ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 532.57

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ВОДЫ ИЗ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБКИ, НАГРУЖЕННОЙ НА КЛАПАН ТЕСЛА

Дж.Н. Исхакова<sup>1</sup>, Г.Н. Колесов<sup>1,2</sup>, А.Е. Дубинов<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>Саровский физико-технический институт – филиал Научно-исследовательского ядерного университета «Московский инженерно-физический институт» (СарФТИ НИЯУ МИФИ), г. Саров, Нижегородская обл., 607186, Россия

<sup>2</sup>Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), г. Саров, Нижегородская обл., 607188, Россия \*e-mail: dubinov-ae@yandex.ru

> Поступила в редакцию: 13.06.2024 После доработки: 23.09.2024 Принята к публикации: 24.09.2024

Экспериментально исследованы режимы истечения воды из вертикального цилиндрического сосуда сквозь клапан Тесла, включенный в прямом или реверсивном направлении. Регистрировалась кинематика убывания уровня воды в сосуде. Было получено, что время опорожнения сосуда через клапан Тесла существенно превосходит время опорожнения сосуда через обычную трубку меньшего поперечного сечения (как для прямого, так и для реверсивного включения клапана), опорожнение сосуда при прямом включении клапана Тесла происходит в два раза быстрее, чем при реверсивном включении клапана, а скорость движения уровня водяного столба для обоих направлений включения клапана убывает во времени линейно. Полученные данные свидетельствуют о существенной диодности клапана, а также о том, что истечение жидкости из сосуда через клапан Тесла кинематически сходно с законом Торричелли, но происходит с существенно отличающимися эффективными коэффициентами замедления.

*Ключевые слова:* клапан Тесла, диодность, закон Торричелли, коэффициент замедления. DOI: 10.26583/vestnik.2024.5.2 EDN JZCTNT

#### ВВЕДЕНИЕ

Знаменитый электротехник и изобретатель Никола Тесла, справедливо называемый «Повелителем Молний» [1], в 1920 г. изобрел не связанный с электричеством жидкостной клапан. Главное достоинство клапана Тесла заключается в том, что он не имеет механически подвижных частей (рис. 1) [2].

Принцип действия клапана Тесла основан на разделении потока жидкости, заходящей в клапан с одной из его сторон, на две части и перенаправлении одной из этих частей навстречу другой части. В результате этого обеспечивается значительное возрастание активного гидравлического сопротивления клапана в направлении напуска жидкости в клапан. При напуске жидкости с противоположной стороны клапана разделение ее на две части практически не происходит (направления течений жидкости в клапане при прямом и реверсивном включениях показаны на рис. 1 стрелками). В итоге клапан будет проводить поток жидкости в первом случае с бо́льшим гидравлическим сопротивлением (реверсивное включение клапана), а в другом – с меньшим (прямое включение клапана). Иными словами, клапан Тесла демонстрирует диодность (т.е. неодинаковость протекания в нем жидкости в прямом и реверсивном включении).

На долгое время изобретение Тесла считалось забытым. Однако в последнее время клапан Тесла привлек внимание исследователей, работающих в различных областях науки и техники: микрофлюидике; химических технологиях смешивания жидкостей; двигателестроении; робототехнике и др. [3–20]. Также возник интерес к нему у преподавателей механики и физики в учебных заведениях [21–23].

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ВОЛЫ ИЗ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБКИ, НАГРУЖЕННОЙ НА КЛАПАН ТЕСЛА

# UNITED STATES PATENT OFFIC

#### NIKOLA TESLA, OF NEW YORK, N. Y.

#### VALVULAR CONDUIT.

1,329,559.

Specification of Letters Patent.

Patented Feb. 3, 1920. Application filed February 21, 1916, Serial No. 79,703. Benewed July 8, 1919. Serial No. 309,482.

To all whom it may concern:

Be it known that I, NIKOLA TESLA, a citizen of the United States, residing at New York, in the county and State of New York, have invented certain new and useful Improvements in Valvular Conduits, of which the following is a full, clear, and exact description.

direction, other than surface friction, constitute an almost impassable barrier to its flow in the opposite sense by reason of the more or less sudden expansions, contractions, deflections, reversals of direction, stops and starts and attendant rapidly succeeding transformations of the pressure and velocity energies.



Рис. 1. Коллаж из фрагментов описания Патента US 1329559, 1920 [2]: стрелки справа показывают течение воды в клапане при прямом включении клапана; стрелки слева – течение воды при реверсивном включении клапана (из [23])

Недавно был открыт еще один удивительный факт, связанный с клапаном Тесла: оказывается, у некоторых видов акул, скатов и морских коньков желудочно-кишечный тракт выполнен в виде спирального клапана Тесла, что обеспечивает однонаправленное движение продуктов переваривания пищи без перильстатического мышечного проталкивания [24].

Следует отметить, что геометрия клапана Тесла достаточно сложная, поэтому общепринятой теории течения жидкости в клапане пока не существует. Для получения новых знаний о работе клапана проводятся экспериментальные исследования [3, 22] и осуществляются численные симуляции [4, 8, 12, 17, 19].

В [22] были измерены потоки жидкости и гидравлическое сопротивление клапана при прямом и реверсивном подключении. Потоки и гидравлические сопротивления оказались различными. Из этого, в частности, следует, что истечение жидкости из сосуда сквозь клапан, включенный в прямом направлении, происходит существенно быстрее, чем из такого же сосуда сквозь этот же клапан, включенный в реверсивном направлении.

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЦЕЛИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для многих приложений важно знать не только время истечения жидкости из сосуда, но и динамику убывания уровня жидкости в этом сосуде во времени.

Известны, по меньшей мере, три режима истечения жидкости из сосуда через патрубок, установленный на дне этого сосуда.

Например, режим истечения Торричелли, при котором скорость *v* вытекания жидкости из сосуда через малое отверстие на его дне подчиняется закону  $v = \sqrt{2gh}$  [25–27]. Здесь обозначено: *h* – высота столба жидкости в сосуде и g – ускорение свободного падения. Можно вывести простое обыкновенное дифференциальное уравнение, которое следует из закона Торричелли и описывает динамику уровня столба жидкости в цилиндрическом сосуде во времени при вытекании жидкости через патрубок на дне сосуда [25, 26] (без учета факторов диссипации – вязкости, трения, смачиваемости жидкостью стенок, сопротивления воздуха и т.п.):

$$\frac{dh}{dt} = -k\sqrt{h},\tag{1}$$

где коэффициент  $k = (s/S)\sqrt{2g}$ , имеющий размерность ст<sup>1/2</sup> ·  $s^{-1}$ ; *S* – площадь поперечного сечения сосуда; *S* – площадь поперечного сечения отверстия на дне сосуда; *g* – ускорение свободного падения.

Точное решение уравнения (1) показывает, что h убывает по квадратичной функции от времени, выпуклой вниз:

$$h = \frac{k^2 t^2}{4} - k \sqrt{h_0 t} + h_0, \qquad (2)$$

а модуль скорости движения уровня воды в сосуде V, выражение для которого можно получить дифференцированием (2) по времени, убывает по линейному закону, т.е. движение уровня – равнозамедленное:

$$V = \frac{s}{S}\sqrt{2gh_0} - \left(\frac{s}{S}\right)^2 gt.$$
 (3)

В (2) и (3) обозначено:  $h_0$  – начальная высота жидкости в сосуде. При этом, отрицательное ускорение (замедление)  $a = -g(s/S)^2$  может служить удобной числовой характеристикой, определяющей замедляющееся движение уровня воды.

Из (2) и (3) можно определить, что полное время опорожнения сосуда составляет

$$T = \frac{2\sqrt{h_0}}{k} = \frac{S}{s}\sqrt{\frac{2h_0}{g}}.$$
 (4)

Другой режим истечения возникает в процессе вытекании жидкости в свободное пространство при полном отсутствии дна в сосуде. Тогда уменьшение уровня жидкости в сосуде происходит по другому закону, близкому к свободному падению. В этом случае скорость Vнарастает по линейному закону равноускоренно, а уровень воды h убывает по квадратичной функции от времени, но выпуклой вверх. Реальное ускорение уровня жидкости a в этом случае немного меньше g из-за силы вязкого трения и смачиваемости стенок сосуда жидкостью. И еще один режим истечения жидкости возникает, когда площадь поперечного сечения патрубка больше площади поперечного сечения сосуда – суперпадение с ускорением, превышающем g [28, 29].

Установление того, как происходит убывание высоты жидкости и изменение скорости истечения во времени из сосуда, нагруженного на клапан Тесла при прямом и реверсивном подключении, ранее нигде не исследовалось. Оставался нерешенным следующий вопрос: в каком режиме будут происходить изменения высоты жидкости h в сосуде и скорости движения уровня V во времени при истечении воды через клапан Тесла? И будет ли скорость движения уровня V изменяться линейно во времени?

Экспериментальное получение ответа на этот вопрос – цель данной работы.

# ОБОРУДОВАНИЕ, МАТЕРИАЛЫ, МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследовалось истечение жидкости из сосуда в форме прозрачной эластичной ПХВ трубки, имеющей внутренний диаметр 6 mm и длину 1000 mm. Трубчатый сосуд закреплялся на плите, которая устанавливалась вертикально. В нижней части сосуда подключался кран золотникового типа с длиной канала 60 и имеющий проходное отверстие диаметром 6 mm.

Снизу к крану могла быть подсоединена трубка меньшего диаметра d = 3 mm, другой конец которой работал на свободный слив жидкости в водоприемник. Тогда истечение жидкости происходило через резкое сужение труб, характеризующееся отношением s/S = 0.25. Этот вариант подключения использовалась нами для контроля и калибровки.

Для проведения основных экспериментов использовался одноканальный пластиковый Тесла габаритными размерами клапан с 225×22×18 mm (рис. 2) [30]. Каналы клапана были выполнены с прямоугольным поперечным сечением: глубина×ширина = 4×2 mm. Каналы имели периодически расположенные 16 одинаковых петель по 2 петли в периоде, длина периода  $\Lambda = 24$  mm. Петли имели габаритные размеры  $l \times d = 12 \times 7$  mm, питч-углы каналов при разветвлении  $\alpha_{\pm} = \pm 24^{\circ}$ . На концах клапана имелись резьбовые отверстия М6.







Клапан Тесла с одного из концов подключался с помощью штуцера к сосуду. Тогда соотношение площадей поперечного сечения сосуда *S* и поперечного сечения канала  $s_T$  в клапане Тесла составляло  $s_T/S \approx 0.59$ . При этом второе отверстие клапана работало на свободный слив жидкости в водоприемник. Клапан располагался горизонтально. Схема плиты с закрепленным на ней оборудованием показана на рис. 3.

В качестве жидкости использовалась вода. Для улучшения качества визуализации уровня воды в сосуде, согласно рекомендациям [31–33], вода подкрашивалась несколькими кристаллами перманганата калия KMnO<sub>4</sub>. Ранее было определено, что лиловый цвет водному раствору KMnO<sub>4</sub> придают ионы MnO<sub>4</sub><sup>-</sup> [34], а добавление несколько кристаллов KMnO<sub>4</sub> размером ~ 200–400 µm в воду объемом в несколько сотен миллилитров практически не изменяет такие свойства воды, как вязкость и смачиваемость твердых поверхностей.

Эксперименты проводились следующим образом. Сначала сосуд при закрытом кране заполнялся водой на высоту  $h_0 = 750$  mm. Далее делалась пауза длительностью несколько минут, в течение которой из водяного столба в сосуде удалялись пузыри воздуха. После этого открывался кран, и вода стекала внизу под действием гравитации.

Для регистрации динамики истечения воды из сосуда применялся метод, основанный на видеозаписи процесса, последующем раскадрировании видеозаписи и оцифровки положения уровня воды в сосуде в зависимости от номера кадра. Подобный метод часто использовался для исследования быстрых механических движений [35, 36]. Так как процесс истечения воды из сосуда имеет длительность несколько секунд, то для видеозаписи вполне может подойти смартфон [37]. В данной работе мы использовали установленный на триподе смартфон Samsung Galaxy A50, позволяющий регистрировать динамические процессы с частотой 240 fps.



Рис. 3. Схема плиты с закрепленным на ней оборудованием: 1 -клапан Тесла; 2 -фонтанирование вытекающей из клапана воды; 3 -столб воды; 4 -верхний уровень столба воды; 5 -ПХВ трубка; 6 -стикер, по которому устанавливался начальный уровень столба воды  $h_0$ ; 7 и 8 -размерные стикеры для калибровки высоты; 9 -плита; 10 -золотниковый кран; 11 -патрубок; 12 -штуцер; 13 -водосборник

Экспериментально исследовались три режима истечения жидкости из сосуда: режим I – истечение жидкости в прямую трубку меньшего диаметра; режим II – истечение жидкости в случае, когда нижний конец трубки был нагружен клапаном Тесла при его прямом включении; режим III – истечение жидкости в случае, когда нижний конец трубки был нагружен клапаном Тесла при его реверсивном включении. На рис. 4 представлены совмещенные отдельные кадры одной из видеозаписей в режиме III: слева – уровень воды находится в начальной позиции ( $h_0$ ); в центре – уровень воды находится в некоторой позиции в движении h(t); справа – уровень воды находится вблизи завершающей видеозапись позиции h = 0 mm, т.е. вблизи крана, соответственно.



Рис. 4. Отдельные кадры видеозаписи истечения воды из трубки через клапан Тесла в режиме III; стрелка указывает положение уровня воды в трубке: слева направо – в начальный момент времени; в промежуточный момент; непосредственно перед завершением процесса

Эксперименты во всех трех режимах были повторены многократно. Все эксперименты были проведены при внешнем атмосферном давлении 750 Тогг и температуре в помещении 21 °C.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

После цифровой обработки видеозаписей были получены законы движения уровня воды в сосуде h(t) в трех режимах I, II и III. Они представлены на рис. 5,*a*, там же показана кривая, соответствующая теоретической зависимости (2) при s/S = 0.25. Видно, что на все четыре кривые демонстрируют убывание h(t), причем все кривые выгнуты вниз. Это свидетельствует о том, что динамика истечения воды из сосуда близка к тому, что предсказывается законом Торричелли, и совершенно не похожа на динамику равноускоренного свободного падения.

Заметно некоторое различие кривой в режиме I и теоретической кривой по формуле (2): в эксперименте время полного опорожнения сосуда составляет ≈ 1.96 s, а теория дает 1.56 s. Это расхождение можно объяснить тем, что теория не учитывает факторы диссипации, которые замедляют истечение воды из сосуда, а также не учитывается переходной процесс, связанный с длительностью открывания крана.



**Рис. 5.** Графики экспериментальных зависимостей: *a*) h(t); *б*) V(t)

Прямое подключение клапана Тесла к выходу сосуда (режим II) дает неожиданный результат: несмотря на то, что отношение площадей  $s_T/S \approx 0.59$  более чем в 2 раза превышает отношение площадей s/S = 0.25 в режиме I, время опорожнения сосуда в режиме II составляет  $\approx 5.1$  s. Отсюда следует, что наличие боковых каналов (рукавов), отводящих воду в сторону от основного канала, а затем воссоединяющихся с ним, существенно снижают пропускную способность клапана даже в прямом направлении.

Опорожнение сосуда при реверсивном подключении клапана Тесла (в режиме III) происходит за еще большее время ≈ 10.6 s, более чем в 2 раза превышающее время опорожнения в режиме II. Это доказывает наличие существенной диодности используемого клапана (в [23] была введена величина диодности, равная отношению времен опорожнения сосуда в режимах II и III).

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ВОДЫ ИЗ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБКИ, НАГРУЖЕННОЙ НА КЛАПАН ТЕСЛА

На рис. 5, $\delta$  показаны графики скорости уменьшения уровня воды в сосуде от времени V(t) в трех режимов I, II и III. Они были получены путем численного дифференцирования экспериментальных данных из рис. 5,a с межкадровым шагом дифференцирования 1/240 s. Все кривые V(t) на рис. 5, $\delta$  имеют начальный участок роста модуля скорости длительностью ~0.2...0.5 s. Этот участок представляет собой переходной процесс, возникающий из-за конечности времени открывания крана и некоторой инерции столба жидкости.

Далее все кривые показывают линейное убывание модуля скорости V(t) почти до нуля. Такое поведение кривых V(t), аналогичное (3), доказывает, что истечение жидкости из сосуда через клапан Тесла аналогично закону Торричелли для обоих направлений подключения. Однако несмотря на то, что истечение жидкости через клапан Тесла демонстрирует кинематическую схожесть с истечением в режиме Торричелли, отождествлять эти два процесса все же нельзя. Дело в том, что режим истечения Торричелли – ламинарный, а в течении клапана Тесла в местах воссоединения токов возникают вихри и перемешивание [7, 17], что приводит к существенному увеличению локального гидравлического сопротивления.

Многократное повторение экспериментов во всех режимах показало, что кривые V(t) на рис. 5,*a*,*б* ложатся друг на друга с точностью до толщины линии. Следовательно, можно с хорошей повторяемостью получить значения темпов замедления *a*, а также длительности процесса опорожнения сосуда *T* в режимах I, II и III для каждого эксперимента. Обработка кривых на рис. 5,*б* дало экспериментальные результаты, которые представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Полученные значения коэффициентов замедления *а* в движении уровня воды в сосуде и времени *T* опорожнения сосуда

Режим	a, cm/s <sup>2</sup>	<i>T</i> , s
Свободное падение ( <i>meop</i> .)	981	0.39
I (meop.)	-61.3	1.56
I (экспер.)	-14.6±0.9	1.96±0.06*
II (экспер.)	$-3.2\pm0.1$	5.09±0.03*
III (экспер.)	$-0.78 \pm 0.09$	10.62±0.04*

\*За вычетом длительности переходного процесса.

В ней все погрешности были вычислены как среднеквадратичные отклонения по нескольким экспериментальным реализациям. Там же, для сравнения, приводятся результаты теоретических расчетов для свободного падения пробного тела с ускорением g = 981 сm/s<sup>2</sup> с высоты  $h_0$  и для режима I, вычисленные по формуле (3).

#### выводы

В работе экспериментально исследованы режимы истечения воды из вертикального цилиндрического сосуда сквозь 16-звенный клапан Тесла, включенный в прямом и реверсивном направлении. Регистрировалась кинематика убывания уровня воды в сосуде. Было получено следующее:

1) время опорожнения сосуда через клапан Тесла существенно превосходит время опорожнения сосуда через обычную трубку меньшего поперечного сечения (как для прямого, так и для реверсивного включения клапана);

2) опорожнение сосуда при прямом включении клапана Тесла происходит в 2 раза быстрее, чем при реверсивном включении клапана (этот результат подтверждает диодность используемого клапана;

3) высота уровня водяного столба для обоих направлений включения клапана Тесла убывает во времени по квадратичному закону;

4) скорость движения уровня водяного столба для обоих направлений включения клапана Тесла убывает во времени линейно. Это свидетельствует о том, что истечение жидкости из сосуда через клапан Тесла в обоих случаях кинематически сходно с законом Торричелли с различающимися эффективными темпами замедления для этих режимов, причем эти эффективные темпы заметно отличаются от значения, предсказываемого теорией, основанной на законе Торричелли, и равного квадрату отношения площадей (3) (в единицах g)).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cheney M., Uth R.* Tesla, master of lightning. NY: Barnes & Noble Publishing, 1999. 184 p. https://teslauniverse.com/nikola-tesla/books/teslamaster-lightning

2. *Tesla N.* Valvular conduit, Patent US 1329559, 1920. https://patentimages.storage.googleapis.com/26/65/c7/c647a84af1f78f/US1329559.pdf

3. Thompson S.M., Ma H.B., Wilson C. Investigation of a flat-plate oscillating heat pipe with Tesla-type check valves // Experim. Thermal Fluid Sci., 2011. V. 35. № 7. P. 1265.

DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2011.04.014

4. Nobakht A.Y., Shahsavan M., Paykani A. Numerical study of diodicity mechanism in different Tesla-type microvalves // J. Appl. Res. Techn., 2013. V. 11. № 6. P. 876. DOI: 10.1016/S1665-6423(13)71594-3

5. Mohammadzadeh K., Kolahdouz E.M., Shirani E., Shafii M.B. Numerical study on the performance of Tesla type microvalve in a valveless micropump in the range of low frequencies // J. Micro-Bio Robot., 2013. V. 8. N 1. P. 145.

DOI: 10.1007/s12213-013-0069-1

6. Wang C.-T., Chen Y.-M., Hong P.-A., Wang Y.-T. Tesla valves in micromixers // Int. J. Chem. Reactor Eng., 2014. V. 12. № 1. P. 397.

DOI: 10.1515/ijcre-2013-0106

7. de Vries S.F., Florea D., Homburg F.G.A., Frijns A.J.H. Design and operation of a Tesla-type valve for pulsating heat pipes // Int. J. Heat Mass Transfer, 2017. V. 105. No 1. P. 1–11.

DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.09.062

8. *Qian J.-Y., Chen M.-R., Gao Z.-X., Jin Z.-J.* Mach number and energy loss analysis inside multi-stage Tesla valves for hydrogen decompression // Energy, 2019. V. 179. № 1. P. 647. DOI: 10.1016/j.energy.2019.05.064

9. Abdelwahed M., Chorfi N., Malek R. Reconstruction of Tesla micro-valve using topological sensitivity analysis // Adv. Nonlinear Anal., 2020. V. 9. № 1. P. 567. DOI: 10.1515/anona-2020-0014

10. Nguyen Q.M., Abouezzi J., Ristroph L. Early turbulence and pulsatile flows enhance diodicity of Tesla's macrofluidic valve // Nature Comm., 2021. V. 12. № 1. P. 2884. DOI: 10.1038/s41467-021-23009-y

11. Bohm S., Phi H.B., Moriyama A., Runge E., Strehle S., König J., Cierpka C., Dittrich L. Highly efficient passive Tesla valves for microfluidic applications // Microsyst. & Nanoeng., 2022. V. 8. № 1. P. 97. DOI: 10.1038/s41378-022-00437-4

12. Hu P., Wang P., Liu L., Ruan X., Zhang L., Xu Z. Numerical investigation of Tesla valves with a variable angle // Phys. Fluids, 2022. V. 34.  $N_{\rm P}$  3. P. 033603. DOI: 10.1063/5.0084194

13. Buglie W.L.N., Tamrin K.F., Sheikh N.A., Yasin M.F.M., Mohamaddan S. Enhanced fluid mixing using a reversed multistage Tesla micromixer // Chem. Eng. Technol., 2022. V. 45. № 7. P. 1255. DOI: 10.1002/coat.202200055

DOI: 10.1002/ceat.202200055

14. Li X., Worrall K., Vedanthu A., Scott-George A., Harkness P. The pulse-elevator: A pump for granular materials // Acta Astronautica, 2022. V. 200. № 1. P. 33. DOI: 10.1016/j.actaastro.2022.07.052

15. Wang J., Cui B., Liu H., Chen X., Li Y., Wang R., Lang T., Yang H., L. Li, Pan H., Quan J., Chen Y., Xu J., Liu Y. Tesla valve-based flexible microhybrid chip with unidirectional flow properties // ASC Omega, 2022. V. 7. № 36. P. 31744.

DOI: 10.1021/acsomega.2c02075

16. Andriukaitis D., Vargalis R., Šerpytis L., Drevinskas T., Kornyšova O., Stankevičiu M., Bimbiraitė-Survilienė K., Kaškonienė V., Maruškas A.S., Jonušaus*kas L.* Fabrication of microfluidic Tesla valve employing femtosecond bursts // Micromachines, 2022. V. 13. № 8. P. 1180. DOI: 10.3390/mi13081180

17. Wang P., Hu P., Liu L., Xu Z., Wang W., Scheid B. On the diodicity enhancement of multistage Tesla valves // Phys. Fluids., 2023. V. 35.  $N_{2}$  5. P. 052010. DOI: 10.1063/50145172

18. *Purwidyantri A., Prabowo B.A.* Tesla valve microfluidics: the rise of forgotten technology // Chemosensors, 2023. V. 11. № 4. P. 256.

DOI: 10.3390/chemosensors11040256

19. Wang Y., He Y., Xie X., Huang Z., Xu H., Hu Q., Ma C. Design and simulation of a new near zero-wear non-contact self-impact seal based on the Tesla valve structure // Lubricants, 2023. V. 11.  $N_{\odot}$  3. P. 102. DOI: 10.2300/ubricants.11020102

DOI: 10.3390/lubricants11030102

20. Zeng G., Xu M., Mou J., Hua C., Fan C. Application of Tesla valve's obstruction characteristics to reverse fluid in fish migration // Water, 2023. V. 15. № 1. P. 40. DOI: 10.3390/w15010040

21. Stith D. The Tesla valve – a fluidic diode // Phys. Teacher, 2019. V. 57. № 3. P. 201.

DOI: 10.1119/1.5092491

22. Nguyen Q.M., Huang D., Zauderer E., Romanelli G., Meyer C.L., Ristroph L. Tesla's fluidic diode and the electronic-hydraulic analogy // Amer. J. Phys., 2021. V. 89.  $\mathbb{N}$  3. P. 393. DOI: 10.1119/10.0003395

23. Kolesov H.N., Dubinov A.E. Custom-made tubular Tesla valves for laboratory lessons in classroom // Phys. Fluids, 2024. V. 36. № 5. P. 051801.

DOI: 10.1063/5.0203900

24. Leigh S.C., Summers A.P., Hoffmann S.L., German D.P. Shark spiral intestines may operate as Tesla valves // Proc. Royal Soc. B., 2021. V. 288. № 1955. P. 20211359. DOI: 10.1098/rspb.2021.1359

25. Driver R.D. Torricelli's law – an ideal example of elementary ODE // Amer. Math. Monthly, 1998. V. 105.  $\mathbb{N}$  5. P. 453.

DOI: 10.1080/00029890.1998.12004909

26. Atkin K. Investigating the Torricelli law using a pressure sensor with the Arduino and MakerPlot // Phys. Educ., 2018. V. 53. N 6. P. 065001.

DOI: 10.1088/1361-6552/aad680

27. *Williams H*. Vessel drainage under the influence of gravity // Phys. Teacher, 2019. V. 59. № 8. P. 629. DOI: 10.1119/5.0020444

28. *Villermaux E., Pomeau Y.* Super free fall // J. Fluid Mech., 2010. V. 642. № 1. P. 147.

DOI: 10.1017/S0022112009992424

29. *Treviňo C., Peralta S., Torres A., Medina A.* Super free fall of an inviscid liquid through interconnected vertical pipes // Europhys. Lett., 2015. V.112. №1. P. 14002. DOI: 10.1209/0295-5075/112/ 1400

30. Plastic Valvular Conduit – Tesla valve. [Электронный pecypc]. https://www.gyroscope.com/d.asp? product=VC1 (дата обращения 10.06.2024).

31. *Linkoln J.* Electric field patterns made visible with potassium permanganate // Phys. Teacher, 2017. V. 55. № 2. P. 74. DOI: 10.1119/1.4974114

32. Dubinov A.E., Kozhayeva J.P., Lubimtseva V.A., Selemir V.D. Hydrodynamic and physicochemical phe-

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ВОДЫ ИЗ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБКИ, НАГРУЖЕННОЙ НА КЛАПАН ТЕСЛА

nomena in liquid droplets under the action of nanosecond spark discharges: A review // Adv. Colloid Interface Sci., 2019. V. 271. № 1. P. 101986.

DOI: 10.1016/j.cis.2019.07.007

33. Dekhtyar V.A., Dubinov A.E. Visualization of liquids flows in microvluidics and plasma channels in nanosecond spark microdischarges by means of digital microscopy // Sci. Visualization, 2023. V. 15. № 1. P. 1. DOI: 10.26583/sv.15.1.01

34. *Pearson R.S.* Manganese color reactions // J. Chem. Educ., 1988. V. 65. № 5. P. 451. DOI: 10.1021/ed065p451

35. Dubinov A.E., Iskhakova D.N., Lyubimtseva V.A. An inversion of contact angle hysteresis when a liquid drop slides up on an inclined plane under the spark discharge action // Phys. Fluids, 2021. V. 33. № 6. P. 061707. DOI: 10.1063/5.0055862

36. Dubinov A.E., Dubinova I.D. Added point-like weight increases the levitation time of the falling soft coil spring // Mech. Res. Comm., 2012. V. 113. № 1. P. 103670. DOI: 10.1016/j.mechrescom.2021.103670

37. *Kuhn J., Vogt P.* Smartphones as mobile minilabs in physics: Edited volume featuring more than 70 examples from 10 years the physics teacher-column iPhysicsLabs. Cham, Switzerland: Springer Nature, 2022. https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-94044-7

Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta «MIFI», 2024, vol. 13, no. 5, pp. 293-302

### EXPERIMENTAL RESEARCH OF WATER OUTFLOW FROM A VERTICAL TUBE THROUGH A TESLA VALVE

Dj.N. Iskhakova<sup>1</sup>, H.N. Kolesov<sup>1,2</sup>, A.E. Dubinov<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>Sarov Institute of Physics and Technology – Branch of National Research Nuclear University «Moscow Engineering Physics Institute» (SarFTI–NRNU MEPhI), 6 Dukhova St., Sarov, Nizhny Novgorod region, 607186, Russia <sup>2</sup>Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific and Research Institute of Experimental Physics (RFNC–VNIIEF), 37 Mira Ave., Sarov, Nizhny Novgorod region, 607188, Russia \* e-mail: dubinov-ae@yandex.ru

Received June 13, 2024; revised September 23, 2024; accepted September 24, 2024

The modes of the water outflow from a vertical cylindrical vessel through a Tesla valve connected in direct or reverse directions were experimentally studied. The kinematics of the water level decrease in the vessel was recorded. It was found that the time of the vessel emptying through a Tesla valve considerably exceeds the time of the vessel emptying through an ordinary tube of a smaller cross-section (both for direct and reverse switching on of the valve). Emptying of the valve at the direct switching on is twice faster than at the reverse one. The velocity of the water column level decreases with time linearly. The obtained data prove that the valve has diodicity, and that the liquid outflow from the vessel through the Tesla valve follow to some analog of the Torricelli's law kinematically with different effective slowing factors.

Keywords: Tesla valve, diodicity, Torricelli's law, slowing factor.

#### REFERENCES

1. *Cheney M., Uth R.* Tesla, master of lightning. New York, Barnes & Noble Publishing, 1999. 184 p. https://teslauniverse.com/nikola-tesla/books/tesla-master-lightning

2. *Tesla N.* Valvular conduit, Patent US 1329559, 1920. https://patentimages.storage.googleapis.com/26/65/c7/c647a84af1f78f/US1329559.pdf

3. *Thompson S.M., Ma H.B., Wilson C.* Investigation of a flat-plate oscillating heat pipe with Tesla-type check valves. Experim. Thermal Fluid Sci., 2011. Vol. 35. No. 7. Pp. 1265.

DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2011.04.014

4. *Nobakht A.Y., Shahsavan M., Paykani A.* Numerical study of diodicity mechanism in different Tesla-type microvalves. J. Appl. Res. Techn., 2013. Vol. 11, No. 6. Pp. 876. DOI: 10.1016/S1665-6423(13)71594-3

5. Mohammadzadeh K., Kolahdouz E.M., Shirani E., Shafii M.B. Numerical study on the performance of Tesla type microvalve in a valveless micropump in the range of low frequencies. J. Micro-Bio Robot., 2013. Vol. 8. No. 1. Pp. 145. DOI: 10.1007/s12213-013-0069-1

6. *Wang C.-T., Chen Y.-M., Hong P.-A., Wang Y.-T.* Tesla valves in micromixers. Int. J. Chem. Reactor Eng., 2014. Vol. 12. No. 1. Pp. 397. DOI: 10.1515/ijcre-2013-0106 7. de Vries S.F., Florea D., Homburg F.G.A., Frijns A.J.H. Design and operation of a Tesla-type valve for pulsating heat pipes. Int. J. Heat Mass Transfer, 2017. Vol. 105, No. 1. Pp. 1–11.

DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.09.062

8. *Qian J.-Y., Chen M.-R., Gao Z.-X., Jin Z.-J.* Mach number and energy loss analysis inside multi-stage Tesla valves for hydrogen decompression. Energy, 2019. Vol. 179. No. 1. Pp. 647.

DOI: 10.1016/j.energy.2019.05.064

9. Abdelwahed M., Chorfi N., Malek R. Reconstruction of Tesla micro-valve using topological sensitivity analysis. Adv. Nonlinear Anal., 2020. Vol. 9. No. 1. Pp. 567. DOI: 10.1515/anona-2020-0014

10. Nguyen Q.M., Abouezzi J., Ristroph L. Early turbulence and pulsatile flows enhance diodicity of Tesla's macrofluidic valve. Nature Comm., 2021. Vol. 12. No. 1. Pp. 2884.

DOI: 10.1038/s41467-021-23009-y

11. Bohm S., Phi H.B., Moriyama A., Runge E., Strehle S., König J., Cierpka C., Dittrich L. Highly efficient passive Tesla valves for microfluidic applications. Microsyst. & Nanoeng., 2022. Vol. 8. No. 1. Pp. 97. DOI: 10.1038/s41378-022-00437-4

12. *Hu P., Wang P., Liu L., Ruan X., Zhang L., Xu Z.* Numerical investigation of Tesla valves with a variable angle. Phys. Fluids, 2022. Vol. 34. No. 3. Pp. 033603. DOI: 10.1063/5.0084194

13. Buglie W.L.N., Tamrin K.F., Sheikh N.A., Yasin M.F.M., Mohamaddan S. Enhanced fluid mixing using a reversed multistage Tesla micromixer. Chem. Eng. Technol., 2022. Vol. 45. No. 7. Pp. 1255. DOI: 10.1002/ceat.202200055

14. Li X., Worrall K., Vedanthu A., Scott-George A., Harkness P. The pulse-elevator: A pump for granular materials. Acta Astronautica, 2022. Vol. 200. No. 1. Pp. 33. DOI: 10.1016/j.actaastro.2022.07.052

15. Wang J., Cui B., Liu H., Chen X., Li Y., Wang R., Lang T., Yang H., L. Li, Pan H., Quan J., Chen Y., Xu J., Liu Y. Tesla valve-based flexible microhybrid chip with unidirectional flow properties. ASC Omega, 2022. Vol. 7. No. 36. Pp. 31744. DOI: 10.1021/acsomega. 2c02075

16. Andriukaitis D., Vargalis R., Šerpytis L., Drevinskas T., Kornyšova O., Stankevičiu M., Bimbiraitė-Survilienė K., Kaškonienė V., Maruškas A.S., Jonušauskas L. Fabrication of microfluidic Tesla valve employing femtosecond bursts. Micromachines, 2022. Vol. 13. No. 8. Pp. 1180. DOI: 10.3390/mi13081180

17. Wang P., Hu P., Liu L., Xu Z., Wang W., Scheid B. On the diodicity enhancement of multistage Tesla valves. Phys. Fluids, 2023. Vol. 35. No. 5. Pp. 052010. DOI: 10.1063/5.0145172

18. *Purwidyantri A., Prabowo B.A.* Tesla valve microfluidics: the rise of forgotten technology. Chemosensors, 2023. Vol. 11. No. 4. Pp. 256.

DOI: 10.3390/chemosensors11040256

19. Wang Y., He Y., Xie X., Huang Z., Xu H., Hu Q., Ma C. Design and simulation of a new near zero-wear non-contact self-impact seal based on the Tesla valve structure. Lubricants, 2023. Vol. 11. No. 3. Pp. 102.

DOI: 10.3390/lubricants11030102

20. Zeng G., Xu M., Mou J., Hua C., Fan C. Application of Tesla valve's obstruction characteristics to reverse fluid in fish migration. Water, 2023. Vol. 15. No. 1. P. 40. DOI: 10.3390/w15010040

21. *Stith D*. The Tesla valve – a fluidic diode. Phys. Teacher, 2019. Vol. 57. No. 3. P. 201.

DOI: 10.1119/1.5092491

22. Nguyen Q.M., Huang D., Zauderer E., Romanelli G., Meyer C.L., Ristroph L. Tesla's fluidic diode and the electronic-hydraulic analogy. Amer. J. Phys., 2021. Vol. 89. No. 3. Pp. 393. DOI: 10.1119/10.0003395

23. *Kolesov H.N., Dubinov A.E.* Custom-made tubular Tesla valves for laboratory lessons in classroom. Phys. Fluids, 2024. Vol. 36. No. 5. Pp. 051801. DOI: 10.1063/5.0203900

24. Leigh S.C., Summers A.P., Hoffmann S.L., German D.P. Shark spiral intestines may operate as Tesla valves. Proc. Royal Soc. B, 2021. Vol. 288, No. 1955. Pp. 20211359. DOI: 10.1098/rspb.2021.1359

25. *Driver R.D.* Torricelli's law – an ideal example of elementary ODE // Amer. Math. Monthly, 1998. Vol. 105. No. 5. Pp. 453.

DOI: 10.1080/00029890.1998.12004909

26. *Atkin K.* Investigating the Torricelli law using a pressure sensor with the Arduino and MakerPlot. Phys. Educ., 2018. Vol. 53. No. 6. Pp. 065001.

DOI: 10.1088/1361-6552/aad680

27. *Williams H.* Vessel drainage under the influence of gravity. Phys. Teacher, 2019. Vol. 59, No. 8. Pp. 629. DOI: 10.1119/5.0020444

28. Villermaux E., Pomeau Y. Super free fall. J. Fluid Mech., 2010. Vol. 642, No. 1. Pp. 147.

DOI: 10.1017/S0022112009992424

29. Treviño C., Peralta S., Torres A., Medina A. Super free fall of an inviscid liquid through interconnected vertical pipes. Europhys. Lett., 2015. Vol. 112. No. 1. Pp. 14002. DOI: 10.1209/0295-5075/112/ 1400

30. Plastic Valvular Conduit - Tesla valve. Available at: https://www.gyroscope.com/d.asp?product=VC1 (accessed 10.06.2024)

31. *Linkoln J.* Electric field patterns made visible with potassium permanganate. Phys. Teacher, 2017. Vol. 55, No. 2. Pp. 74. DOI: 10.1119/1.4974114

32. Dubinov A.E., Kozhayeva J.P., Lubimtseva V.A., Selemir V.D. Hydrodynamic and physicochemical phenomena in liquid droplets under the action of nanosecond spark discharges: A review. Adv. Colloid Interface Sci., 2019. Vol. 271. No. 1. Pp. 101986.

DOI: 10.1016/j.cis.2019.07.007

33. Dekhtyar V.A., Dubinov A.E. Visualization of liquids flows in microvluidics and plasma channels in nanosecond spark microdischarges by means of digital microscopy. Sci. Visualization, 2023. Vol. 15. № 1. Pp. 1. DOI: 10.26583/sv.15.1.01

34. *Pearson R.S.* Manganese color reactions. J. Chem. Educ., 1988. Vol. 65. No. 5. Pp. 451.

DOI: 10.1021/ed065p451

35. Dubinov A.E., Iskhakova D.N., Lyubimtseva V.A. An inversion of contact angle hysteresis when a liquid drop slides up on an inclined plane under the spark dis-

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ВОДЫ ИЗ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБКИ, НАГРУЖЕННОЙ НА КЛАПАН ТЕСЛА

charge action. Phys. Fluids, 2021. Vol. 33. No. 6. Pp. 061707. DOI: 10.1063/5.0055862

36. *Dubinov A.E., Dubinova I.D.* Added point-like weight increases the levitation time of the falling soft coil spring. Mech. Res. Comm., 2012. Vol. 113. No. 1. Pp. 103670.

DOI: 10.1016/j.mechrescom.2021.103670

37. *Kuhn J.*, *Vogt P.* Smartphones as mobile minilabs in physics: Edited volume featuring more than 70 examples from 10 years the physics teacher-column iPhysicsLabs. Cham, Switzerland, Springer Nature, 2022. https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-94044-7