

Высоковольтный наногенератор на основе электризации потока диэлектрической жидкости через стеклянный фильтр

И. В. Кожевников, *М. К. Болога, Ф. П. Гросу, И. М. Черника, А. А. Поликарпов

Институт прикладной физики,
г. Кишинев, MD-2028, Молдова, *e-mail: mbologa@phys.asm.md

Поступила в редакцию 31.03.2020

После доработки 10.06.2020

Принята к публикации 12.06.2020

Описаны и анализируются механизмы электризации различных твердых веществ при их контакте или трении, взаимодействии жидких сред с проводящими и диэлектрическими материалами. Рассмотрены наногенераторы и их выходные характеристики, разработанные на основе использования явления электризации твердых тел и жидкостей. Приводятся конструкция и результаты исследования электростатического наногенератора, основанного на электризации стеклянной пористой структуры при прохождении через нее диэлектрической жидкости.

Ключевые слова: электризация, пористая структура, фильтр Шотта, наногенератор, полиэтилсилоксановая жидкость, поток, напряжение, плотность, ток, потенциал, время, генератор, электропроводность

УДК 532.54:541.13

DOI: 10.5281/zenodo.4045941

ВВЕДЕНИЕ

С развитием нанотехнологий и микроэлектронной техники, в частности при разработке автономных датчиков, имплантированной и портативной электроники, мобильных телефонов, ноутбуков, автоматических систем безопасности возникает необходимость создания источников электрического питания весьма небольших мощностей (мВт). Это потребовало использование доступных и дешевых резервуаров первичной энергии, практически, неисчерпаемой по длительности эксплуатации. В роли подобного резервуара может выступить энергия механического взаимодействия окружающих нас макротел (необязательно твердых): при их механическом контакте, трении, соударении, деформации и т.д. Такие устройства преобразующие механическую энергию окружающей среды в электрическую получили название наногенераторов (в виду малости преобразуемых энергий), основанных в большинстве случаев на явлении электризации.

СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ЯВЛЕНИИ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ И НАНОГЕНЕРАТОРАХ, РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ НА ЕГО ОСНОВЕ

Явления электризации и разряды в виде молний, возникновение искр при трении или ударе одного тела о другое, общеизвестны, а с

ускоренным развитием техники, освоением новых материалов появилось множество эффектов, связанных с электризацией: зарядка движущихся автомобилей, самолетов, технологических лент, в том числе при производстве электронного оборудования, трубопроводов газа и нефтепродуктов, изделий из синтетических материалов: полиэтилена, капрона, нейлона и других полимеров. В процессе электризации возникают некомпенсированные электрические заряды в первоначально электронейтральных средах и телах. При трении или контакте между твердыми материалами электризация объясняется переходом зарядов (электронов, ионов) от одного тела к другому [1], которые накапливаются на поверхностях их соприкосновения, формируя двойной электрический слой. Это происходит в результате наличия разности энергетических уровней, взаимодействующих тел, например, разности работ выхода электронов, а также их температур или концентраций носителей электрического заряда и т.д. Перезарядка между двумя металлами происходит в результате перехода электронов, а в случае контакта металл-диэлектрик, разделение зарядов – следствие переноса как электронов, так и ионов. Электризация также может происходить за счет перехода крошечного количества поверхностного материала от одного вещества к другому [1]. Для контакта между двумя изоляторами, содержащие полярные группы, перенос

материала, является единственным или преобладающим механизмом электризации. Если в материале есть подвижные ионы, их перенос предпочтительнее, чем электронов. Наиболее интенсивно электризуются полимеры в результате взаимодействия между собой или с металлами. Это свойство полимеров используется при создании трибоэлектрических наногенераторов [2–5]. На основе применения контактной энергии электризации полимерной пленки и металлической фольги создан наногенератор, выходное напряжение и плотность тока, которого достигли 230 В и 15,5 мА/см² [2]. Продемонстрирована эффективность преобразования энергии на уровне 10–39%, способность наногенератора обеспечить мгновенную работу светодиодов, а также зарядку литий-ионной батареи, что свидетельствует о перспективе прикладных аспектов наногенераторов.

Исследован процесс разделения зарядов при относительном скольжении двух контактирующих поверхностей в виде пленок – полиамидной (нейлоновой) и политетрафторэтиленовой с поверхностным травлением нанопроволок [3]. Генерируемое трибоэлектрическим наногенератором (TENG) напряжение разомкнутой цепи составило 1300 В, а плотность тока короткого замыкания 4,1 мА/м². Эти параметры достаточны для мгновенного питания сотни последовательно соединенных светодиодов. Наногенератор WDSE-TENG [4] основан на воздействии и разрушении водной волны на гидрофобном диэлектрическом материале (силиконовой резине, политетрафторэтилене и др.). При этом получено напряжение от 1 до 7,3 В и ток, в зависимости от устройства наногенератора, до 5 мкА. Достаточно обширный материал по наногенераторам, основанных на пьезоэлектрических, трибоэлектрических, пироэлектрических и термоэлектрических эффектах, представлен в работе [5]. Из проведенного анализа, сделан вывод о том, что трибоэлектрические наногенераторы способны производить более высокое напряжение, до 1760 В, при плотности тока короткого замыкания до 240 мА/м² и поверхностной плотности мощности до 120 Вт/м². Достигнут определенный прогресс в производстве электрической энергии из энергии окружающей среды с помощью электронно-активных материалов. Однако, основной проблемой для всех наногенераторов является недостаточность выходных параметров, их стабильность и длительность срока службы, необходимые для автономного питания датчиков различного назначения, в том числе, портативных электронных устройств.

Другой возможностью производства электроэнергии может стать энергия текучих сред, движение которых вдоль твердой поверхности, в определенных условиях может сопровождаться интенсивной электризацией. Так, на границе раздела жидкой и твердой фаз за счет электрокинетических явлений образуется электрический слой (известный как слой Гельмгольца) настолько малой толщины, что на нее поток жидкости влиять не может. А в примыкающей к слою области жидкости группируются ионы противоположного знака (скрепленные на поверхности твердого материала), формирующие размытый второй слой, известный, как слой Гуи, толщина которого (в случае диэлектрической жидкости) может достигать десятков микрон. При движении жидкости по трубе (каналу), происходит разрушение этого слоя, заряды одного знака остаются на стенке трубы (канала), а противоположного знака, находящиеся в объеме жидкости, увлекаются потоком, приобретая электрический заряд. Одновременно электризуется стенка трубы из-за нарушения баланса зарядов между жидкостью и поверхностью твердого материала. Интенсивность электризации твердого материала, омываемого жидкостью, зависит от ее удельного сопротивления, диэлектрической проницаемости, вязкости, скорости движения, площади поверхности, продолжительности контакта с твердой поверхностью, материала и шероховатости трубопровода [6–18].

Известны результаты исследования влияния качества воды и ее расхода на электризацию металлической трубы [6]. При использовании деионизированной воды ток, наведенный на поверхности трубы увеличивается, а напряжение уменьшается с ростом скорости потока. В случае городской воды напряжение, генерируемое на трубе меньше, но также увеличивается с ростом скорости потока. Однако, максимальные напряжения в обоих случаях по значению близки. Расход воды варьировался от 0,15 до 4,5 л/мин, генерируемое напряжение не превышало 0,4 В при токе 2,5 нА. На основе полученных данных, применительно к одному из возможных практических использований (борьбе с коррозией), была предпринята попытка уменьшения электрического заряда на металлической трубе [6], соответственно коррозии, за счет размещения перпендикулярно оси внутри трубы металлической ловушки, которая улавливала заряд в потоке воды и передавала трубе, для нейтрализации такого же количества заряда. Исследование влияния площади и времени контакта при прохождении диэлектрического гидравлического масла по металлической трубе

показало [7], что заряд жидкости находится в нелинейной зависимости от площади и времени контакта. С линейным увеличением длины и диаметра трубы, экспоненциально убывает заряд жидкости.

Тщательно изучена генерация электростатического заряда с течением времени при протекании углеводородов по металлической трубе [8]. Исследовано явление электризации в минеральных и силиконовых маслах (ньютоновские жидкости) и в растворе полимера Polyox в воде различной концентрации (неньютоновские жидкости), с различной электропроводностью σ и вязкостью ν , протекающих по металлической трубе различного диаметра. В случае минерального и силиконового масел (неполного развитого электрического двойного слоя на выходе из трубы) электрический ток потока выражается в виде функции средней скорости жидкости, электропроводности и объемного заряда у стенки трубы. Двойной слой полностью развит в случае неньютоновских жидкостей. Для всех жидкостей ток потока увеличивается с электропроводностью (в исследованном диапазоне) и кинематической вязкостью. Эффективная константа скорости электрохимической реакции K на границе металл-жидкость уменьшается с увеличением электропроводности ньютоновских жидкостей и вязкости минерального масла; наклон K остается постоянным при разных вязкостях силиконового масла. Ток возрастает с увеличением сдвигового напряжения, оказываемого движением жидкости на стенку трубы. Максимальный ток через минеральное масло составил 350 пА при скорости 7 м/с, $\sigma = 12,9 \times 10^{-12} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$; в силиконовом масле – 140 пА при скорости 4 м/с, $\sigma = 7,4 \times 10^{-12} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$; 5% растворе Polyox в воде – 440 пА, при скорости 0,2 м/с, $\sigma = 8,05 \times 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$.

Рассмотрено также влияние напряжения сдвига стенки на ионные обмены на границе раздела диэлектрическая жидкость – твердый материал, которая контролирует плотность тока стенки [9]. На основе анализа, проведенных экспериментов, получены аналитические зависимости: плотности тока на стенке канала (в случае канала прямоугольного сечения, выполненного из прессованного картона) от K , длины канала, скорости потока, и коэффициента K от числа Рейнольдса Re . Установлено, что линейная зависимость K от Re (параметра, связанного с напряжением сдвига) хорошо согласуется с данными, рассчитанными из эксперимента. Для трибоэлектризации потока воды в изоляционной трубе разработана теоретическая модель, на основе RC-контура, показы-

вающая связь между зарядом и гидромеханическими параметрами системы [10]. В разных демонстрационных установках, при использовании труб диаметром в 1 мм и скорости потока воды 45 см³/с, электрическое напряжение между стенкой труб и водосборником не превышало 300 мВ.

Результаты экспериментов по моделированию электростатической зарядки минеральных масел и природных эфиров (подсолнечного и рапсового масел) в трансформаторе [11], проведенных при принудительной прокачке масел, создаваемой вращающимся круглым диском из закаленной бумаги, показали, что увеличение скорости вращения диска, эквивалентное увеличению интенсивности трения, приводит к возрастанию электрического заряда, генерируемого на границе раздела твердой фазы и жидкости, к разрядам, вызывающим частичное повреждение твердой изоляции и даже всей системы изоляции трансформатора. Сделан вывод, что по электроизоляционным свойствам природные эфиры не уступают минеральному маслу и могут быть использованы в трансформаторах.

Сопоставление явлений электризации потока, в случае проводящих и диэлектрических жидкостей, протекающих через стеклянную трубку $\varnothing 32$ мкм, проведено с водой и гептаном [12]. Показано, что интенсивность электризации потока зависит, главным образом, от плотности объемного заряда у стенки трубки и электропроводности жидкости. Конвективная пространственная плотность заряда с увеличением электропроводности воды убывает, а для гептана – возрастает. При этом потоковый ток возрастает прямо пропорционально скорости (от 0,04 до 0,14 м/с) в случае воды, а в гептане при скорости потока 0,08 м/с наблюдается постепенное достижение постоянного значения. Объемная плотность заряда на стенке трубки в обоих случаях возрастает с электропроводностью воды и гептана.

Разработан трибоэлектрический наногенератор [13], в котором титановая сетка собирает электрическую энергию, возникающую при контакте потока деионизированной воды через полипропиленовый канал и нанопроволочек из политетрафтор-этилена. При этом пиковое напряжение и тока составили 9,4 В и 5,1 мкА. Несколько лучшие результаты получены в U -образном трибоэлектрическом наногенераторе, основанном на контактной трибоэлектризации диэлектрической трубки и воды с использованием закона Паскаля [14]. Сбор заряда производился на определенном участке в одном из колен U -образной трубки, заполненной водой. Периодическое движение столба жидкости из

одного колена в другое осуществлялось давлением (воздушным потоком от внешнего источника), через патрубок одного из колен, при этом генерировалось устойчивое пиковое выходное напряжение около 20 В и тока 400 нА. Очень похожим по принципу действия является U -образный наногенератор, приведенный в работе [15]. Сбор электрических зарядов, генерируемых за счет движения жидкости в трубке из фторированного этиленпропилена, производился в обоих коленах. Периодическое движение жидкости из одного колена в другое осуществлялось встряхиванием, аналогичным движению математического маятника.

При использовании жидкостей с разными электрофизическими свойствами результаты эксперимента с чистой водой оказались наилучшими: напряжение холостого хода $V_x = 81,7$ В, ток короткого замыкания $I_k = 0,26$ мкА в режиме встряхивания – 0,5 Гц. Для улавливания энергии водяных волн был применен модернизированный наногенератор, действующий по аналогичному принципу, демонстрировавшему высокую мощность (при напряжении $U_x = 350$ В, $I_k = 0,26$ мкА), достаточную для зажигания 60 светодиодов, измерителя температуры и влажности.

Интенсивно электризуются жидкости при их фильтрации. Поверхность фильтра сильно развита за счет его пористости, поэтому велика площадь контакта жидкости с твердой стенкой. Чем тоньше фильтрация, тем сильнее электризуется жидкость. Подтверждением этого являются исследования электризации трансформаторного масла при прохождении через фильтры тонкой очистки (2 мкм полипропиленовый и 3 мкм плиссированный) [16]. Установлено, что с увеличением расхода (скорости прокачки) от 0,75 до 4 л/мин пропорционально возрастает потенциал масла до 20 кВ. На корпусе полипропиленового фильтра генерируется заряд потенциалом 50 кВ. Несколько пониженные результаты получены в случае плиссированного фильтра, соответственно, 8,6 и 10 кВ. Снижение потенциала масла и стенки фильтра авторами объясняется микроразрядами между наэлектризованными волокнами, являющимися основой фильтра и его корпусом. Микроразряды приводят к загрязнению масла продуктами пробоя и к повреждению волокон плиссированного фильтра. При тонкой фильтрации используются большие давления, следовательно необходимо дополнительные затраты внешней энергии.

Из анализа приведенных работ следует, что заряд, соответственно потенциал, приобре-

тенный жидкостью, прокачиваемой по трубопроводу, определяется ее физическими свойствами: электропроводностью, диэлектрической проницаемостью, вязкостью, скоростью движения, площадью ее контакта с поверхностью трубопровода, его материалом, диаметром, длиной, шероховатостью. Интенсивная электризация происходит в жидкостях с электропроводностью менее 10^{-10} Ом⁻¹ м⁻¹ [17]. Ни высокоизолирующие ($\sigma < 10^{-12}$ Ом⁻¹ м⁻¹), ни проводящие ($\sigma \geq 10^{-7}$ Ом⁻¹ м⁻¹) жидкости при прокачке не электризуются интенсивно – первые, потому что присутствует мало ионов, а во вторых – ионы очень быстро рекомбинируют. Принимая во внимание, что потенциал, генерируемый потоком диэлектрической жидкости через одиночную трубу, не превышает нескольких сотен вольт, целесообразно в целях повышения накапливаемой электрической энергии использовать фильтры. В связи с этим в проведенных авторами исследованиях с целью получения высоковольтной электрической энергии, использовалась полиэтилсилоксановая жидкость, протекающая самотеком, через пористую диэлектрическую структуру (ПДС), в качестве которой служил стеклянный фильтр Шотта.

УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперименты проводились на установке, представленной на рис. 1, основной частью которой является цилиндрическая фильтрующая воронка $\varnothing(35 \pm 0,1)$ мм, выполненная из органического стекла, с нанесенной на боковой поверхности шкалой с ценой деления 1 мм и вместимостью 226 мл исследуемой жидкости вместе со сменной пористой структурой 1 (пластина Шотта толщиной 3 мм, различной поверхностной площадью S , мм²: 113, 572, 606, 2826). Пористые пластины были вырезаны из стандартных фильтров Шотта различного диаметра и вставлены в оправы из органического стекла внешним диаметром $\varnothing(34,9 \pm 0,1)$ мм. Плотно к верхней части ПДС прилегает металлическая сетка 2 с ячейкой $1,5 \times 1,5$ мм, изготовленная из нержавеющей стали и подсоединенная к киловольтметру 3 с относительной погрешностью измерения электрического потенциала $\varphi \pm 1\%$. Над фильтрующей воронкой установлена делительная воронка 4 цилиндрической формы с измерительной шкалой на боковой поверхности в пределах (0–500 мл), имеющей цену деления равную 5 мл. Нижняя часть воронки 4 снабжена стеклянным краном 5. Ниже фильтрующей воронки размещен на фторопластовой пластине 6

мерный цилиндр 7 с измерительной шкалой на боковой поверхности с ценой деления 2 мл. Относительная погрешность измерения объема жидкости V , протекающей в мерный цилиндр 7, составляла $\pm(0,7-4)\%$.

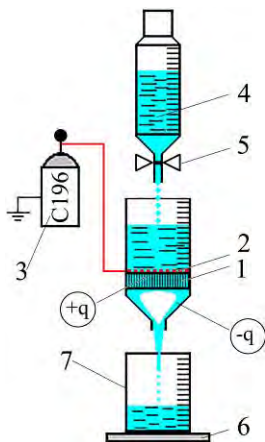


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Экспериментальная установка располагалась таким образом, чтобы мерный цилиндр 7 и киловольтметр 3 находились в поле зрения первого из двух исследователей, проводящих эксперимент, следящего за показанием киловольтметра 3 и уровнем заполнения мерного цилиндра 7.

В качестве текущей среды использовалась полиэтилсилоксановая жидкость (ПЭС-1). Применялись пористые структуры – пластины Шотта S1 (размер пор 100–160 мкм) и S2 (размер пор 40–100 мкм). Перед экспериментом все элементы установки тщательно промывались дистиллированной водой и высушивались. Особое внимание обращалось на чистоту ПДС, которая промывалась чистым гексаном, продувалась сжатым воздухом и подвергалась термической сушке. Полиэтилсилоксановая жидкость, определенного объема заливалась вторым исследователем в делительную воронку 4. С помощью крана 5 он регулировал скорость заполнения фильтрующей воронки исследуемой жидкостью, и соответственно расход через пористую структуру. В принципе, за промежуток времени заполнения фильтрующей воронки до определенного уровня h , к примеру $h = (40 \pm 0,5)$ мм, относительно пористой структуры, возможно протекание некоторого количества жидкой среды через пористую пластину и ее электризация, что в виду небольших расходов жидкости (в большинстве случаев 1–2 мл/сек), несущественно. Однако, для корректности измерений, проводили эксперименты следующим образом. Предварительно определялся объем жидкости, необходимый для заполнения фильтрующей воронки до уровня $h = 40$ мм, что составило (39 ± 1) мл. Такой объем жидкости с помощью другой мензурки заливался в фильтрующую воронку в течение 1 сек. За это время количество диэлектрической жидкости,

протекающей через пористую структуру, находилось в пределах ошибки измерений. В дальнейшем уровень рабочей среды поддерживался краном 5. Заполнение воронки объемом жидкости (116 ± 1) мл до уровня $h = (120 \pm 0,5)$ мм производилось в течение 2 сек – время, в течение которого количество рабочей среды протекающей через фильтр было также несущественно. В момент начала течения диэлектрической жидкости через пористую структуру запускался электронный секундомер с памятью (с погрешностью измерения $\pm 0,2$ сек). Далее, при заранее отмеченных делениях уровня заполнения мерного цилиндра 7, производилась регистрация показаний электронного секундомера и киловольтметра. В течение эксперимента уровень жидкости в фильтрующей воронке поддерживался неизменным, регулированием расхода с помощью крана 5. Исследования проводились при различных давлениях столба жидкости на пористую структуру, диаметрах (площадах) пластин Шотта, электропроводностях различных образцов и объемах полиэтилсилоксановой жидкости. Особое внимание обращалось на повторяемость результатов, в связи с чем эксперименты повторялись четыре раза при одинаковых условиях; результаты, полученные в этих сериях экспериментов, усреднялись. При этом, перед каждым экспериментом, в течение 40 мин, производилась нейтрализация зарядов, накопленных фильтром и испытуемой жидкостью. Наличие остаточного заряда проверялось электростатическим вольтметром С-50 (с относительной погрешностью измерений $\pm 1\%$). Сравнительные кривые, представленные на графиках обработки экспериментальных результатов, соответствуют одним и тем же внешним условиям (температуре T и относительной влажности окружающего воздуха ϕ). Температура и влажность измерялись с относительной погрешностью равной соответственно 0,5 и 5%. Максимальная относительная погрешность определения электрических потенциалов, приведенных на графиках, составляет $\pm 3\%$. Относительные погрешности измерений остальных величин находились в пределах: $h \pm (1-4)\%$; $\tau \pm (0,0125-2)\%$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлены зависимости потенциала накапливаемого заряда пластиной Шотта от времени протекания полиэтилсилоксановой жидкости при различных диаметрах пор. Скорость течения жидкости через фильтр с пористостью S2 значительно меньше чем при S1, соответственно и генерируемый потенциал – 13,5 и 26 кВ, кривые 1 и 2. Электрический потенциал прямо пропорционален накапливаемому заряду,

который, в свою очередь, прямо пропорционален объему, вытекшей за время τ , из системы жидкости, то есть $\varphi \sim \tau$ (кривая 1, рис. 2).

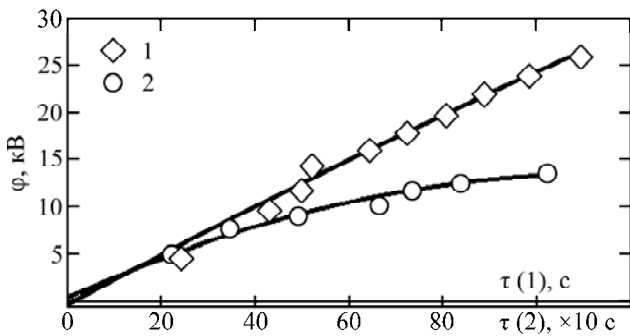


Рис. 2. Изменение потенциала φ генератора со временем τ ($h = 40$ мм (341 Па), $V = 240$ мл, $\sigma = 2,7 \times 10^{-11}$ См/м, $\varphi = 25\%$, $T = 291$ К) при первоначально сухих пластинах Шотта площадью $S = 606$ мм² и различной пористости: 1 – S1; 2 – S2.

Однако, в оценке, во-первых, не принимались во внимание утечки со временем зарядов из фильтра в окружающее пространство, во-вторых, начало отсчета времени по графикам рис. 2 не нуль, а какая-то другая величина, поскольку заряд раньше поступает на киловольтметр 3, чем в мензурку 7 (рис. 1). Учитывая эти обстоятельства, можно сделать вывод, что зависимость $\varphi(\tau)$ должна быть не линейной, а корневой, типа $\varphi(\tau) \sim (a + \tau)^m$, где $a > 0$: $0 < m < 1$. При этом в случае пластины Шотта S1 (диаметр пор 100–160 мкм) потенциал возрастает практически пропорционально времени (кривая 1, линейное приближение степенной функции, рис. 2). Таким образом, значительное влияние на электризацию пластины ПДС оказывает диссипация зарядов, о чем свидетельствует кривая 2, рис. 2, на которой сказанное проявляется отчетливее, благодаря уменьшенному по горизонтали масштабу по сравнению с кривой 1. Скорость генерации зарядов в фильтре Шотта (S2, диаметр пор от 40 до 100 мкм) не компенсирует полностью утечки зарядов по стенке воронки на жидкость, заряженную противоположным (отрицательным) зарядом и в окружающую среду (воздух). Для более адекватного сравнения кривых 1 и 2 (рис. 2), необходимо, чтобы они были получены при одинаковых скоростях течения жидкости. Это потребовало бы повышения давления и дополнительной энергии.

Для получения высокопотенциальной электрической энергии при использовании минимальной механической, в дальнейших экспериментах применялась пластина Шотта с пористостью S1. Существенное влияние на степень электризации пластины оказывает электропроводность жидкости (рис. 3).

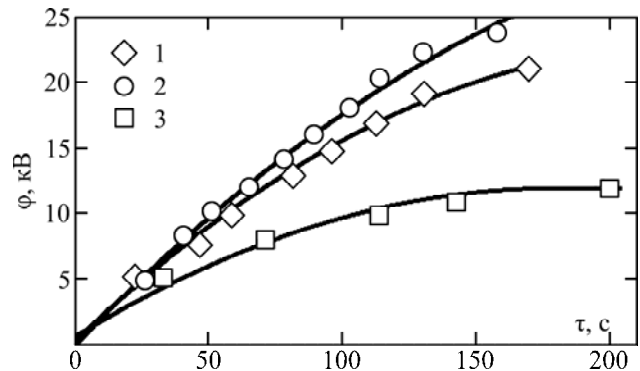


Рис. 3. Изменение потенциала генератора со временем ($h = 40$ мм (341 Па), $V = 180$ мл, $S = 606$ мм², относительная влажность воздуха $\varphi = 32\%$, $T = 291$ К), σ , [См/м]: 1 – $0,9 \times 10^{-11}$; 2 – $2,7 \times 10^{-11}$; 3 – $0,72 \times 10^{-11}$ (1,5% смесь трансформаторного масла с ПЭС-1).

Наилучшие результаты получены при электропроводности полиэтилсилоксановой жидкости $\sigma = 2,7 \times 10^{-11}$ См/м (кривая 2), откуда следует, что увеличение электропроводности благоприятствует электризации ПДС. Добавление же небольшого количества трансформаторного масла в полиэтилсилоксановую жидкость приводит к снижению среднего ее расхода (V/τ) через фильтр, соответственно к уменьшению потенциала (кривая 3, рис. 3), что, по-видимому, обусловлено увеличением средней вязкости жидкости, повлекшем за собой уменьшение расхода и потенциала. Следует отметить, что средний расход жидкости в начале экспериментов, когда фильтр сухой, несколько выше, чем в последующих опытах (кривая 1, рис. 2 и кривая 2, рис. 3), что, по всей видимости, связано с влиянием капиллярных сил, роль которых возрастает, по мере заполнения капилляров фильтра Шотта жидкостью, в начальные моменты времени.

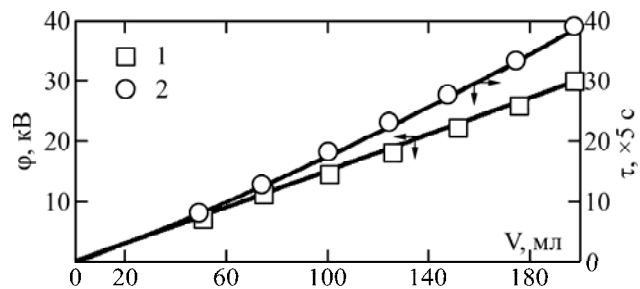


Рис. 4. Зависимость потенциала генератора от объема ПЭС-1, протекшего через капиллярную структуру за определенное время: $h = 40$ мм (341 Па), $V = 200$ мл., $S = 606$ мм², $\varphi = 20\%$, $T = 290$ К.

Степень электризации жидкости и ПДС, как отмечалось, зависит от объема жидкости, протекшей через фильтр (рис. 4). С увеличением объема прямо пропорционально возрастает потенциал генератора, практически при небольших изменениях расхода исследуемой среды. Как и в случае, рис. 2, кривая 1, зависи-

мость потенциала от объема $\phi(V)$, (рис. 4) свидетельствует о том, что указанная зависимость линейна и транзитные потери заряда незначительны. Однако, вероятно, что при дальнейшем продолжении опытов потери зарядов стали бы заметнее ощущаться. При высоких потенциалах влажность и температура окружающего воздуха должны оказывать определенное влияние на степень утечки зарядов с фильтра, и соответственно на потенциал генератора. Как показывают опыты, повышенные влажность и температура существенно сказываются на устойчивости и воспроизводимости экспериментальных данных, особенно электрического потенциала, наиболее уязвимого параметра работы. Что касается кривой 2 $\tau(V)$, рис. 4, то ее нелинейный характер является следствием возникновения ускоренного движения жидкости при переходе из фильтрующей воронки в ПДС и, наоборот, на выходе из ПДС. Детальнее этот вопрос будет рассмотрен в одной из последующих работ.

Интенсивность электризации пластины Шотта зависит от уровня (высоты) заполнения воронки исследуемой жидкостью (рис. 5), то есть от давления, оказываемого на среду, протекающую через пористую структуру. С увеличением уровня заполнения воронки до 120 мм (1023 Па) усиливаются интенсивность и степень электризации пластины (кривые 1–3, рис. 5). При этом увеличивается скорость потока (расход) жидкости через пористую структуру, что интенсифицирует процесс электризации. Выпуклый характер кривых на рис. 5, по-видимому, можно отнести, как и для других подобных кривых к транзитной утечке зарядов.

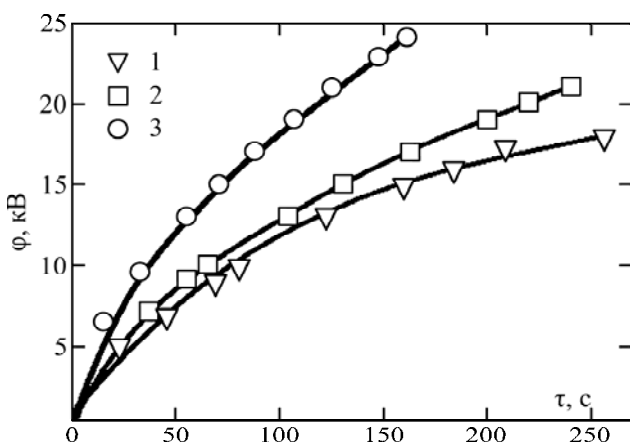


Рис. 5. Изменение потенциала генератора со временем при различной высоте (h) столба ПЭС-1, мм: 1 – 40(341 Па); 2 – 80(682 Па); 3 – 120(1023 Па); $S = 606 \text{ мм}^2$; $V = 300 \text{ мл}$; $\phi = 40\%$; $T = 293 \text{ К}$.

В значительной степени генерация зарядов в пористой структуре зависит от площади контакта твердого тела с жидкой средой. На рис. 6

представлены зависимости потенциала генератора от времени протекания полиэтилсилоксановой жидкости при различной площади пластины Шотта. По мере возрастания площади (диаметра) пластины увеличивается интенсивность (скорость) и максимальная степень электризации пористой структуры (кривые 1–3, рис. 6). Ход кривых 1 и 2 объясняется существенным влиянием утечки зарядов в окружающее пространство. В случае диаметра пористой структуры равной 60 мм ($S = 2826 \text{ мм}^2$) генерируемое количество зарядов достаточно для компенсации их диссипации (прямая 3, рис. 6). Прямолинейный характер зависимости 3, очевидно, отражает линейный участок зависимости $\phi = f(\tau)$.

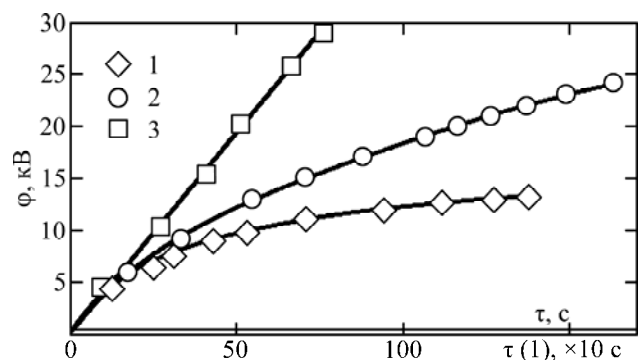


Рис. 6. Изменение потенциала генератора со временем при различной площади поверхности пористой пластины, $S (\text{мм}^2)$: 1 – 113; 2 – 572, $h = 120 \text{ мм}$; 3 – 2826, $h = 30 \text{ мм}$; тип ПДС- S1; $V = 300 \text{ мл}$; $\phi = 35\%$; $T = 291 \text{ К}$.

При подсоединении генератора к внешнему сопротивлению (ступени электрогидродинамического насоса типа «игла-конус») напряжение снизилось до 6,8 кВ, а ток (I) утечки в то же время стал равен 0,01 мкА. Номинальная, поверхностная (по отношению к площади пористой структуры) и объемная (по отношению к объему пористой структуры) мощности соответственно равны $6,8 \times 10^{-5} \text{ Вт}$, 24 мВт/м^2 и 8 Вт/м^3 . Эффективность преобразования механической энергии жидкости в электрическую (определенная по формуле $\eta = \phi I \tau / (\rho g h V)$, где ρ – плотность ПЭС-1, g – ускорение свободного падения) составила 6,1%.

В целях повышения мощности генератора необходимы дальнейшие исследования зависимости потенциала пористой структуры от толщины, площади внешней поверхности, электрофизических свойств и расхода диэлектрической жидкости, материала оправы контактирующей с пластиной Шотта. Кроме того, предполагается дать теоретическую интерпретацию приведенных экспериментальных данных, установив количественные соотношения между ними.

Исследованный наногенератор конструктивно может быть реализован по схеме предложенной авторами [18]. Он выполнен в виде замкнутого канала, заполненного диэлектрической жидкостью, с восходящей частью и зоной подвода тепла в нижней ее части, и нисходящей частью и зоной отвода тепла в верхней ее части. В нисходящей части канала, ниже зоны отвода тепла, расположена пористая структура (пластина Шотта), в верхней и нижней части которой установлены электроды, подключенные к выходным клеммам. Принудительная прокачка жидкости осуществляется за счет перепада температур между зонами подвода и отвода тепла. В качестве источника тепла могут служить отдельные детали, узлы, блоки электроники, электротехники, которые нагреваются и сбрасывают тепло в окружающую среду. По аналогичному принципу функционирует конвективный теплообменник [19], но с использованием генерируемого потенциала пористой структурой, для питания электрической энергией электрогидродинамического насоса, установленного в канале. Электрогидродинамический насос дополнительно ускоряет поток теплоносителя и улучшает тепловые характеристики теплообменника без дополнительного подвода энергии.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что даже при небольших расходах полиэтилсилоксановой жидкости (ПЭС-1), протекающей через пластину Шотта, можно генерировать высоковольтную электрическую энергию.

2. Интенсивность и степень электризации стеклянной пористой структуры зависят от электропроводности и расхода ПЭС-1.

3. На электризацию фильтра оказывают влияние в значительной степени параметры пористой структуры (размеры пор и пластины).

ЛИТЕРАТУРА

- Williams Meurig W. *Am Sci.* 2012, **100**(4), 316. doi:10.1511/2012.97.316.
- Wang, Sihong, Lin, Long, Lin Wang, Zhong. *Nano Lett.*, 2012, **12**(12), 6339–6346. <https://doi.org/10.1021/nl303573d>
- Wang, Sihong, Lin, Long, Xie, Yannan, Jing, Qingshen, et al., *Nano Lett.*, 2013, **13**, 2226–2233. [dx.doi.org/10.1021/nl400738p](https://doi.org/10.1021/nl400738p).
- Ulises Tronco Jurado, Suan Hui Pu and Neil M. White. Water-Dielectric Single Electrode Mode Triboelectric Nanogenerators for Ocean Wave Impact Energy Harvesting *Proceedings* 2018, **2**, 714. doi:10.3390/proceedings2130714. www.mdpi.com/journal/proceedings

- Sridhar Sripadmanabhan Indira, Chockalingam Aravind Vaithilingam, Kameswara Satya Prakash Oruganti, Faizal Mohd, et al. *Nanomaterials*. 2019, **9**(5), 773. doi: 10.3390/nano9050773
- Xinghui Hou, Jingkun Yu, Mingkuo Sheng, Xin Yang. *J Electrostat.* 2016, **82**, 7–10. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2016.04.004>
- Shouxin Zhu, Lin Liu, Satoshi Takahashi. *CJME*. 2012, **25**(6), 2710–2717. doi: 10.3901/CJME.2012.06.1115
- Vihacencu M.S., Notingher P.V., Paillat T., Jarny S. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul.* 2014, **21**(2), 693–703. doi: 10.1109/TDEI.2013.004423
- Olivier Moreau, Juan Martin Cabaleiro, Thierry Paillat, Guillermo Artana et al. *Influence of the wall shearing stress on flow electrification*. 2015, p. 1–6. <https://www.researchgate.net/publication/292983758>
- Ravelo B., Duval F., Kane S., Nsom B. *J Electrostat.* 2011, **69**(6), 473–478. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2011.06.004>
- Kolcunová I., Kurimský J., Cimbala R., Petráš J., Dolník B., Džmura J., Baogh J. *J Electrostat.* 2017, **88**, 60–64. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2017.01.024>
- Moreau E., Thierry Paillat, Gérard Touchard. *J Electrostat.* 2001, **51–52**, 448–454. doi: 10.1016/S0304-3886(01)00082-1
- Hong-Yeol Park, Hyung Kook Kim, Yoon-Hwae Hwang, Dong-Myeong Shin. *J Korean Phys Soc.* 2018, **72**(4), 499–503. doi: 10.3938/jkps.72.499
- Xiaolong Zhang, Youbin Zheng, Daoai Wang, Feng Zhou. *Nano Energy*. 2017, **40**, 95–106. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.08.010>
- Pan, L., Wang, J., Wang, P. et al. *Nano Res.* 2018, **11**, 4062–4073. <https://doi.org/10.1007/s12274-018-1989-9>
- Sasaki, A. et al. *Lubr. Eng.* 1999, **55**(9), 14–21.
- Таубкин И.С. *Теория и практика судебной экспертизы*. 2018, **13**(2), 54–64. doi: 10.30764/1819-2785-2018-13-2-54-64
- Bologa Mircea, MD; Cojevnicev Igor, MD; Schileov Vladimir, MD; Policarpov Albert, MD. *Generator electrostatic convectiv*. 2015. MD Patent, 911.
- Шкилев Владимир, MD; Болога Мирча, MD; Кожевников Игорь, MD; Гросу Федор, MD; Моторин Олег, MD; *Конвективный теплообменник*. 2016. MD Patent, 909.

Summary

The mechanisms of electrification of various solids in contact or friction as well as in the interaction of liquid media with conductive and dielectric materials are described and analyzed. Output characteristics of nanogenerators based on the phenomenon of electrification of solids and liquids are considered. The design and results of the study of an electrostatic nanogenerator based on the electrification of a glass porous structure when a dielectric fluid passes through it are presented.

Keywords: electrification, porous structure, Schott filter, nanogenerator, polyethylsiloxane liquid, flow, voltage, density, current, potential, time, generator, electrical conductivity