УДК 621.311

АВТОНОМНЫЙ МАЛОМОЩНЫЙ ГЕНЕРАТОР ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ВОДЯНЫХ КАПЛЯХ

А.П. Ахмедов
канд. физ.-мат. наук, доцент, Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан, г. Ташкент
С.Б. Худойберганов
PhD, доцент, Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан, г. Ташкент
https://doi.org/10.5281/zenodo.24270184

Аннотация. Рассмотрены современные способы преобразования кинетической энергии падающих капель воды в электрическую энергию: капельные генераторы с электретным покрытием из политетрафторэтилена, генераторы на захваченном заряде, генераторы на «пробковом» течении в вертикальной трубке и супергидрофобные магнитоэлектрические генераторы. Сопоставлены их основные показатели. Предложена блок-схема автономной маломощной установки, в которой техническая (непитьевая) вода дробится на капли, падающие в вертикальных стеклянных трубках с высоты 1,5 м на плёночный преобразователь. Выполнена оценка энергии капли с учётом сопротивления воздуха: для капли объёмом 100 мкл кинетическая энергия у приёмной поверхности составляет около 1,24 мДж, а ожидаемая электрическая мощность одной трубки при частоте падения 5 капель в секунду и КПД преобразования 10 % – около 0,6 мВт. Показано, что установка целесообразна там, где вода уже обладает естественным напором, и предназначена для питания маломощных потребителей – датчиков и светодиодной индикации.

Ключевые слова: возобновляемая энергия, капля воды, кинетическая энергия, капельный генератор электроэнергии, политетрафторэтилен, магнитоэлектрический генератор, блок-схема, автономное электропитание.

Abstract. The paper reviews modern methods of converting the kinetic energy of falling water droplets into electricity: droplet-based generators with a polytetrafluoroethylene electret coating, charge-trapping generators, generators based on plug flow in a vertical tube, and superhydrophobic magnetoelectric generators. Their main characteristics are compared. A block diagram of an autonomous low-power installation is proposed, in which process (non-potable) water is broken into droplets that fall through vertical glass tubes from a height of 1.5 m onto a film transducer. The droplet energy is estimated with air drag taken into account: for a 100 μL droplet the kinetic energy at the receiving surface is about 1.24 mJ, and the expected electrical output of one tube at 5 droplets per second and a conversion efficiency of 10 % is about 0.6 mW. It is shown that the installation is reasonable where water already has a natural head and that it is intended to supply low-power consumers such as sensors and LED indication.

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

Keywords: renewable energy, water droplet, kinetic energy, droplet-based electricity generator, polytetrafluoroethylene, magnetoelectric generator, block diagram, autonomous power supply.

Введение

Доля возобновляемых источников в мировом энергобалансе непрерывно растёт. Наряду с солнечной, ветровой и крупной гидроэнергетикой развивается направление сбора рассеянной низкопотенциальной энергии окружающей среды для питания маломощной электроники – датчиков, средств сигнализации и связи. Одним из таких источников является кинетическая энергия падающих капель воды: дождя, конденсата, сбрасываемой технической воды. Эта энергия обусловлена силой тяжести, возобновляема и доступна практически повсеместно.

Классические гидрогенераторы рассчитаны на сосредоточенный поток и значительный напор, поэтому для рассеянных потоков малой массы они непригодны. В связи с этим исследуются устройства прямого преобразования энергии на границе «жидкость – твёрдое тело»: трибоэлектрические наногенераторы [1], капельные генераторы на основе контактной электризации и электростатической индукции [2], устройства на обратном электросмачивании [3]. Общий недостаток первых поколений таких устройств – малая плотность поверхностного заряда и, как следствие, низкая выходная мощность; устройствам на обратном электросмачивании, кроме того, необходим внешний источник напряжения [3, 6,10].

В последние годы предложены конструкции, в которых мгновенная мощность и КПД преобразования повышены на несколько порядков [4–9,11-13]. Цель настоящей работы – сопоставить известные технические решения, обосновать блок-схему автономной маломощной установки, работающей на водяных каплях, и оценить её ожидаемые энергетические показатели.

Методы исследования

Работа выполнена методами сравнительного анализа опубликованных экспериментальных данных [4–9] и расчётной оценки энергии капли. Потенциальная энергия капли массой m, находящейся на высоте h, равна

$$E_{\text{п}} = mgh, \qquad (1)$$

где g = 9,81 м/с^2 – ускорение свободного падения. Скорость капли у приёмной поверхности с учётом квадратичного сопротивления воздуха определяется выражением

$$v = v_{\infty}[1 - \exp(-2gh/v_{\infty}^2)]^{1/2}, \qquad (2)$$

где v_{∞} – установившаяся скорость падения капли данного размера в неподвижном воздухе, принимаемая по данным [10]. Кинетическая энергия капли в момент удара

$$E_{\text{к}} = mv^2/2. \qquad (3)$$

Средняя электрическая мощность установки оценивается по формуле

$$P = \eta E_{\text{к}} f N, \qquad (4)$$

где η – КПД преобразования механической энергии капли в электрическую; f – частота падения капель в одной трубке, с$^{-1}$; N – число параллельно работающих трубок.

Результаты и обсуждение

Анализ известных технических решений. В капельном генераторе, описанном в [4,14,15], плёнка политетрафторэтилена (ПТФЭ) нанесена на электрод из оксида индия-олова (ITO), а рядом расположен алюминиевый электрод. ПТФЭ является электретом: при многократном падении капель на его поверхности накапливается заряд, пока не наступит насыщение. Растекающаяся капля соединяет алюминиевый электрод с системой ПТФЭ/ITO, цепь замыкается, и накопленный

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

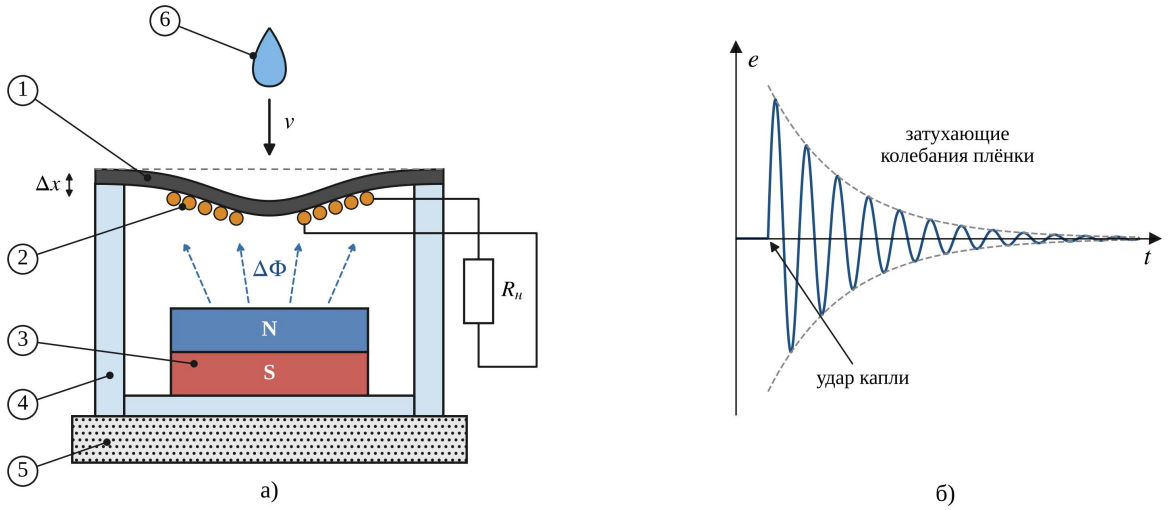
заряд переносится через нагрузку. По данным [4], капля объёмом 100 мкл, падающая с высоты 15 см, создаёт напряжение более 140 В, чего достаточно для кратковременного зажигания 100 маломощных светодиодов, а мгновенная плотность мощности достигает 50,1 Вт/м^2, что на три порядка выше, чем у аналогов без такой структуры. КПД преобразования при этом оценивается примерно в 2,2 % [6]. При высокой частоте падения капель на поверхности образуется сплошная водяная плёнка, снижающая выходную мощность; этот недостаток устраняется применением супергидрофобной поверхности, с которой капли своевременно сбрасываются [5].

В генераторе на захваченном заряде [6] фторполимерная плёнка заряжается заранее методом инжекции заряда с помощью электросмачивания, что обеспечивает плотность поверхностного заряда 1,8 мКл/м^2. Получены мгновенные токи более 2 мА, плотность мощности свыше 160 Вт/м^2 и КПД преобразования 11,8 %; заметной деградации характеристик не наблюдалось в течение 100 суток периодических испытаний.

Иной принцип использован в [7]: капли направляются в вертикальную полимерную трубку высотой 32 см, где образуется «пробковое» течение – чередование коротких столбиков воды и воздушных промежутков. При движении воды вдоль стенки заряды разделяются и снимаются электродами, установленными в верхней части трубки и в приёмной ёмкости. В электрическую энергию преобразуется более 10 % энергии падающей воды, а количество вырабатываемого электричества на пять порядков превышает получаемое при сплошной струе; такая система обеспечивала питание 12 светодиодов в течение 20 с. Этот результат важен для предлагаемой установки, поскольку показывает, что сама трубка может быть рабочим элементом преобразователя.

Магнитоэлектрические капельные генераторы [8, 9] основаны на явлении электромагнитной индукции. Супергидрофобный магнитоэлектрический генератор (MSMEG) [9] состоит из пяти частей (рис. 1, *а*): упругой супергидрофобной магнитной плёнки, закреплённой на ней катушки, постоянного магнита NdFeB, акрилового корпуса и основания из пенополистирола. При ударе капли плёнка с катушкой прогибается, а после схода капли возвращается в исходное положение; магнитный поток, пронизывающий катушку, изменяется, и в ней наводится ЭДС в виде затухающих колебаний (рис. 1, *б*). При сопротивлении нагрузки 47 Ом получены пиковый ток около 13,02 мА и пиковая плотность мощности около 1413 мВт/м^2; конденсатор 2,7 В/1 Ф заряжается до 1,18 В за 200 с [9]. В отличие от электростатических генераторов такое устройство даёт сравнительно большой ток при низком напряжении, что упрощает его согласование с низкоомной нагрузкой и накопителем.

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.



а) б)

Рис. 1. Супергидрофобный магнитоэлектрический генератор: *а* – устройство; *б* – характер изменения ЭДС катушки после удара капли; 1 – супергидрофобная магнитная плёнка; 2 – катушка; 3 – магнит NdFeB; 4 – акриловый корпус; 5 – основание из пенополистирола; 6 – капля воды (составлено авторами по данным [9])

Основные показатели рассмотренных генераторов сведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение капельных генераторов электроэнергии

Тип генератора	Принцип действия	Основные показатели
Капельный с покрытием ПТФЭ (DEG)	Накопление заряда на электрете, замыкание цепи каплей	Более 140 В от капли 100 мкл с высоты 15 см; 50,1 Вт/м^2; КПД около 2,2 %
На захваченном заряде (CTEG)	Предварительно заряженная фторполимерная плёнка	Ток более 2 мА; свыше 160 Вт/м^2; КПД 11,8 %; стабильность 100 суток
На «пробковом» течении	Разделение зарядов при движении столбиков воды в трубке	КПД более 10 %; питание 12 светодиодов в течение 20 с
Магнитоэлектрический (MSMEG)	Электромагнитная индукция при колебаниях плёнки с катушкой	13,02 мА; 1413 мВт/м^2 при 47 Ом; заряд конденсатора 1 Ф до 1,18 В за 200 с

Из табл. 1 следует, что современные преобразователи позволяют использовать порядка 10 % механической энергии капли. Это значение принято далее в качестве расчётного.

Предлагаемая установка. Для непрерывной выработки электроэнергии независимо от погодных условий предлагается установка, в которой поток капель создаётся искусственно из технической (непитьевой) воды. Блок-схема установки приведена на рис. 2.

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

Вода из резервуара 1 поступает в источник водяных капель 2 – каплеобразователь с калиброванными отверстиями, который формирует капли заданного объёма с заданной частотой. Капли падают внутри вертикальных стеклянных трубок 3 высотой 1,5 м. Трубка защищает каплю от бокового ветра и точно направляет её на приёмную поверхность – специальную плёнку 4, расположенную на дне трубки большего диаметра. Плёнка является рабочим элементом преобразователя механической энергии в электрическую 5, который может быть выполнен в двух вариантах: электростатическом – с электретной плёнкой ПТФЭ и парой электродов [4, 6] – либо магнитоэлектрическом – с упругой супергидрофобной магнитной плёнкой и катушкой над постоянным магнитом [9] (см. рис. 1). Импульсы тока выпрямляются и накапливаются в блоке 6 (конденсатор или ионистор), от которого питается нагрузка 7. Отработанная вода стекает в сборник 8 и далее используется по своему назначению. Для увеличения мощности трубки объединяются в параллельно работающие модули.

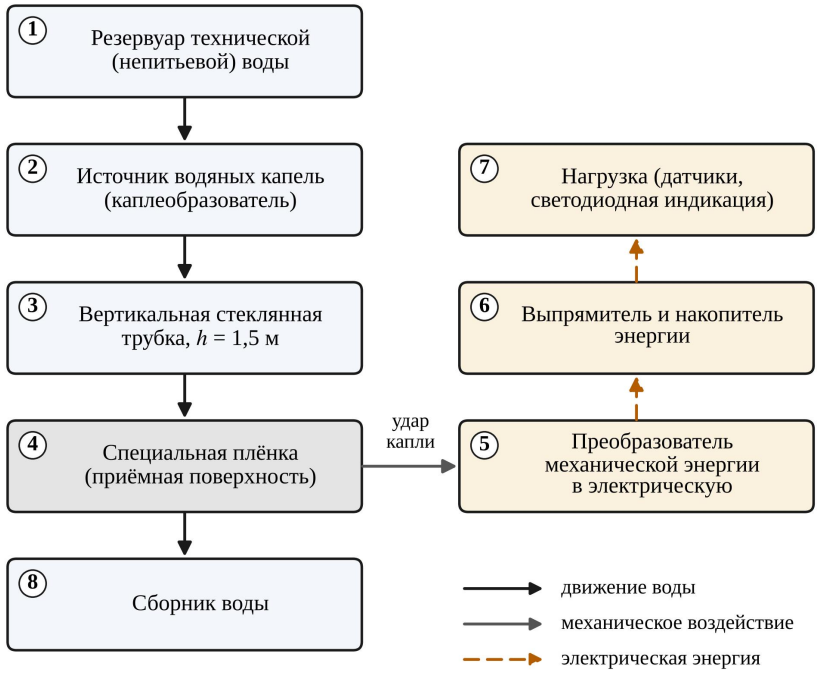


Рис. 2. Блок-схема автономной маломощной установки для выработки электроэнергии на водяных каплях

Оценка энергетических показателей. Результаты расчёта по формулам (1)–(4) для высоты падения h = 1,5 м, КПД преобразования η = 10 % и частоты падения f = 5 $с^{-1}$ приведены в табл. 2, где V и d – объём и эквивалентный диаметр капли, P – мощность одной трубки.

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

Таблица 2

Расчётные показатели одной трубки при h = 1,5 м

V, мкл	d, мм	v_∞, м/с [10]	$E_п$, мДж	v, м/с	$E_к$, мДж	$\eta E_к$, мДж	P, мВт
30	3,86	8,80	0,44	4,95	0,37	0,037	0,18
50	4,57	9,00	0,74	4,97	0,62	0,062	0,31
100	5,76	9,17	1,47	4,98	1,24	0,124	0,62

Для капли объёмом 100 мкл потенциальная энергия составляет 1,47 мДж, скорость у приёмной поверхности – 4,98 м/с, кинетическая энергия – 1,24 мДж; таким образом, на преодоление сопротивления воздуха расходуется около 16 % энергии. При η = 10 % от одной капли можно получить примерно 0,12 мДж электрической энергии, а средняя мощность одной трубки при пяти каплях в секунду составит около 0,62 мВт при расходе воды 0,5 мл/с (1,8 л/ч). Модуль из 100 трубок обеспечит порядка 62 мВт при расходе 180 л/ч. Такой мощности достаточно для питания беспроводных датчиков, устройств сигнализации и светодиодной индикации с накоплением энергии в конденсаторе.

Следует подчеркнуть, что энергия, получаемая от капли, не может превышать её потенциальной энергии (1). Если воду поднимать на высоту h насосом, затраты энергии заведомо превысят выработку, поэтому замкнутый контур с насосной подачей пригоден только как лабораторный стенд для исследования преобразователей. Практическое применение установки оправдано там, где вода уже обладает естественным напором: при отводе дождевых стоков с кровли, сбросе технической воды и конденсата, переливе из резервуаров.

Принятое значение КПД заимствовано из работ [6, 7] и для предлагаемой конструкции должно быть подтверждено экспериментально; изготовление макета и измерение его характеристик составляют задачу следующего этапа исследований.

Заключение

1. Современные капельные генераторы – электростатические с электретным покрытием, на «пробковом» течении и магнитоэлектрические – позволяют преобразовывать в электрическую энергию порядка 10 % механической энергии падающей капли.

2. Предложена блок-схема автономной маломощной установки, включающей резервуар технической воды, каплеобразователь, вертикальные стеклянные трубки высотой 1,5 м, плёночный преобразователь, выпрямитель с накопителем и нагрузку.

3. Расчёт с учётом сопротивления воздуха показал, что кинетическая энергия капли объёмом 100 мкл у приёмной поверхности равна 1,24 мДж; ожидаемая мощность одной трубки при пяти каплях в секунду и КПД 10 % составляет около 0,6 мВт, модуля из 100 трубок – около 60 мВт.

4. Установка целесообразна при наличии естественного напора воды и предназначена для питания маломощных автономных потребителей.

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

Литература

1. Wang Z.L. Triboelectric nanogenerators as new energy technology for self-powered systems and as active mechanical and chemical sensors // ACS Nano. – 2013. – Vol. 7, No. 11. – P. 9533–9557.
2. Lin Z.-H., Cheng G., Lee S., Pradel K.C., Wang Z.L. Harvesting water drop energy by a sequential contact-electrification and electrostatic-induction process // Advanced Materials. – 2014. – Vol. 26, No. 27. – P. 4690–4696.
3. Krupenkin T., Taylor J.A. Reverse electrowetting as a new approach to high-power energy harvesting // Nature Communications. – 2011. – Vol. 2. – Art. 448.
4. Xu W., Zheng H., Liu Y. et al. A droplet-based electricity generator with high instantaneous power density // Nature. – 2020. – Vol. 578. – P. 392–396. – DOI: 10.1038/s41586-020-1985-6.
5. Wang L., Song Y., Xu W. et al. Harvesting energy from high-frequency impinging water droplets by a droplet-based electricity generator // EcoMat. – 2021. – Vol. 3, No. 4. – Art. e12116. – DOI: 10.1002/eom2.12116.
6. Wu H., Mendel N., van der Ham S., Shui L., Zhou G., Mugele F. Charge trapping-based electricity generator (CTEG): an ultrarobust and high efficiency nanogenerator for energy harvesting from water droplets // Advanced Materials. – 2020. – Vol. 32, No. 33. – Art. 2001699. – DOI: 10.1002/adma.202001699.
7. Ao C.K., Sun Y., Tan Y.J.N. et al. Plug flow: generating renewable electricity with water from nature by breaking the limit of Debye length // ACS Central Science. – 2025. – DOI: 10.1021/acscentsci.4c02110.
8. Ma Z., Ai J., Shi Y., Wang K., Su B. A superhydrophobic droplet-based magnetoelectric hybrid system to generate electricity and collect water simultaneously // Advanced Materials. – 2020. – Vol. 32, No. 50. – Art. 2006839. – DOI: 10.1002/adma.202006839.
9. Elastic droplet-based magnetoelectric generator for high-performance energy collection // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2024. – Vol. 16, No. 26. – P. 33494–33503.
10. Gunn R., Kinzer G.D. The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air // Journal of Meteorology. – 1949. – Vol. 6, No. 4. – P. 243–248.
11. Akhmedov AP, Khudoyberganov SB Generation of electricity with the help of wind and solar on the route of Tashkent overground metro trains. (2024) International Conference on Thermal Engineering, 1(1). https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85199166478&partnerID=40&md5=c545973449e66f14166b44089f170b20
12. Каюмов С.Н., Ахмедов А.П., Худойберганов С.Б. Развитие инновационой энергоэкономической технологии изготовления асинхронных двигателей. – Минск: БНТУ, 2026.
13. Ахмедов А.П., Худойберганов С.Б., Юркевич Н.П. Оптимизация накопления и использования электрической энергии от пьезоэлектрических элементов в дорожных покрытиях с применением интеллектуальных систем управления. – Минск: БНТУ, 2025.
14. Akhmedov A.P., Khudoyberganov S.B. Generation of electricity with the help of wind and solar on the route of Tashkent overground metro trains // International Conference on Thermal Engineering. – 2024. – Vol. 1, No. 1.

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.