

01.1;04.1

## Динамическая модель подводного разряда

© А.В. Хлюстова

Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, Иваново, Россия

E-mail: kav@isc-ras.ru

Поступило в Редакцию 25 мая 2021 г.

В окончательной редакции 21 июня 2021 г.

Принято к публикации 28 июня 2021 г.

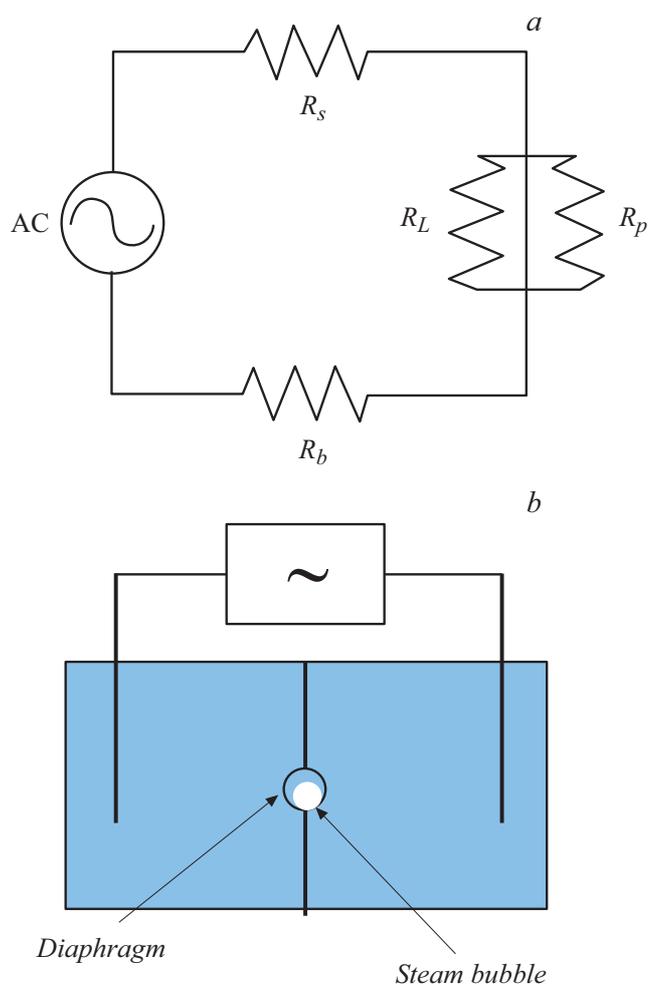
Представлена динамическая модель подводного электрического разряда. В основе метода лежит математическое описание зависимости проводимости слоя раствора от его толщины в процессе формирования паргазового пузыря, в котором возникает разряд. С помощью выражений, связывающих ток и напряжение с сопротивлением (проводимостью) раствора, и с учетом периодичности процессов рассчитаны временные зависимости тока в цепи и падения напряжения на ячейке. Представленная модель позволяет точно описывать динамические характеристики подводных разрядов на основе физико-химических свойств раствора, что позволяет предсказывать поведение разряда при использовании растворов с заданными свойствами.

**Ключевые слова:** подводный электрический разряд, динамическая модель, электропроводность.

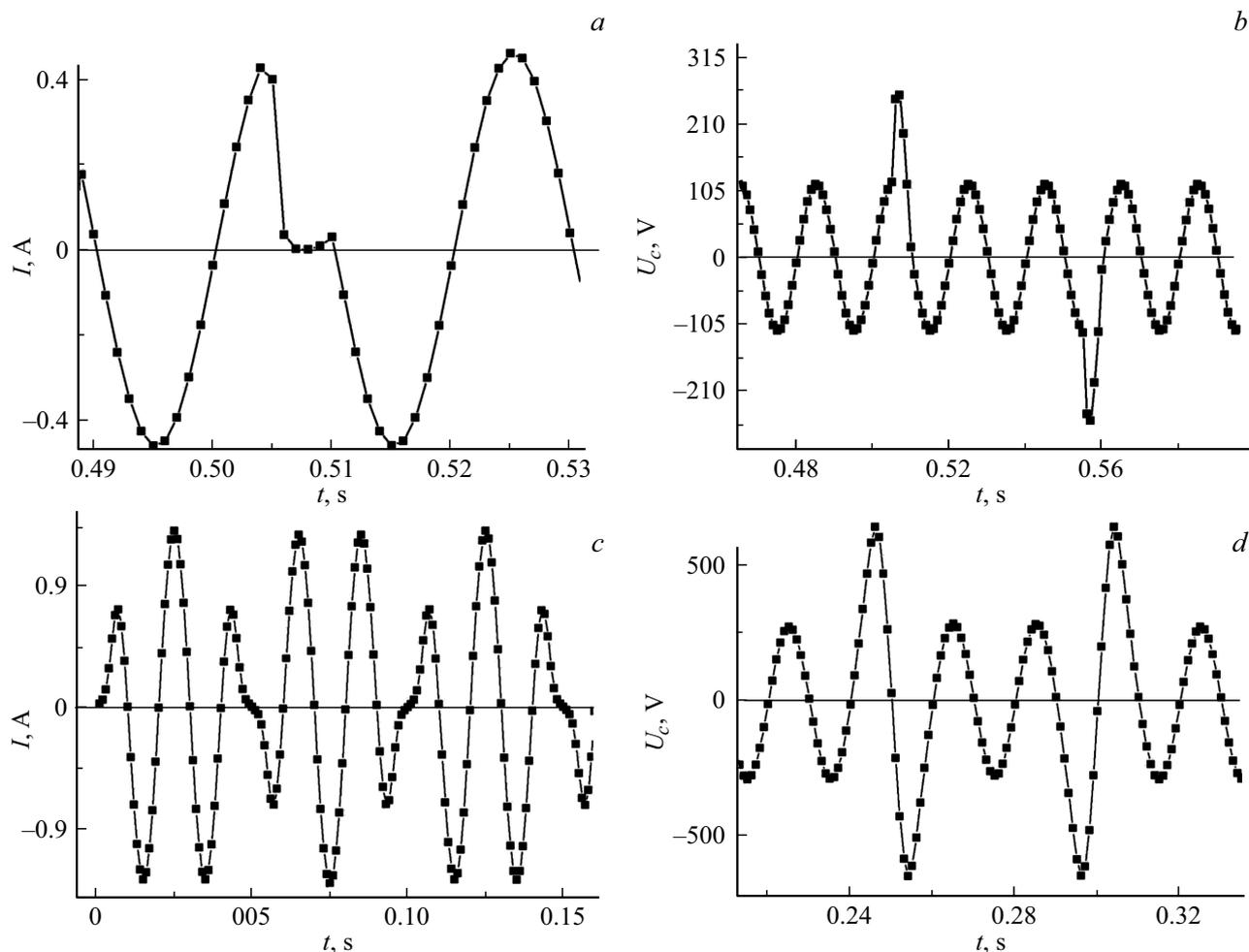
DOI: 10.21883/PJTF.2021.19.51512.18882

Различные комбинации электрического разряда и жидкости представляют интерес в сфере очистки и стерилизации водных сред, при модифицировании полимеров, синтезе наноструктур, что отражено в обзорах последних лет [1–3]. Помещение зоны плазмы в объем жидкости приводит к ускорению протекания процессов в растворе. Это представляется благоприятным для прикладных исследований данного типа плазмы. Теоретические исследования электрофизических характеристик подводной плазмы позволили представить механизм формирования/развития подводных разрядов [4–6]. В ряде работ представлены модели подводной плазмы, основанные на электрических характеристиках разряда, которые дают подробную информацию об образовании паргазового пузыря, в котором возникает плазма [7,8]. Свойства жидкости при этом не учитываются. В настоящей работе рассматривается модель подводного разряда с учетом физико-химических свойств раствора/жидкости.

Предполагается, что за время формирования газового пузыря, которое определяется химическим составом, концентрацией растворенного вещества, электропроводностью и действительным значением прикладываемого напряжения, процессы протекают не в плазме, а в объеме раствора. При схлопывании плазменного пузыря в растворе возникают конвективные потоки, вызванные акустической и ударной волнами и градиентом температуры, которые переносят продукты плазмолиза (атомы, радикалы и ионы) в основной объем раствора. Это оказывает влияние на физико-химические свойства раствора и свойства всей системы. Электрическая схема предлагаемой модели представлена на рис. 1, а. В электрическую цепь, питаемую источником переменного тока, последовательно включены балластное сопротивление и сопротивление разрядной системы, которое включает в себя сопротивление объема раствора, и параллельно соединенные сопротивления плазмы и пленки раствора.



**Рис. 1.** Электрическая схема модели (а) и схема устройства подводного разряда (б).  $R_b$  — балластное сопротивление,  $R_s$  — сопротивление раствора,  $R_L$  — сопротивление слоя,  $R_p$  — сопротивление плазмы.



**Рис. 2.** Временные изменения тока разряда (*a, c*) и падения напряжения на ячейке (*b, d*), полученные при использовании сигмоидальной (*a, b*) и гиперболической (*c, d*) функций.

Разрядная система, включенная в электрическую цепь, содержит ячейку с раствором, разделенную на две части перегородкой/мембраной с отверстием (диафрагмой). Через диафрагму течет ток электролиза и в ней же формируется газовый пузырь (рис. 1, *b*).

Напряжение прикладывается к нагрузке, которая состоит из балластного сопротивления и комплексного сопротивления ячейки (последовательное соединение сопротивления раствора и разрядного промежутка). Балластное сопротивление является величиной постоянной, так же как и действительное значение прикладываемого напряжения. Однако величина комплексного сопротивления ячейки будет меняться. Об этом свидетельствуют экспериментальные данные для отношения  $I/U$  [5]. Ток в данной цепи будет определяться соотношением

$$I = \frac{\epsilon_{total}}{R_b + R_c}. \quad (1)$$

Здесь  $\epsilon_{total}$  — прикладываемое напряжение,  $R_b$  — балластное сопротивление,  $R_c$  — сопротивление ячейки.

Напряжение, прикладываемое к разрядному промежутку, будет определяться разницей между приклады-

ваемым напряжением и падением напряжения на балластном сопротивлении

$$U_c = \epsilon_{total} - IR_b. \quad (2)$$

Предположим, что толщина проводящего слоя  $\delta$  в диафрагме может меняться в определенных пределах  $0 < \delta < d$ , где  $d$  — диаметр диафрагмы. Таким образом, в момент отсутствия пузырька отверстие (диафрагма) заполнено раствором электролита, проводимость максимальна и определяется электропроводностью раствора. В том случае, когда размер пузырька достигает максимума, толщина проводящего слоя в пределе будет нулевой. На основании этого можно задать зависимость проводимости от толщины проводящего слоя  $\lambda = f(\delta)$ . Для математического описания модели были выбраны нелинейные аппроксимации пакета Origin. Методом итераций были отобраны функции, дающие кривую с насыщением для зависимости  $\lambda(\delta)$  и зависимости  $I(t)$  и  $U(t)$ , согласующиеся с экспериментальными осциллограммами. Таким условиям отвечают только две функ-

ции: сигмоидальная

$$\lambda = \frac{1}{1 + e^{-\delta}} \quad (3)$$

и гиперболическая

$$\lambda = \frac{e^{\delta} - e^{-\delta}}{e^{\delta} + e^{-\delta}}. \quad (4)$$

На основе данных видеонаблюдений были получены времена образования и гибели газового пузыря порядка 0.1–0.2 s. Если предположить, что процессы будут протекать непрерывно, то их можно описать периодической зависимостью с характерной частотой 5–10 Hz и вывести временные зависимости.

Выражая  $R$  через  $\lambda = f(\delta)$  и подставляя в уравнения для тока и напряжения, мы рассчитали функции  $I = f(t)$  и  $U = f(t)$  с использованием пакета Origin. Результаты моделирования представлены графически (рис. 2).

Анализ полученных результатов показывает, что сигмоидальная зависимость  $\lambda = f(\delta)$  позволяет получить динамические характеристики тока и напряжения во времени, полностью согласующиеся с экспериментом [9]. Гиперболическая функция более „плавно“ следит за изменениями толщины проводящего слоя. В связи с этим переходы между состояниями системы (режимы горения разряда) происходят более „гладко“ и длительно.

Таким образом, модель позволяет четко описывать динамические свойства подводного разряда. Исходные положения данной модели не используют эмпирические данные для  $I = f(t)$  и  $U = f(t)$ , но базируются на экспериментальных оценках времен образования и гибели газового пузырька. Следовательно, полученная модель полумпирическая и подтверждает гипотезу о том, что динамические особенности подводных разрядов определяются физико-химическими свойствами раствора.

## Конфликт интересов

Автор заявляет, что у нее нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] S. Horikoshi, N. Serpone, RSC Adv., **7** (75), 47196 (2017). DOI: 10.1039/C7RA09600C
- [2] F. Rezaei, P. Vanraes, A. Nikiforov, R. Morent, N. De Geyter, Materials, **12** (17), 2751 (2019). DOI: 10.3390/ma12172751
- [3] S. Perinban, V. Orsat, V. Raghavan, Compr. Rev. Food Sci. Food Saf., **18** (6), 1985 (2019). DOI: 10.1111/1541-4337.12503
- [4] M. Monte, F. de Baerdemaeker, C. Leys, A.I. Maximov, Czech. J. Phys., **52** (Suppl. D), 724 (2002).
- [5] A.I. Maximov, Contrib. Plasma Phys., **47** (1-2), 111 (2007). DOI: 10.1002/ctpp.200710016
- [6] A.V. Khlyustova, A.M. Manakhov, A.I. Maksimov, Surf. Eng. Appl. Electrochem., **45** (6), 485 (2009). DOI: 10.3103/S1068375509060088
- [7] V.T. Gurovich, A. Grinenko, Y.E. Krasik, J. Felsteiner, Phys. Rev. E, **69** (3), 036402 (2004). DOI: 10.1103/PhysRevE.69.036402
- [8] X. Lu, J. Appl. Phys., **102** (6), 063302 (2007). DOI: 10.1063/1.2783848
- [9] A. Khlyustova, N. Sirotkin, O. Evdokimova, V. Prisiazhnyi, V. Titov, J. Electrostat., **96**, 76 (2018). DOI: 10.1016/j.elstat.2018.10.002