

влияет как состав жидкости, так и ее объем. Наличие жидкости в объеме, обеспечивающем граничное трение, приводит к более быстрому затуханию маятника, чем на сухой поверхности.

#### Литература

1. Попов, В. Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений / В. Л. Попов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 352 с.

2. Mekid, S. A non-linear model for pre-rolling friction force in precision positioning / S. Mekid // Proc. Instn Mech. Engrs Part J: J. Engineering Tribology. – Vol. 218 – P. 305–311.

3. Савенко, В. И. Применение маятникового метода для анализа механизмов поглощения энергии при качении / В. И. Савенко [и др.] // Трение и износ. – 1988. – Т. 9, № 2. – С. 212–222.

4. Джиладари, И. З. Методика и средство измерения малых коэффициентов сопротивления качению маятниковым методом / И. З. Джиладари, Н. Н. Ризноокая // Метрология и приборостроение. – 2010. – № 4. – С. 13–17.

5. Gilavdary, I. A new theory on pure pre-rolling resistance through pendulum oscillations / I. Gilavdary, S. Mekid, N. Riznookaya // Proc IMechE Part J: Journal of Engineering /tribology. – 2013. – Vol. 227, № 6 – P. 618–628.

УДК 681.2.084

### ТРИБОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ: ОТ ШКОЛЬНЫХ ОПЫТОВ ПО ФИЗИКЕ ДО НОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ Савич В.В.

*Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** В работе приводится обзор достижений в области использования трибоэлектрического эффекта.

**Ключевые слова:** трение, трибоэлектричество, достижения/

### TRIBOELECTRIC EFFECT: FROM SCHOOL EXPERIENCES IN PHYSICS TO NEW ENERGY SOURCES Savich V.

*The State Scientific Institution "Powder Metallurgy Institute"  
Minsk, Belarus*

**Abstract.** The paper provides an overview of the achievements in the field of using the triboelectric effect.

**Key words:** friction, triboelectricity, achievements.

*Адрес для переписки: В.В. Савич, ул. Платонова, 41, Минск 220005, Республика Беларусь  
e-mail: savich.vadim@gmail.com*

Трибоэлектрический эффект известен со времен изучения физики в средней школе: при трении двух разнородных материалов или веществ (например, с разной плотностью) между ними происходит разделение зарядов [1]. Еще один пример проявления данного эффекта – электрофорная машина – электростатический генератор для демонстрации высоковольтного (до десятков кВ) разряда. Считается, что трибоэлектрический эффект вызван адгезией двух материалов, состоящих из разных молекул. Хотя адгезия не является химической связью между атомами, происходит обмен электронами между различными молекулами, который приводит к электростатическому притяжению между ними. Физическое разделение материалов приводит к трению. Поскольку перенос электронов между молекулами в различных материалах не является немедленно обратимым, избыточные электроны в одном типе молекул остаются позади, в то время как дефицит электронов возникает в другом. Таким образом, в материале может образовываться положительный или отрицательный заряд, который рассеивается после разделения материалов [2].

Механизмы трибоэлектрификации (или контактной электризации) обсуждались много лет, включая перенос электронов, перенос ионов или перенос частиц материала. Недавние исследования 2018 года с использованием зондовой микроскопии Кельвина и трибоэлектрических наногенераторов показали, что перенос электронов является доминирующим механизмом трибоэлектрификации между твердым телом и твердым телом. Модель работы выхода может быть использована для объяснения переноса электронов между металлом и диэлектриком. Модель поверхностных состояний может быть использована для объяснения переноса электрона между двумя диэлектриками. Для общего случая, поскольку трибоэлектризация происходит для любого материала, Ванга предложил общую модель, в которой перенос электрона вызывается сильным перекрытием электронного облака между двумя атомами для пониженного межатомного потенциального барьера за счет сокращения длины связи. На основе модели исследовано влияние температуры и фотовозбуждения на трибоэлектрификацию. Такую модель можно распространить на

пары «жидкость – твердое тело», «жидкость – жидкость» и «газ – жидкость» [2].

До недавнего времени проявления трибоэлектрического эффекта и связанные с ним электрические разряды являлись серьезными техническими проблемами XX и XXI столетий, поскольку производство боеприпасов и взрывчатых веществ, нефтехимические и фармацевтические предприятия, типографии, производство дисперсных пищевых продуктов – от муки до сахара – это те отрасли промышленности, где борьба со статическим электричеством имеет определяющее значение для их безопасности. Статическое электричество и электростатический разряд – враг всех полупроводниковых приборов [3].

К середине 20-х годов XXI века исследователи из Georgia Tech (США) – руководитель проф. Zhong Lin Wang, обернули трибоэлектрический эффект из вреда в пользу и построили прототип простого устройства, преобразующего старто-стопное движение в энергию [4]. Морские волны, ходьба, танцы, капли дождя могут быть использованы для управления датчиками, мобильными гаджетами и даже стать генераторами энергии.

Прототип трибогенератора, назначение которого в демонстрации потенциальных возможностей сбора энергии при трении, представляет собой диск диаметром около 10 сантиметров. Внутри находятся два вращающихся листа материала в форме круга, один донор электронов, другой их приемник. При вращении между ними образуется электрический заряд, так как листы изолированы друг от друга. Третий диск с электродами расположен между двумя первыми. Он «снимает» заряд и обеспечивает небольшой электрический ток через полезную нагрузку [5]. Мощность устройства при максимальной скорости вращения 3000 оборотов в минуту составляет 1,5 Вт. Энергоэффективность прототипа составляет 24 %, что сравнимо с показателями магнитно-индукционных турбин и в три раза выше эффективности пьезокристаллов, ранее считавшихся лучшими сборщиками механической энергии и ее преобразования в электрическую.

Исследователи из Georgia Tech предложили использовать разработанный ими трибогенератор для самозапитывающегося микрофона, для акустического определения положения тела, для акустических весов.

Схема разработанного устройства представлена ниже (рис. 1) [6]. Она мало чем отличается от традиционного микрофона, с той лишь разницей, что вместо электромагнитных эффектов, таких как изменение индукции или емкости конденсатора, измеряемой характеристикой является, как и случае с трибогенератором, ток.

Микрофон имеет такую диаграмму направленности, что на его основе создан детектор по-

ложения источника звука, причем самозапитывающийся.

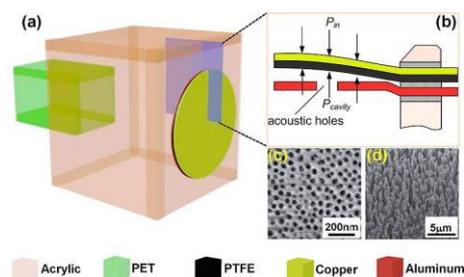


Рисунок 1 – Схема устройства самозапитывающегося микрофона и детектора акустических волн (PET – полиэтилентерефталат, PTFE – политетрафторэтилен)

Подобного рода самозапитывающаяся мембрана может быть использована для взвешивания предметов посредством звука. Удалось добиться чувствительности 270 мВ/мг, взвешивая массы от 40 мг до 400 мг. Такие весы могут найти свое применение в ювелирной промышленности из-за крайне низкой цены и высокой чувствительности.

Специалисты под руководством проф. Zhong Lin Wang разработали схему трибоэлектрического генератора с возвратно-поступательным движением коаксиальных трубчатых элементов (рис. 2) [7].

Здесь электрический заряд накапливается при перемещении двух полимерных пленок с медными контактами друг относительно друга. И хотя максимальная выходная мощность составляет всего 10-12 мВт (1.36 Вт/м<sup>2</sup>) при токе около 300 мкА и при скорости движения 1 м/с для созданного устройства, потенциально оно может быть использовано для питания навигационных маяков, а также для подпитки встроенного кардиометра или трекера [7].

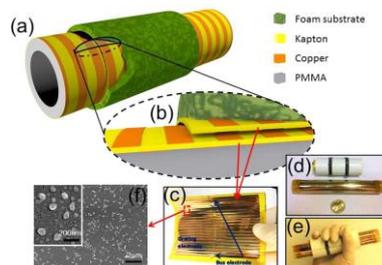


Рисунок 2 – Схема трибоэлектрического генератора (a, b). Полимерная пленка (каптон) с медными контактами в собранном и разобранном состоянии (c–e)

Разработана модель генератора электроэнергии от капель дождя (рис. 3, 4) [8]. Использовалась более сложная двухконтурная система, которая позволяет конвертировать не только электростатическую электроэнергию от перекачивания капель, но и получать энергию от ударного взаимодействия капель с поверхностью.

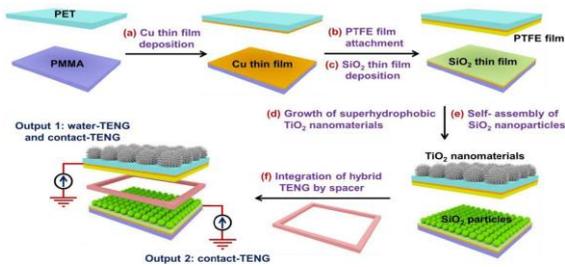


Рисунок 3 – Общая схема двухконтурного трибоэлектрического генератора: первый контур – наночастицы диоксида титана, обеспечивающие несмачиваемость поверхности и скатывание капель дождя, второй контур – наночастицы диоксида кремния, соприкасающиеся с тефлоновой пленкой при ударе падающей капли

Капля, попадая на наклонную поверхность такого генератора, несет с собой некоторый заряд (допустим положительный), а в процессе перекапывания по поверхности электризует полимерную пленку (соответственно, отрицательно), а медный электрод лишь «собирает» этот избыточный отрицательный заряд. Второй же контур работает на принципе описанном несколько раз выше: наночастицы диоксида кремния при ударе соприкасаются с тефлоновой пленкой, создавая разность потенциалов и электризуясь. Подробности работы двух контуров по отдельности в схематическом виде представлены ниже:

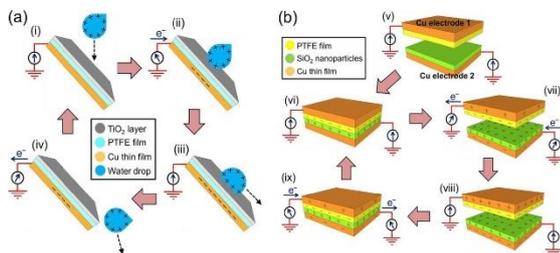


Рисунок 4 – Работа двух контуров по отдельности

В конечном счете, первый контур дает мощность около  $1,3 \text{ Вт/м}^2$ , тогда как контур, утилизирующий механическую энергию падения капли позволяет дополнительно получить до  $0,3\text{--}0,4 \text{ Вт/м}^2$ . К тому же, на основе таких систем могут быть созданы самозапитывающиеся сенсоры различных молекул. В частности, в [8] приведен пример с этанольным сенсором, позволяющим определять доли процента данного соединения.

Ученые создали ткань (рис. 5) на основе обычных хлопчатобумажных нитей, которая позволяет вырабатывать электричество за счет сокращений мышц при ходьбе, например, или простого похлопывания [9].

В данном случае хлопчатобумажные волокна сначала покрываются углеродными нанотрубками, а затем часть из них дополнительно тефлоном. Далее пары таких волокон вплетаются в обычную ткань и могут работать, как генератор

трибоэлектричества за счет перемещения и трения волокон друг о друга.

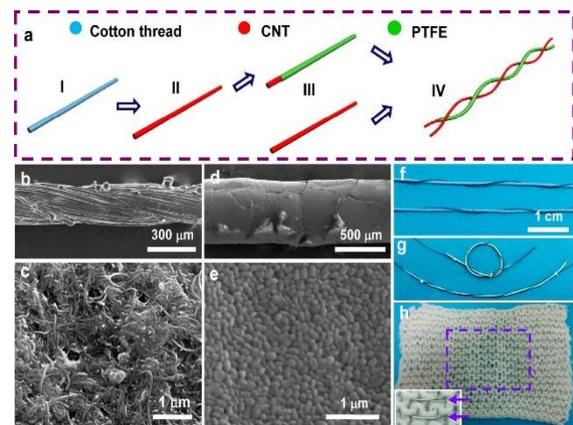


Рисунок 5 – Ткань, позволяющая вырабатывать электроэнергию: специальные волокна вплетаются в обычное хлопчатобумажное

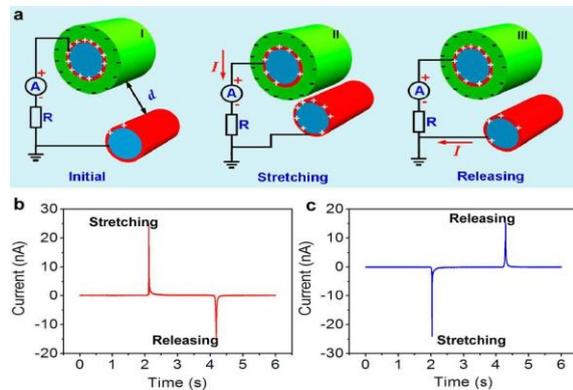


Рисунок 6 – Электрический принцип работы двух волокон для получения трибоэлектричества

Удельная мощность таких устройств не так велика, как хотелось бы, равно как и накапливаемый заряд – всего несколько нКл за полминуты, однако, этого хватает, чтобы оживить монохромный дисплей простым движением пальца или же, такого малого количества электроэнергии вполне может хватить для какого-нибудь сенсора, встроенного в одежду, например, термометра, для активации которого достаточно лишь похлопать по месту расположения трибогенератора [9].

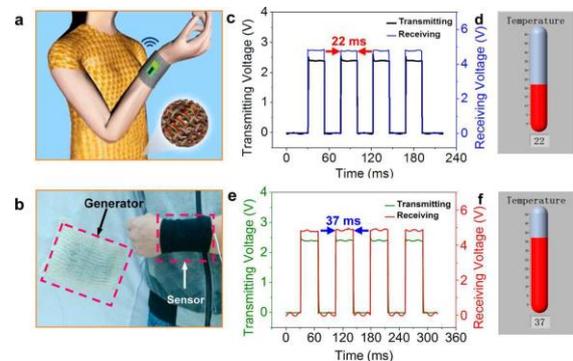


Рисунок 7 – Носимый самозапитывающийся термометр

Компания Sumitomo (Япония) представила разработанную совместно с Кансайским университетом технологию выработки электроэнергии, основанную на вращении специального устройства для генерации статического электричества, прикрепленного к внутренней части шины [10]. В основе технологии лежит трибоэлектрический эффект, говорит технический специалист Shina Guide, позволяющий устройству для выработки электроэнергии эффективно генерировать энергию каждый раз, когда шина деформируется при вращении (рис. 8).

Производитель шин заявляет, что эта технология имеет большой потенциал для практического применения. Ее можно использовать в качестве источника питания для различных автомобильных цифровых систем.

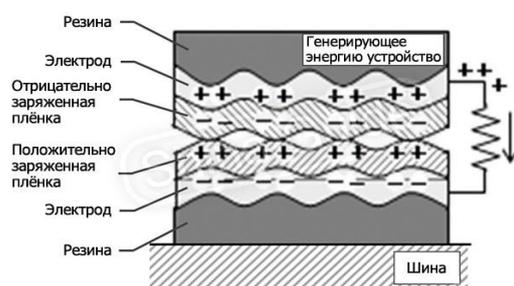


Рисунок 8 – Фрикционная зарядка с использованием деформации шины при вращении

#### Литература

1. Тюкин, А. В. Электрические и триботехнические свойства и трибоэлектрические эффекты при

трении композиционного материала на основе политетрафторэтилена // Автореф. дис. канд. техн. наук. – Омск: ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет», 2011. – 19 с.

2. Трибоэлектрический эффект [Электронный ресурс]. – Режим доступа: // [https://tftwiki.ru/wiki/Triboelectric\\_effect](https://tftwiki.ru/wiki/Triboelectric_effect).

3. Основы электростатического разряда [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://prodiod.com/blog/osnovyi-elektrostaticheskogo-razryada.html>.

4. Трибоэлектричество – еще один источник энергии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://integral-russia.ru/2016/08/09/triboelektrichestvo-eshhe-odin-istochnik-energii>.

5. Wang Z. L. Progress in triboelectric nanogenerators as new energy technology and self-powered sensors / Z. L. Wang, J. Chen, L. Lin // *Energy & Environmental Sci.* 8, 2015. – P. 2250–2282.

6. Triboelectrification-Based Organic Film Nanogenerator for Acoustic Energy Harvesting and Self-Powered Active Acoustic Sensing / J. Yang [et al.] // *ACS Nano.* – 2014. – Vol. 8, № 3. – P. 2649–2657.

7. Case-Encapsulated Triboelectric Nanogenerator for Harvesting Energy from Reciprocating Sliding Motion / Q. Jing [et al.] // *ACS Nano.* – 2014. – Vol. 8, № 4. – P. 3836–3842.

8. Dual-Mode Triboelectric Nanogenerator for Harvesting Water Energy and as a Self-Powered Ethanol Nanosensor / Zong-Hong Lin [et al.] // *ACS Nano.* – 2014. – Vol. 8, № 6. – P. 6440–6448.

9. Fiber-Based Generator for Wearable Electronics and Mobile Medication / J. Zhong [et al.] // *ACS Nano.* – 2014. – Vol. 8, no. 6. – P. 6273–6280.

10. B. Sumitomo придумали как использовать энергию шин для электроники автомобиля [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://shina.guide/press/20264>.

УДК 614.7.628.58

### РЕЦИРКУЛЯТОР ВОЗДУХА ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ УЧРЕЖДЕНИЙ

Савченко А.Л., Мальцев Д.В., Муминбоев А., Скурковина Л.Е.

*Белорусский национальный технический университет*

*Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Объектом исследования являются технические средства, предназначенные для обеззараживания воздуха в процессе его принудительной циркуляции. Цель разработки – анализ технических средств и разработка новой конструкции для обеззараживания воздуха в помещениях различного типа. В процессе выполнения работы проводилось накопление и применение теоретических сведений о способах обеззараживания воздуха в медицинских учреждениях. В результате была разработана конструкция бактерицидного рециркулятора. Использование устройства обеспечивает постоянную рециркуляцию воздуха через закрытый корпус.

**Ключевые слова:** рециркулятор воздуха, ультрафиолетовое облучение, подогрев воздуха, дистанционное управление.