

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДЯНОГО МОСТИКА

Жирикова В.Р.

г. Северодвинск, МБОУ «Гуманитарная гимназия № 8», 11 класс

Научный руководитель: Лыбашев А.В., МБОУ «Гуманитарная гимназия № 8»

Данная статья является реферативным изложением основной работы. Полный текст научной работы, приложения, иллюстрации и иные дополнительные материалы доступны на сайте III Международного конкурса научно-исследовательских и творческих работ учащихся «Старт в науке» по ссылке: <https://www.school-science.ru/0317/11/28170>.

Тема нашей работы – исследование водяного мостика.

Водяной мостик (жидкий диэлектрический мостик см. Приложение 3) – физическое явление, возникающее между двумя сосудами с деионизованной низкомолекулярной полярной жидкостью (дистиллированная вода, глицерин, метанол), когда к сосудам прикладывается высокое постоянное напряжение. Между сосудами возникает жидкий мостик, сохраняющий устойчивость при разнесении сосудов на расстояние до 25 мм. Диаметр мостика – порядка 1–3 мм. Мостик остаётся стабильным до 45 минут, при этом температура поднимается до 60 °С. Явление впервые отмечено в 1893 году Уильямом Армстронгом и переоткрыто в 2007 году в Техническом университете Граца. У ученых есть много разных точек зрения, почему это явление происходит, но точного ответа на этот вопрос пока нет.

В школьной программе не изучается «водяной мостик», хотя при наличии всех необходимых составляющих для этого опыта, сделать его не слишком трудно. В домашних условиях водяной мостик вряд ли может быть полезен, но это явление безусловно красивое и необычное, поэтому его можно использовать в качестве элемента декора.

Интересно наблюдать, как молекулы воды взаимодействуют и создают водяной мостик под действием постоянного высокого напряжения. Одним движением руки этот мостик можно растянуть до 25 мм или наоборот сжать.

Актуальность нашей работы заключается в том, что физическое явление «водяной мостик» не объяснено, и хочется понять природу этого явления.

Мы проводили этот опыт с разными видами жидкости, но водяной мостик получился лишь с дистиллированной водой, в остальных случаях мы наблюдали только образование искры между сосудами, наполненными жидкостью. После того, как мы получили желаемый результат, то заин-

тересовались, за счет чего водяной мостик сохраняет стабильное состояние.

Таким образом, цель нашего исследования – исследовать факторы, удерживающие воду в водяном мостике.

Для достижения данной цели мы поставили следующие для себя задачи:

- узнать, что такое коэффициент поверхностного натяжения;
- выяснить, почему текущая струйкой вода собирается в трубочку;
- рассчитать прочность горизонтального водяного мостика;
- определить роль силы поверхностного натяжения в поддержании мостика в стабильном состоянии.

Основными методами нашего исследования станут эксперимент, наблюдение, а так же анализ научной литературы по теме поверхностное натяжение жидкостей.

Объект нашего исследования горизонтальный водяной мостик, образующийся между стаканами с дистиллированной водой, когда к ним приложено постоянное напряжение 25000 В.

Предмет исследования – поверхностное натяжение в водяном горизонтальном мостике, образующийся между двумя стаканами дистиллированной воды, когда в воду опущены электроды, подключенные к источнику постоянного напряжения 25000 В.

Наша гипотеза: вода в горизонтальном водяном мостике удерживается силами поверхностного натяжения, которые создают трубчатую пленку, прочность которой достаточна для удержания веса жидкости, заполняющей внутренность трубчатой пленки.

Поверхностное натяжение

Жидкости стремятся уменьшить поверхность, отделяющую их от газа, пара или другой жидкости. Это стремление у разных жидкостей не одинаково. Чистая вода имеет большее стремление уменьшить свою поверхность, чем раствор мыла или спирта.

Уменьшение поверхности жидкости связано с уменьшением энергии и, следовательно, сопровождается работой межмолекулярных сил сцепления, действующих вдоль поверхности жидкости.

Отношение силы, действующей вдоль поверхности на участок границы жидкости, к длине этого участка называется поверх-

ностным натяжением или коэффициентом поверхностного натяжения.

$$\sigma = F/L \quad [\sigma] = \text{Н/м}.$$

Чтобы определить коэффициент поверхностного натяжения, нужно измерить силу, действующую на участок границы жидкости и поделить ее на длину границы соприкосновения жидкости с твердым телом.

Почему льющаяся вода течет цилиндрической трубкой?

Одним из наиболее интересных свойств воды является ее крайне высокое поверхностное натяжение, достигающее 0,073 Н/м при температуре 20 градусов по Цельсию. Среди других жидкостей только ртуть имеет более сильное поверхностное натяжение. Оно проявляется в том, что вода постоянно стремится стянуть, сократить свою поверхность, хотя она всегда принимает форму емкости, в которой находится в данный момент. Сила поверхностного натяжения заставляет молекулы ее наружного слоя сцепляться, создавая упругую внешнюю пленку.

Проще всего уловить характер поверхностного натяжения, наблюдая образование капли у плохо закрытого или неисправного крана. Капля постепенно растет, образуется сужение – шейка, и капля отрывается. Вода как бы заключена в эластичный мешочек, и этот мешочек разрывается, когда вес превысит его прочность. В действительности, конечно, ничего, кроме воды в капле нет, но сам поверхностный слой воды ведет себя как растянутая эластичная пленка.

Вода в льющейся струе окружена поверхностным слоем, все равно, что эластичной пленкой. Эта пленка стремится сжать трубочку, но из-за равенства давлений жидкости внутри и давления пленки и т.к. согласно закону Паскаля давление равномерно передается со всех сторон как изнутри струи, так и снаружи, струя принимает форму цилиндра.

Гипотезы ученых, объясняющих поведение водяного мостика

Несмотря на то, что явление «водяной мостик» был отмечен еще в 1893 году Уильямом Армстронгом и переоткрыто в 2007 году в Техническом университете Граца, ученые до сих пор не могут дать единое, четкое объяснение. Существуют две наиболее распространенные гипотезы.

Некоторые исследователи предлагают следующее объяснение наблюдаемого явления. Предполагается, что мост может образовываться благодаря электростатическому взаимодействию зарядов на поверхности воды. Подаваемое высокое напряжение

и низкая проводимость хорошо очищенной воды приводят к тому, что под воздействием электрического поля молекулы воды располагаются особым образом, создавая высокоупорядоченную микроструктуру.

Другие исследователи объясняют явление поверхностным натяжением и высокой диэлектрической проницаемостью жидкости.

Гипотеза о том, что вода в мостике приобретает анизотропическую структуру (Анизотропия – различие свойств среды в различных направлениях внутри этой среды), была проверена в 2012 году на синхротронном источнике и не подтвердилась.

Как мы объясняем поведение водяного мостика

Механическая модель водяного мостика

Если взять листок бумаги и скрутить её в трубочку, то она может выдержать нагрузку много больше, чем развернутый листок. Такую же трубочку образует вода, перетекающая из одного стакана в другой.

Рассчитаем прочность водяного мостика, представив его в виде двух наложенных друг на друга желобов (см. Приложение 1).

Для этого рассмотрим известную в физике задачу «Чему равна высота поднятия жидкости между двумя вертикальными параллельными стеклянными пластинами длиной L , расстояние между которыми d (Приложение 1). Коэффициент поверхностного натяжения σ , плотность жидкости ρ . Смачивание полное».

Решение этой задачи известно – сила поверхностного натяжения, возникающая на границе желоба, который образуется из – за искривления поверхности воды равна

$$F = 2\sigma L.$$

Нижняя половина нашего водяного мостика представляет изогнутую водяную пленку (желоб) длиной равной длине водяного моста и радиусом равным радиусу водяного мостика. Прочность нижней половины нашего водяного мостика тоже должна быть равной $F = 2\sigma L$.

В нашем водяном мостике таких желобов – два (смотри Приложение 1), следовательно, прочность его должна увеличиться в два раза и составлять $F = 4\sigma L$.

В задаче рассмотренной выше сила поверхностного натяжения удерживает жидкость между пластинами, а значит, она равна силе тяжести этой жидкости.

Рассчитаем, какую массу жидкости сможет удержать водяной мостик длиной $L=1$ см и радиусом $r=2$ мм. (Радиус капилляра и длину водяного мостика мы нашли, сфотографировав водяной мостик на фоне

миллиметровой бумаги расположенной вблизи водяного мостика. Метод определения размеров водяного мостика смотри в Приложении 4).

$$F_{\text{пр}} = 4\sigma L = 4 \times 0,07288 \text{ Н/м} \times 0,01 \text{ м} = 0,00292 \text{ Н.}$$

$$\varepsilon_s = 0,023 [5]; \varepsilon_L = \Delta L/L = 1 \text{ мм}/10 \text{ мм} = 0,1;$$

$$\varepsilon_F = 0,123.$$

$$\Delta F = \varepsilon_F F_{\text{пр}} = 0,123 \times 0,00292 = 0,00036 \text{ Н.}$$

$$F = (0,00292 \pm 0,00036) \text{ Н.}$$

Эта сила смогла бы удержать массу примерно:

$$M = F/g = 0,00292 \text{ Н}/9,8 \text{ м/с}^2 =$$

$$= 0,000298 \text{ кг или } 0,298 \text{ г.}$$

В водяном мостике с заданными параметрами содержится вода массой

$$m_{\text{пр}} = \rho V = \rho \pi r^2 L =$$

$$= 1000 \text{ кг/м}^3 \cdot 3,14 (0,001 \text{ м})^2 \cdot 0,01 \text{ м} =$$

$$= 0,0000315 \text{ кг}$$

$\varepsilon_m = 2\Delta r/r + \Delta L/L$ – относительная погрешность величины m .

$\varepsilon_m = 2 \cdot 0,134 \text{ мм}/1 \text{ мм} + 1 \text{ мм}/10 \text{ мм} = 0,368$ (абсолютную погрешность Δr берем равной размеру стороны 2 пикселей).

$$\Delta m = \varepsilon_m m_{\text{пр}} = 0,368 \times 0,0000315 = 0,0000116 \text{ кг};$$

$$m = (0,0000315 \pm 0,0000116) \text{ кг.}$$

т.е максимум воды, содержащейся в водяном мостике равен 0,0000431 кг или 0,0431 г.

Как показали расчеты, сила поверхностного натяжения действительно может удерживать вес воды в $0,298/0,0431 = 6,9$ раза больше, чем вес, находящейся внутри горизонтального водяного мостика в стабильном состоянии.

Роль сил сцепления диполей воды в устойчивости водяного мостика

Мы предполагаем, что существует еще один фактор, отвечающий за целостность водяного мостика – это силы сцепления диполей воды, которые образуют цепочки в сильном электрическом поле.

Проверим родившуюся в процессе работы еще одну гипотезу экспериментально исследовав зависимость критической длины (длина, при которой происходит разрыв) водяного мостика от температуры.

Известно, что с повышением температуры коэффициент поверхностного натяжения уменьшается [6]

Если нагревать воду, прочность водяного мостика должна уменьшаться за счет уменьшения коэффициента поверхностного натяжения, но при постоянном высо-

ком напряжении на электродах нашей цепи силы сцепления диполей воды уменьшаться не должны. Так как в предложенной нами механической модели водяного мостика силы поверхностного натяжения могут удержать значительно большую массу воды (в 6,9 раза), то их уменьшение должно вывести на первый план силы сцепления диполей воды, если такие имеются.

Проведем исследование.

Цель: измерить критическую длину L (максимальную длину мостика в момент разрыва) при различных значениях температуры.

Оборудование: источник питания ВС-24М, высоковольтный преобразователь тока «Разряд-1», лабораторный автотрансформатор регулируемый (ЛАТР), электрическая плитка, дистиллированная вода, два термометра (цена деления 1°C , предел измерения 100°C), два стакана 100 мл, линейка ученическая (цена деления 1 мм), набор проводников, пластина алюминиевая, два штатива.

Ход работы. Измеряем критическую длину (максимальную длину мостика в момент разрыва) при температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$ трижды, чтоб найти среднее значение критической длины. Температуру воды повышаем, нагревая воду на электроплитке. Ее нагрев регулируем с помощью лабораторного автотрансформатора. Напряжение автотрансформатора повышаем (если воду нужно нагреть) или понижаем (если нужно остановить нагрев воды, не уменьшая температуру).

По результатам эксперимента строим график зависимости критической длины водяного мостика от температуры (Приложение 5).

Вывод: из построения видно, что почти синхронно графику зависимости коэффициента поверхностного натяжения воды от температуры убывает график зависимости критической длины водяного мостика от температуры, силы сцепления диполей воды невелики и не вносят значительного вклада в прочность водяного мостика.

Мы считаем, что родившаяся в процессе работы еще одна гипотеза не подтвердилась.

Заключение

Продлав эту работу, мы выяснили, что молекулы наружного слоя воды, текущей в водяном мостике, под действием поверхностного натяжения сцепляются, тем самым создают упругую внешнюю пленку. Эта пленка стремится сжать трубочку, но из-за равенства давлений жидкости изнутри и давления пленки и т.к. согласно закону Паскаля давление равномерно передается со всех сторон как изнутри струи, так и снаружи, струя принимает форму цилиндра.

Прочность этой пленки велика, она может выдержать вес в 6,9 раза больший, чем

вес жидкости, находящейся в водяном мостике, таким образом выдвинутая нами гипотеза подтвердилась.

Результаты измерений представлены в таблице.

к сосудам прикладывается высокое постоянное напряжение, получается не с любой деионизованной низкомолекулярной полярной жидкостью. Мы не могли получить мостик, используя в качестве жидкости глицерин.

| № | $t \pm 2, ^\circ\text{C}$ | $L_{\text{max}}, \text{мм}$ | $L_{\text{max ср}} = (L_1 + L_2 + L_3)/3, \text{мм}$ |
|---|---------------------------|-----------------------------|--|
| 1 | 20 | 18 | 18,33 |
| | | 19 | |
| | | 18 | |
| 2 | 30 | 16 | 16,33 |
| | | 18 | |
| | | 15 | |
| 3 | 40 | 14 | 14 |
| | | 13 | |
| | | 15 | |
| 4 | 50 | 14 | 13,67 |
| | | 13 | |
| | | 14 | |
| 5 | 60 | 8 | 8 |
| | | 9 | |
| | | 7 | |
| 6 | 70 | 3 | 2,3 |
| | | 2 | |
| | | 2 | |
| 7 | 80 | 1 | 1 |
| | | 1 | |
| | | 1 | |

Поразмыслив, мы обнаружили еще один фактор, отвечающий за целостность водяного мостика – это силы сцепления диполей воды, которые образуют цепочки в сильном электрическом поле (Приложение 2). Но пока рассчитать какую долю эти силы вносят в прочность водяного мостика, нам не удалось.

Исследовав зависимость критической длины (длина, при которой происходит разрыв) водяного мостика от температуры мы пришли к выводу, что силы сцепления диполей воды невелики и не вносят значительного вклада в прочность водяного мостика.

Оказалось, что жидкий диэлектрический мостик, физическое явление, возникающее между двумя сосудами с жидкостью, когда

Список литературы

1. Сахаров Д.И., Блудов М.И. Физика для техникумов. – М.: Наука, 1967.
2. Сайт о строении молекул воды, их связях и свойствах. – URL: <http://www.meanders.ru/meiers2.shtml>.
3. Сайт о гипотезе ученых, объясняющей явление «водяной мостик». – URL: <http://trindelka.net/forum/interesnosti-so-vsego-sveta/zagadochnij-vodyanoj-mostik-t1631.html>.
4. Сайт о другой гипотезе ученых, объясняющей явление «водяной мостик». Возможная причина устойчивости водяного мостика. – URL: <http://vvkuz.ru/books/art31.pdf>
5. Лабораторная работа по определению коэффициента поверхностного натяжения и расчёт погрешностей измерения. – URL: <http://dereksiz.org/prilozhenie-opredelenie-koefficienta-poverhnostnogo-natyajeniya.htm>
6. Энциклопедия по машиностроению. – URL: <http://mash-xxl.info/info/103286/>.