

03.1;03.5

Динамика массопереноса жидкости в водном мостике

© Р.З. Шайхитдинов, Т.И. Шарипов

Башкирский государственный университет, Уфа, Россия
E-mail: plasma@bsunet.ru

Поступило в Редакцию 11 февраля 2022 г.

В окончательной редакции 15 апреля 2022 г.

Принято к публикации 19 апреля 2022 г.

Приводятся экспериментальные результаты исследования динамики массопереноса через водный мостик, возникающий между двумя диэлектрическими емкостями с дистиллированной водой под действием постоянного высоковольтного напряжения между цилиндрическими электродами. Установлено, что в зависимости от соотношения диаметров электродов общий поток жидкости в водном мостике может быть направлен как к катоду, так и к аноду. Показано, что инверсия направления массопереноса жидкости через мостик обусловлена перераспределением объемных зарядов.

Ключевые слова: водный мостик, электрогидродинамическое течение, анод, катод.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.11.52612.19161

Водный мостик (ВМ) возникает между двумя диэлектрическими сосудами с дистиллированной водой под действием приложенного постоянного высоковольтного напряжения между электродами, погруженными в жидкость [1–7]. В результате проведенных исследований выявлен ряд особенностей ВМ [1–3], одной из основных среди которых является транспортировка жидкости через мостик. Установлено, что после формирования ВМ первоначально общий поток жидкости через мостик направлен преимущественно от анода к катоду. По истечении времени от нескольких минут до десятков минут направление потока меняется на противоположное, и далее наблюдается систематический повтор инверсии за все время существования ВМ. Такое повторяющееся реверсирование потока является установившейся чертой мостика и, как полагают [3,4], обусловлено гидростатическим давлением, возникающим из-за разных уровней воды в стаканчиках. Если для объяснения механизма формирования и устойчивого существования ВМ предложено несколько моделей, приведенных в [5], то относительно механизма инверсии потока из литературы нам, кроме [3,4], известна лишь одна работа теоретического характера [6].

В настоящей работе приводятся результаты экспериментов по исследованию направления потока жидкости, которые показывают, что с момента формирования ВМ в зависимости от соотношения диаметров электродов массоперенос воды через мостик может осуществляться как от анода к катоду, так и в противоположном направлении. Также показано, что инверсия ее потока может быть обусловлена перераспределением объемных зарядов в чашках с дистиллированной водой.

Эксперименты проводились на установке, схема которой представлена на рис. 1, а. Дистиллированная вода массой по 60 г наливалась в чашки Петри, одна из которых была установлена на электронные весы с точностью измерений 0.01 г, а другая — на подставку из

оргстекла с регулируемой высотой подъема. Особое внимание обращалось на чистоту и состояние поверхности электродов, в качестве которых использовались медные провода различных диаметров (0.1–6.0 мм) с изолированными концами (рис. 1, б). После соприкосновения наполненных водой чашек и подачи на электроды напряжения 15 кВ чашки через 5 с раздвигались на расстояние 10 ± 0.5 мм, что обеспечивало одинаковые начальные условия образовавшегося ВМ диаметром около 2 мм. Сила тока поддерживалась постоянной и равной 0.2 мА.

На рис. 2 приводятся временные зависимости изменения массы воды в чашке с катодом при различных диаметрах анода (d_a) и катода (d_c). Значения $\Delta m > 0$ соответствуют направлению течения от анода к катоду (прямое направление), а $\Delta m < 0$ — от катода к аноду (обратное направление). Как видно, с момента формирования ВМ в начальные моменты времени (примерно до 6 мин) поток жидкости через мостик направлен от электрода с меньшим диаметром к электроду с большим диаметром независимо от их полярности; при одинаковых диаметрах (симметричная система) массоперенос осуществляется в прямом направлении (кривая 1). Следует подчеркнуть, что во всех известных нам работах по исследованию динамики течения жидкости через ВМ, включая [1–5], с момента формирования мостика отмечается преимущественный массоперенос от анода к катоду. Это, по нашему мнению, обусловлено применением в соответствующих экспериментах в основном пластинчатых электродов, размеры которых сравнимы с межэлектродным расстоянием. Поэтому, несмотря на наличие углов, а также образование различных дефектов на поверхностях электродов в процессе длительной эксплуатации с приложением прямого и обратного напряжений, их можно рассматривать как симметричную систему электродов. По этой причине в указанных работах поток жидкости через ВМ имеет прямое направление, соответствующее кривой 1 на рис. 2. В условиях

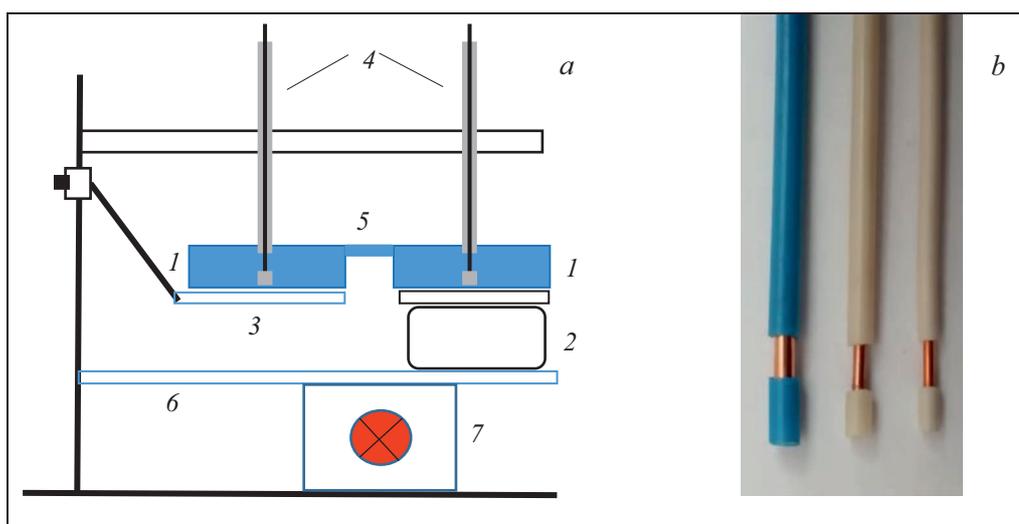


Рис. 1. *a* — схема экспериментальной установки: 1 — чашки Петри, 2 — электронные весы, 3 — подставка из оргстекла с регулируемой высотой подъема, 4 — электроды, 5 — ВМ, 6 — подставка из стекла, 7 — подсветка. *b* — образцы электродов.

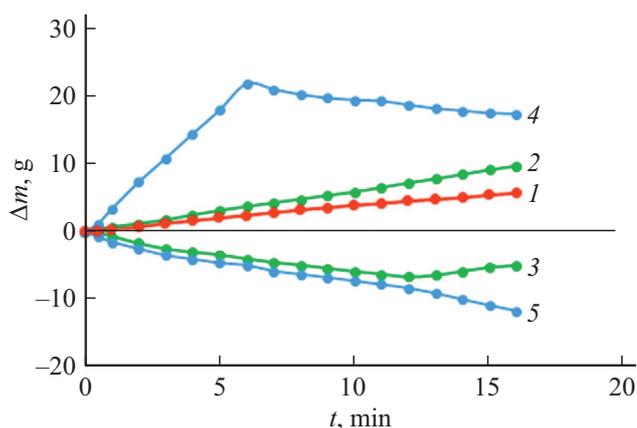


Рис. 2. Зависимость от времени изменения массы воды в чашке с катодом при различных диаметрах электродов (в мм): 1 — $d_a = d_c = 1.8$; 2 — $d_a = 1.4$ и $d_c = 1.8$; 3 — $d_a = 1.8$ и $d_c = 1.4$; 4 — $d_a = 1.8$ и $d_c = 6$; 5 — $d_a = 6$ и $d_c = 1.8$.

наших экспериментов за счет подбора цилиндрических электродов различного диаметра с изолированными концами стало возможным получение регулируемого по направлению потока жидкости через мостик с момента его формирования.

ВМ является частным случаем электрогидродинамической (ЭГД) системы, в которой массоперенос диэлектрической жидкости обусловлен действием кулоновских сил на объемные заряды [3], возникающие вследствие пространственного перераспределения зарядов при протекании электрического тока [8–11]. В жидких диэлектриках, как известно [8–10], при наложении электрического поля высокой напряженности (порядка 10^6 V/m) основными механизмами зарядообразования являются инжекция ионов как с катода, так и с анода,

а также формирование неравновесных диссоциационно-рекомбинационных слоев заряда. Отметим, что на основе использования этих двух эффектов реализованы соответственно инжекционный и диссоциационный варианты ЭГД-насосов [8].

С целью определения основного механизма образования объемных зарядов в условиях устойчивого существования ВМ нами были проведены следующие эксперименты. Чашки с водой устанавливались на пластины из алюминиевой фольги размером 2×2 см, на которые подавалось напряжение. Так что электроды непосредственно не контактировали с жидкостью. Образовавшийся мостик даже при напряжениях 25–30 kV удалось „растянуть“ только до 5 мм при диаметре не более 1 мм, а массовый расход жидкости через мостик был более чем на порядок ниже, чем в экспериментах, в которых применялись цилиндрические электроды. Это подтверждает, что в случае ВМ с погруженными в жидкость электродами преобладающую роль играет инжекционный механизм образования зарядов. Эти ионы одноименной с электродами полярности „вморожены“ в жидкость [10] и под действием кулоновских сил создают встречные потоки жидкости в направлении от соответствующих электродов [9–11]. Таким образом возникает ЭГД-течение через ВМ, наружный слой которого вращается с тангенциальной скоростью примерно 0.3 м/с, а скорости приосевых областей меняются в пределах ± 0.2 м/с в зависимости от направления общего массопереноса (рис. 3). Этот процесс можно рассматривать как усложненный наличием водного мостика, представляющего „узкий участок“ классического варианта ЭГД-течения, в котором даже при одинаковых размерах электродов возникают встречные течения [9,10].

В общем случае причиной нарушения средней электронейтральности, обусловленной появлением избытка

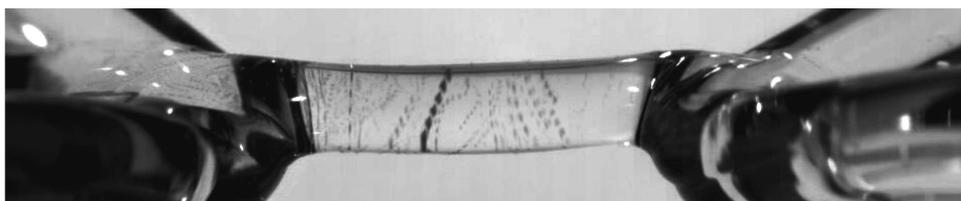


Рис. 3. Визуализация течения жидкости через ВМ методом трассирующих частиц при частоте кадров 1 kHz [3].

зарядов одного типа по сравнению с другими, является асимметрия в распределении электрического поля между электродами, в подвижностях носителей зарядов и скоростях электрохимических реакций [9,10]. Поэтому с момента формирования ВМ при симметричной системе электродов из-за большей подвижности положительных ионов по сравнению с подвижностью отрицательных общий поток жидкости через мостик имеет прямое направление, что соответствует экспериментальным результатам. В случае несимметричной системы электродов преобладает униполярная инжекция с электрода меньшего диаметра, поскольку у его поверхности напряженность электрического поля больше. По этой причине сразу после формирования ВМ поток жидкости направлен к электроду большего диаметра независимо от полярности межэлектродного напряжения.

Необходимо отметить непосредственное влияние состояния рассматриваемой электрохимической системы, степень неравновесности которой при прохождении электрического тока меняется, на динамику ЭГД-течения. Так, в первоначально электронейтральном анодном объеме ($\text{pH} \approx 7$) в результате окислительного процесса на аноде $4\text{OH}^- - 4e = 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$ жидкость постепенно обедняется ионами OH^- . С течением времени вследствие убыли этих ионов активизируется другой процесс окисления ($2\text{H}_2\text{O} + 4e = 4\text{H}^+ + \text{O}_2$), приводящий к обогащению анолита ионами H^+ . В результате этих двух реакций в анодном объеме устанавливается новое ионное равновесие с $\text{pH} < 7$. В катодном объеме жидкости с исходным показателем в результате восстановления сначала ионов водорода ($2\text{H}^+ + 2e = \text{H}_2$), а затем активизации другой восстановительной реакции ($2\text{H}_2\text{O} + 2e = 2\text{OH}^- + \text{H}_2$), вызванной уменьшением концентрации протонов, преобладают отрицательные ионы ($\text{pH} > 7$). Однако из-за различия скоростей электрохимических реакций в анодном и катодном направлениях процесс перераспределения зарядов в ЭГД-системе несколько усложняется, что обусловлено следующим фактором.

Носителями тока в водной среде являются ионы гидроксония H_3O^+ , протоны H^+ и ионы гидроксила OH^- , образованные диссоциацией воды по схеме $\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^-$ с переходом протона от одной молекулы к другой [12]. Так, в работе [13] при исследовании проводимости ВМ методом квазиупругого рассеяния нейтронов обнаружено две группы протонов,

одна из которых представляет собой сильно связанную с атомами кислорода составляющую (H_3O^+), а вторая — подвижную (H^+). Поэтому в водной среде транспорт положительного заряда осуществляется в основном протонами из-за их аномально большой подвижности [12], а ионы гидроксония отвечают за массоперенос жидкости. В случае прямого направления потока уход протонов из анодной емкости в определенной степени компенсируется их образованием в результате окислительного процесса молекул воды у анода. В катодите быстрый дрейф протонов к катоду с последующим их восстановлением на его поверхности создает отрицательный заряд дополнительно к инжектированным. Поэтому при прохождении тока по достижении определенной величины отрицательного объемного заряда в катодной части системы обратный поток воды начинает преобладать над прямым: происходит инверсия течения жидкости через ВМ (кривая 4 на рис. 2). Аналогичным образом путем анализа указанных выше окислительно-восстановительных реакций с учетом аномально большой подвижности протонов можно объяснить наступление инверсии при обратном направлении потока, обусловленного с начала формирования мостика преобладающей униполярной инжекцией гидроксид-ионов с катода (кривая 3 на рис. 2).

Отметим, что наблюдаемые гистерезис и отрицательное дифференциальное сопротивление в вольт-амперной характеристике ВМ авторы [7] также объясняют перераспределением объемных зарядов. В этой работе при уменьшении напряжения поток сохранял свое преимущественное направление от анода к катоду, но в момент выхода вольт-амперной характеристики на участок отрицательного дифференциального сопротивления направление течения скачком изменялось на противоположное, что равносильно включению дополнительного источника ЭДС при снижении внешнего напряжения. Эффект возникновения „зарядовой пробки“ в классическом ЭГД-устройстве, в некоторой степени аналогичный наблюдаемой в ВМ инверсии направления потока, также вызван объемными зарядами [10].

Таким образом, экспериментальным путем показано, что с момента формирования ВМ общий поток жидкости через мостик направлен от электрода с меньшим диаметром к электроду с большим диаметром независимо от их полярности, а при симметричной системе электродов массоперенос осуществляется в прямом направлении. Наблюдаемое реверсирование потока жидкости через

ВМ обусловлено периодическим образованием избытка объемного гомозаряда у одного из электродов в зависимости от первоначального направления потока с последующим его переносом через ВМ в направлении к противозлектроду.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] E.C. Fuchs, J. Woisetschläger, K. Gatterer, E. Maier, R. Pecnik, G. Holler, H. Eisenkölbl, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **40** (19), 6112 (2007). DOI: 10.1088/0022-3727/40/19/052
- [2] E.C. Fuchs, K. Gatterer, G. Holler, J. Woisetschläger, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **41** (18), 185502 (2008). DOI: 10.1088/0022-3727/41/18/185502
- [3] J. Woisetschläger, K. Gatterer, E.C. Fuchs, *Exp. Fluids*, **48** (1), 121 (2010). DOI: 10.1007/s00348-009-0718-2
- [4] A.D. Wexler, S. Drusova, E.C. Fuchs, J. Woisetschläger, G. Reiter, M. Fuchsjaeger, U. Reiter, *J. Visual.*, **20** (1), 97 (2017). DOI: 10.1007/s12650-016-0379-1
- [5] E.C. Fuchs, J. Woisetschläger, A.D. Wexler, R. Pecnik, G. Vitiello, *Water*, **13** (5), 602 (2021). DOI: 10.3390/w13050602
- [6] K. Morawetz, *Water*, **9** (5), 353 (2017). DOI: 10.3390/w9050353
- [7] В.Б. Ошурко, А.Н. Федоров, А.А. Ропяной, М.В. Федосов, *ЖТФ*, **84** (6), 151 (2014). <https://journals.ioffe.ru/articles/27270> [V.B. Oshurko, A.N. Fedorov, A.A. Ropyanoi, M.V. Fedosov, *Tech. Phys.*, **59** (6), 936 (2014). DOI: 10.1134/S1063784214060176].
- [8] Ю.К. Стишков, В.А. Чирков, *ЖТФ*, **83** (12), 119 (2013). <https://journals.ioffe.ru/articles/11091> [Yu.K. Stishkov, V.A. Chirkov, *Tech. Phys.*, **58** (12), 1822 (2013). DOI: 10.1134/S1063784213120232].
- [9] А.И. Жакин, *УФН*, **182** (5), 495 (2012). DOI: 10.3367/UFNr.0182.201205b.0495 [A.I. Zhakin, *Phys. Usp.*, **55** (5), 465 (2012). DOI: 10.3367/UFNe.0182.201205b.0495].
- [10] Ю.К. Стишков, *Электрофизические процессы в жидкостях при воздействии сильных электрических полей* (Юстицинформ, М., 2019), с. 66–69.
- [11] Ф.П. Гросу, М.К. Болога, В.И. Леу, Ал.М. Болога, *Электронная обработка материалов*, **48** (1), 50 (2012). <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20192916> [F.P. Grosu, M.K. Bologa, V.I. Leu, Al.M. Bologa, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, **48** (1), 42 (2012). DOI: 10.3103/S1068375512010085].
- [12] Б.Б. Дамаскин, О.А. Петрий, Г.А. Цирлина, *Электрохимия* (Химия, КолосС, М., 2006), с. 147, 598.
- [13] E.C. Fuchs, B. Bitschnau, A.D. Wexler, J. Woisetschläger, F.T. Freund, *J. Phys. Chem. B*, **119** (52), 15892 (2015). DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b10751