

раздел **ФИЗИКА**

УДК 532.51

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2025.4.4

МЕХАНИЗМ УСТОЙЧИВОСТИ ВОДНОГО МОСТИКА

© Р. З. Шайхитдинов*, И. П. Юминов

Уфимский университет науки и технологий
Россия, Республика Башкортостан, 450076 г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.

*Email: plasma@bsunet.ru

В работе предлагается новый механизм динамической устойчивости водного мостика, возникающего между двумя диэлектрическими емкостями с дистиллированной водой под действием постоянного высоковольтного напряжения между цилиндрическими электродами. На основании экспериментальных результатов и проведенных расчетов установлено, что причиной динамического равновесия мостика служит электрический ветер.

Ключевые слова: водный мостик, электрический ветер, анод, катод.

Введение

Водный мостик (ВМ) возникает между двумя диэлектрическими сосудами, наполненными полярным жидким диэлектриком, при подаче постоянного высоковольтного напряжения между электродами, погруженными в жидкость [1–5]. Наблюдаемый мостик, имеющий форму, близкую к цилиндрической, длиной до 25 мм и диаметром 1–3 мм, может существовать десятки минут.

Первые проведенные эксперименты показывают [1], что после формирования ВМ первоначально общий поток жидкости через мостик направлен преимущественно от анода к катоду. По истечению от нескольких до десятков минут направление потока меняется на противоположное и далее наблюдается систематический повтор инверсии за все время существования ВМ. Такое повторяющееся реверсирование потока является уставновившейся чертой мостика и, как полагают [2], обусловлено гидростатическим давлением, возникающим из-за разных уровней воды в стаканчиках.

Однако, как показано в работе [3], 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 направлении катода.



Рис. 1. Водный мостик между стеклянными стаканами на расстоянии 1 см
при напряжении между электродами 15 кВ.

Результаты экспериментов показывают, что мостики могут образоваться не только в воде, но и в ряде полярных жидкостей с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r > 5$ и низкой проводимостью (глицерин, ацетон, диметилсульфоксид, этанол, метанол, диметилформамид, глицерин, тетрагидрофуран, 1-пропанол, 2-пропанол, дихлорметан) при напряжениях примерно 10–20 кВ. В циклогексане (неполярная жидкость, $\epsilon_r \approx 2$) мостик не наблюдался до напряжений 25 кВ.

В настоящее время нет общепринятого механизма, объясняющего динамическое равновесие ВМ. Так, в работе [4] представлена теория возникновения ВМ, основанная на тензоре давления Максвелла, индуцированном внутри мостика продольным электрическим полем напряженности порядка 10^6 В/м. Согласно этой теории существуют силы давления, перпендикулярные, и силы натяжения, параллельные силовым линиям электрического поля. По мнению авторов [4], это напряжение можно рассматривать как термодинамическую причину устойчивости изогнутого мостика, которое приводит к появлению силы, противоположно направленной силе тяжести, действующей на ВМ.

В работе [5] предполагается, что в сильном электрическом поле упорядоченная система диполей молекул воды создает упругую цепочку, играющую роль несущей конструкции ВМ.

Проведенный анализ литературы позволяет предположить, что физическое понимание устойчивости ВМ может быть получено уже на макроскопическом уровне. Это следует из того, что образование мостика не ограничиваются только водой, но могут наблюдаться и в других жидкостях. Поэтому можно утверждать, что образование и стабильность ВМ обусловлены электрогидродинамическими (ЭГД) процессами, а не особенностями молекулярно-специфических структур.

В данной работе предлагается новый механизм устойчивости ВМ, обусловленный электрическим ветром (ЭВ).

Обоснование роли электрического ветра в устойчивости ВМ

Как известно [6], ЭВ возникает при коронном разряде в воздухе и обусловлен столкновениями ионов, возникающих у коронирующего электрода вследствие сильного электрического поля, с нейтральными частицами воздуха. При этом воздушная среда приходит в движение от электрода-эмиттера к коллектору. Эксперименты показывают [7], что в зависимости от условий проведения экспериментов максимальная скорость ЭВ может достичь до 20 м/с. Это позволяет использовать данное явление в различных технологиях и устройствах, например, в электрических фильтрах, ЭГД-актуаторах, ионных двигателях, устройствах интенсификации теплообмена и др. [7].

Как известно [8], между электродами основное падение напряжения происходит в самом водном мостике, т.е. электрическое поле в основном локализовано в мостике. Поэтому рассмотрим распределение напряженности электрического поля вблизи ВМ.

Как известно, при переходе через границу раздела двух диэлектрических сред вектор напряженности электрического поля \mathbf{E} (также индукции \mathbf{D}) преломляется, причем тангенциальные составляющие вектора \mathbf{E} остаются равными: $E_{1t} = E_{2t}$, в то время как $E_{1n}/E_{2n} = \varepsilon_2/\varepsilon_1$, где ε_1 и ε_2 – относительные диэлектрические проницаемости соответствующих сред. Отсюда следует, что при переходе из воды (среда 1: $\varepsilon_1 = 81$) в воздух (среда 2: $\varepsilon_2 = 1$) нормальная составляющая вектора \mathbf{E}_{2n} возрастает в 81 раз. По этой причине нельзя пренебречь электрической проводимостью газовой среды, прилегающей к поверхности ВМ. Это становится очевидным из рис. 2а, где приводится поведение напряженности электрического поля на границе «вода – воздух» (а).

Расчетным путем можно показать, что $E_2 = 33 E_1$ и с учетом напряжения пробоя воздуха ($U_{np} = 30$ кВ/см) между концами ВМ должен произойти искровой пробой. Однако этого не происходит, поскольку за пробой отвечает тангенциальная составляющая электрического поля, которая при переходе от одной среды к другой остается постоянной. Искровой пробой наблюдался в работе [2], где в среде гелия мостик заменялся постоянным тлеющим разрядом между стеклянными мензурками. Это обусловлено тем, что при получении мостика в различных средах (воздух, водород, азот, гелий, фреон) гелий имеет наименьшую электрическую прочность, равную 0,72 МВ/м (у воздуха эта величина равна 3 МВ/м).

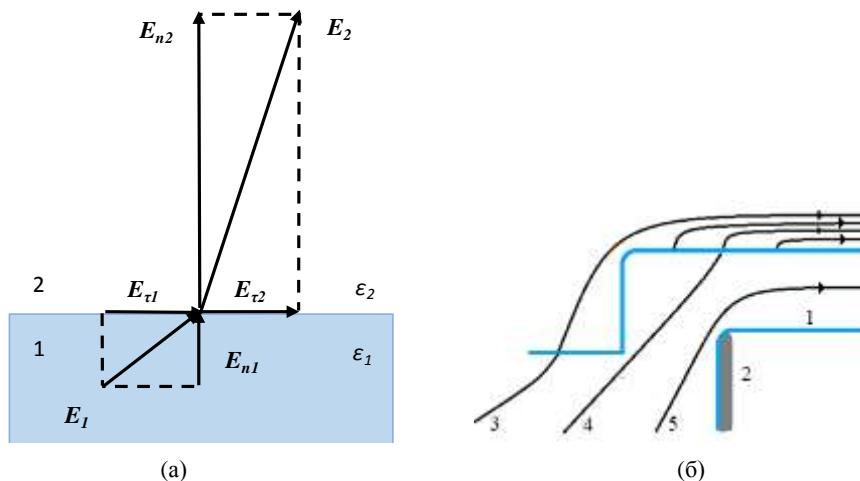


Рис. 2. Напряженности электрического поля на границе «вода – воздух» (а) и распределение силовых линий электрического поля в ВМ (б): 1 – ВМ, 2 – стенка чашки Петри, 3–5 – силовые линии электрического поля.

Как видно из рис. 2б, конфигурация водной системы такова, что силовые линии электрического поля локализованы в верхней приповерхностной области мостика. Этого электрического поля, напряженность которого согласно [8] составляет 525 кВ/м, достаточно для возникновения ЭВ [6], который создает подъемную силу F_1 для ВМ. Действительно, из уравнения Бернулли с учетом силы тяжести, действующей на мостик, можно опре-

делить соотношение этих сил: $n = F_1/mg = \rho_2 v^2 / \rho_1 \pi gr$, где m – масса ВМ; ρ_1 и ρ_2 – плотности воды и воздуха соответственно; v – скорость ЭВ и r – радиус ВМ. Для среднего значения диаметра ВМ, равного 10^{-3} м, $n = 0,084v^2$. Как следует из этого выражения, вес мостика уравновешивается подъемной силой ($n = 1$) при скорости ЭВ 3,4 м/с.

Экспериментальная часть и обсуждение полученных результатов

Эксперименты проводились на установке, аналогичной в работе [3] с тем отличием, что вместо медных электродов использовались платиновые. В начальный момент экспериментов чашки Петри, наполненные дистиллированной водой ниже верхних краев на 1 мм, находились в тесном контакте. Спустя 5 с после подачи на электроды напряжения 15 кВ, чашки раздвигались. Длина ВМ составляла 1 см при диаметре 1–2 мм, сила тока 0,2 мА. Массовый расход жидкости через мостик был около 8 мг/с и оставался постоянным в течение 8 мин, после чего направление потока менялось на противоположное.

Зондовым методом определялось распределение электрического поля вдоль прямой, соединяющей электроды. Для этого зонд, представляющий собой платиновую проволоку диаметром 0,2 мм, соединялся с катодом через балластное сопротивление 320 МОм с последовательно включенным микроамперметром. Измерения силы тока, которая прямо пропорциональна разности потенциалов между катодом и зондом, позволили определить распределение потенциала вдоль прямой x между катодом и анодом. Путем численного дифференцирования полученной кривой была рассчитана зависимость $E(x)$, которая приведена на рис. 3. Полученные результаты показывают, что электрическое поле локализовано, в основном, в самом мостике; максимальное значение его напряженности примерно равно 950 кВ/м.

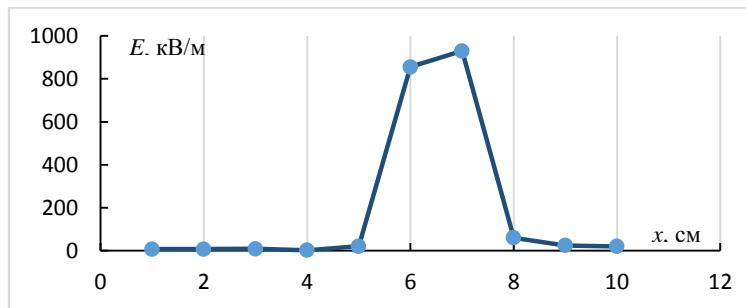


Рис. 3. Распределение напряженности электрического поля вдоль прямой между катодом (расположен в точке $x = 0$) и анодом.

Это приводит к тому, что между концами ВМ возникает коронный разряд, который, в свою очередь, создает ЭВ. Теневым методом проведенные измерения скорости воздушного потока над ВМ показали, что ее значения могут достигать до 6 м/с. Этого достаточно, чтобы возникающая подъемная сила уравновешивала силу тяжести, действующую на ВМ.

Заключение

Впервые предложен новый механизм, объясняющий динамическую устойчивость водного мостика. Путем зондовых измерений показано, что падение напряжения между катодом и анодом происходит, в основном, в самом мостике, что приводит к зажиганию тихого коронного разряда. Проведенные расчеты и эксперименты показали, что в условиях реализации ВМ возникающий при этом электрический ветер создает подъемную силу, уравновешивающую вес мостика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fuchs E. C., Woisetschläger J., Gatterer K., Maier E., Peenik R., Holler G., Eisenkölbl H. The floating water bridge // Journal of Physics D: Applied Physics. 2007. Vol. 40(19). P. 6112–6118.
2. Wexler A. D., Drusova S., Fuchs E. C., Woisetschläger J., Reiter G., Fuchsäger M., Reiter U. Magnetic resonance imaging of flow and mass transfer in electrohydrodynamic liquid bridges // arXiv: Physics. 2017. Vol. 20(1). P. 97–121.
3. Shaikhidinov R. Z., Sharipov T. I. Dynamics of liquid mass transfer in a water bridge // Technical Physics Letters. 2022. Vol. 48(6). P. 31–34.
4. Widom A., Swain J., Silverberg J., Sivasubramanian S., Srivastava Y. N. Theory of the Maxwell pressure tensor and the tension in a water bridge // Physical Review E. 2009. Vol. 80. Art. 016301.
5. Nishiumi H., Honda F. Effects of electrolyte on floating water bridge // Research Letters in Physical Chemistry. 2009. Vol. 40. Art. 371650.
6. Стишков Ю. К., Самуценко А. В., Ашикмин И. А. Коронный разряд и электрогоидродинамические течения в воздухе // УФН. 2018. Т. 188. №12. С. 1331–1345 [Stishkov Yu. K., Samusenko A. V., Ashikhmin I. A. Corona discharge and electrohydrodynamic flows in air // Physics-Uspekhi. 2018. Vol. 188. No. 1–2. P. 1331–1345].
7. Верещагин И. П. Коронный разряд в аппаратах электронно-ионной технологии. М.: Энергоатомиздат, 1985. 157 с. [Vereshchagin I. P. Corona discharge in devices of electron-ion technology. Moscow: Energoatomizdat, 1985. 157 p.].
8. Fuchs E. C., Yntema D., Woisetschläger J. Raman spectroscopy and shadowgraph visualization of excess protons in high-voltage electrolysis of pure water // Journal of Physics D: Applied Physics. 2019. Vol. 52. P. 365302–365311.

Поступила в редакцию 11.09.2025 г.

MECHANISM OF STABILITY OF WATER BRIDGE

*Ufa University of Science and Technology
32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.*

**Email: plasma@bsunet.ru*

The paper proposes a new mechanism for the dynamic stability of a water bridge that occurs between two dielectric containers with distilled water under the action of a constant high-voltage voltage between cylindrical electrodes. Based on the experimental results and calculations, it is established that the cause of the dynamic equilibrium of the bridge is the electric wind.

Keywords: Water Bridge, electric wind, anode, cathode.

Received 11.09.2025.

Об авторах / about the authors**ШАЙХИТДИНОВ Рамиль Зайньевич**

доктор физико-математических наук, доцент,
профессор кафедры электроники и физики наноструктур,
Уфимский университет науки и технологий
Email: plasma@bsunet.ru
Web of Science Researcher ID 94.41.210.56.

Shaikhitdinov Ramil Zainievich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Docent,
Professor of the Department of Electronics
and Physics of Nanostructures,
Ufa University of Science and Technology
Email: plasma@bsunet.ru
ORCID ID: 0009-0008-5199-3133
Web of Science Researcher ID 94.41.210.56.

ЮМИНОВ Игорь Павлович

доцент,
доцент кафедры автоматизации технологических процессов,
Уфимский университет науки и технологий
Email: bgu_tmo@mail.ru

Yuminov Igor Pavlovich,

Docent, Associate Professor of the Department
of Automation of Technological Processes,
Ufa University of Science and Technology
Email: bgu_tmo@mail.ru
ORCID ID: 0009-0003-8713-1563.