion Research. Oak Ridge National Laboratory, USA. 1977.
- [7] Файнберг Я.Б. // Атомная энергия. 1961. Т. 11. С. 313.
- [8] Харченко И.Ф., Файнберг Я.Б., Николаев Р.М., Корнилов Е.А., Луценко Е.И., Педенко Н.С. // Ядерный синтез. Доп. 1962. Т. 3. С. 1101.
- [9] Лысенко Э.А., Скибенко Е.И., Юферов В.Б. Влияние вакуумных условий на поступление легких примесей в плазму на начальной стадии разряда. ЦНИИ Атоминформ, 1987. 18 с.