

03

Влияние геометрии на чувствительность углеродного молекулярно-электронного преобразующего элемента

© В.В. Левчук, М.В. Кирилловичев, В.А. Агафонова, В.М. Агафонов

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
141700 Долгопрудный, Московская обл., Россия
e-mail: levchuk.vv@phystech.edu

Поступило в Редакцию 26 октября 2024 г.

В окончательной редакции 27 марта 2025 г.

Принято к публикации 6 мая 2025 г.

Представлена технология создания углеродных преобразующих элементов для молекулярно-электронных датчиков движения с применением трафаретной печати и лазерной микрообработки. Изготовлена партия образцов преобразующих элементов с плоским и цилиндрическим каналами с различными значениями толщины рабочего канала: от 36 до 400 μm и различным расстоянием между электродами от 55 до 270 μm . Изготовлены сейсмические датчики с использованием изготовленных образцов, проведены исследования их частотных характеристик и установлены конфигурации, обеспечивающие максимальное значение коэффициента преобразования. Для исследованного диапазона геометрических характеристик коэффициент преобразования оказывается тем выше, чем тоньше канал, в котором происходит преобразование сигнала, при этом для расстояния между электродами имеется оптимальное значение, соответствующее наибольшему значению коэффициента преобразования.

Ключевые слова: сейсмические датчики, электрохимические системы, микрофлюидика, микроструктуры, углеродные электроды.

DOI: 10.61011/JTF.2025.08.60896.371-24

Введение

Технология измерения параметров движения, основанная на принципах молекулярно-электронного переноса, в последние годы нашла применение при создании широкополосных сейсмометров, акселерометров, датчиков угловых скоростей [1–10]. Основным преимуществом приборов, изготовленных на основе данной технологии, является возможность регистрации слабых движений нанометрового уровня в инфранизкочастотной части спектра, вплоть до сотых и тысячных долей герца. Как следствие, область применения связана с созданием высокочувствительных сейсмометров и акселерометров для исследования естественного сейсмического поля Земли [2,3,11–17]. Значительный коммерческий потенциал технология может получить при условии широкого внедрения в сейсморазведке, где годовые потребности составляют сотни тысяч и даже миллионы датчиков в год. Опытные работы, проведенные в последние годы, показали, что приборы, основанные на молекулярно-электронном переносе, имеют значительное преимущество как в чувствительности, так и в частотном диапазоне по сравнению с наиболее распространенными в сейсморазведке электродинамическими геофонами [18,19].

Первичным преобразующим элементом датчиков на принципах молекулярно-электронного переноса является миниатюрная электрохимическая ячейка. Такая ячейка представляет собой систему электродов с характерными размерами в несколько десятков микрон, погруженную в высококонцентрированный раствор электро-

лита. При включении внешнего питания между электродами возникает разность потенциалов, инициирующая электрохимические реакции с участием компонентов раствора, в результате чего между электродами протекает электрический ток. Принцип измерения внешнего сигнала состоит в том, что при движении корпуса датчика, содержащего такую ячейку, на жидкость действуют силы инерции, и она приходит в движение относительно электродов. При этом течение жидкости влияет на скорость доставки реагирующих компонентов раствора к электродам, что приводит к вариациям межэлектродного тока, являющимся первичным выходным сигналом ячейки.

Значительные усилия исследователей из целого ряда лабораторий в России, Китае и США направлены на поиск новых технологических решений для создания преобразующей электрохимической ячейки, которые позволяют уменьшить разброс параметров чувствительных элементов при их изготовлении и снизить себестоимость [18,20–31]. В результате за последние примерно пять лет были созданы десятки различных конструкций электрохимических ячеек, характеризующихся высокими выходными параметрами и хорошей повторяемостью характеристик.

В то же время одним из основных ограничений для расширения области применения данной технологии является стоимость. Главная причина высокой стоимости современных молекулярно-электронных сейсмических датчиков состоит в использовании платины для создания микроэлектродов электрохимической ячейки.

Платина является довольно дорогим материалом, а технологические процессы, используемые при создании электрохимических ячеек на ее основе, также отличаются высокой стоимостью. Альтернативным к платине может быть использование углерода, а в перспективе и его низкоразмерных модификаций. Применение углеродных материалов позволяеткратно снизить стоимость преобразующих элементов. При этом, как показано в работе [32], характеристики преобразующих элементов электрохимических датчиков движения с платиновыми и углеродными электродами оказываются достаточно близкими друг к другу при условии, что геометрические характеристики преобразующих элементов подобны между собой.

Целью исследований, предпринятых авторами в настоящей работе, было определение геометрических характеристик преобразующих элементов с углеродными электродами, обеспечивающих наиболее высокий коэффициент преобразования. Для этого авторами были разработаны технологические процессы на основе трафаретной печати и прецизионной лазерной микрообработки, позволяющие варьировать геометрические параметры преобразующих элементов в достаточно широком диапазоне. На базе разработанных технологических процессов были изготовлены образцы преобразующих элементов с плоским и цилиндрическим каналами, в которых происходит преобразование течения жидкости в выходной электрический сигнал, различающиеся толщиной рабочего канала и расстоянием между электродами. Для изготовленных ячеек проведены исследования частотных характеристик их отклика на внешние механические воздействия и установлены наборы геометрических характеристик, при которых коэффициент преобразования становится максимальным.

1. Конфигурации исследуемых в работе преобразующих элементов

1.1. Конструкция электрохимической ячейки

Объектом исследования в настоящей работе является 4-х электродная электрохимическая ячейка планарного типа. Она представляет собой 4 параллельных электрода, расположенных на стенках непроводящего канала в порядке А–К–К–А. Отметим, что высота электродов мала по сравнению с шириной канала, по которому протекает рабочая жидкость под действием сил инерции, вызванных внешним механическим сигналом. При таком условии свойства ячейки мало зависят от формы сечения канала и по принятой терминологии преобразующий элемент относят к планарному типу. Конструкция ячейки обеспечивает протекание жидкости между электродами в порядке их расположения в канале, т.е. в каждый момент времени для одной пары анод–катод жидкость течет от анода к катоду, а для другой пары от катода к аноду. В качестве рабочей жидкости используют водный

раствор электролита MeI , где Me — это ион металла (чаще всего это K^+ или Li^+) с добавлением небольшого количества молекулярного иода I_2 .

В растворе молекулярный иод присутствует в виде положительных ионов трииодида. В реакциях, инициированных внешней разностью потенциалов, на катодах из ионов трииодида образуются ионы атомарного иода, на анодах реакция идет в обратную сторону. Поскольку суммарное количество ионов остается постоянным, протекающие реакции и перенос зарядов могут проходить сколь угодно долго без изменения состава рабочей жидкости. В каждой элементарной реакции через поверхность электродов проходит два электрона и в системе протекает межэлектродный ток. В свою очередь, величина тока зависит от сил инерции, создающих течение жидкости и обеспечивающих перенос с ионов между электродами.

С математической точки зрения перенос активных ионов в такого рода приборах подчиняется уравнению конвективной диффузии ионов:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D\Delta c + (\mathbf{v}, \nabla)c, \quad (1)$$

где v — скорость электролита, c — концентрация носителей тока (ионов трииодида), D — коэффициент диффузии этих ионов.

Из уравнения становится ясно, что чувствительность прибора (величина изменений концентрации во времени и связанные с этими изменениями вариации тока), главным образом, зависит от скорости рабочей жидкости, которую можно варьировать, изменяя гидродинамическое сопротивление канала, и от градиента концентрации. В свою очередь, гидродинамическое сопротивление зависит от толщины канала, а градиент концентрации определяется расстоянием между электродами. Влияние указанных геометрических параметров на коэффициент преобразования электрохимической ячейки исследуется в настоящей работе.

1.2. Форма электрохимической ячейки и диапазоны исследования геометрических размеров

Большинство исследованных ранее образцов, изготовленных с применением платиновых электродов, представляют собой либо различные варианты планарных систем, в которых жидкость движется в плоском канале, на стенках которого сформированы электроды [24,27,31–33], либо конфигурации, изготовленные путем создания сквозных отверстий в диэлектрических подложках, на поверхностях которых изготовлены электроды [21–23,26,29,30], что связано с простотой необходимых для их реализации технологий. Известные более сложные в изготовлении варианты дают лишь небольшое количественное улучшение выходных характеристик, поэтому в настоящей работе мы также остановились на двух указанных выше распространенных конфигурациях.

Для определения диапазона исследования геометрических характеристик, помимо технологических ограничений, необходимо учесть ряд факторов, связанных с физикой преобразования сигналов. Прежде всего, обратим внимание, что влияние потока жидкости на распределение активных ионов математически описывается вторым слагаемым в правой части уравнения конвективной диффузии (1). Из вида этого слагаемого следует, что необходимым условием для получения высокого коэффициента преобразования является совпадение областей, в которых, преимущественно, протекает жидкость и имеется градиент в распределении концентрации активных ионов триодида. В свою очередь, для каждой пары электродов анод–катод характерный размер области, в которой происходит диффузия ионов, определяется расстоянием между этими электродами. Поэтому, в частности, если рассматриваемые электроды находятся на одной из стенок канала, то его ширина не должна сильно превышать расстояние между электродами, в противном случае, жидкость в центральной части канала в процессе преобразования сигнала практически не участвует. С другой стороны, очень тонкий канал оказывает сильное сопротивление течению жидкости, что уменьшает абсолютное значение гидродинамической скорости. Поэтому при создании экспериментальных образцов параметры геометрии подбирались таким образом, чтобы расстояние между электродами и размеры канала для протекания жидкости были одного порядка, т.е. отличались не более, чем в 10 раз. Что касается абсолютных значений размеров, то известно, что в электрохимических системах на расстояниях более $500\ \mu\text{m}$ от твердой поверхности жидкость в поле тяжести становится неустойчивой, что приводит к низкочастотным шумам межэлектродных токов [34]. С другой стороны, очень малые размеры каналов создают слишком высокое сопротивление течению жидкости, которое может быть скомпенсировано только значительным увеличением их количества или уменьшением их длины. То и другое достаточно сложно обеспечить технологически. Исходя из указанных соображений в настоящем исследовании был выбран диапазон изменения как размера канала, так и межэлектродного расстояния от нескольких десятков до нескольких сотен микрометров. Отметим, что такой диапазон является достаточно характерным для электрохимических систем аналогичного назначения, независимо от способа их создания.

1.3. Электрохимическая ячейка с углеродными электродами, изготовленными на стенках плоского канала

Конструкция электрохимической ячейки с плоским каналом, в котором происходит преобразование сигнала, показанная на рис. 1, формируется двумя параллельно расположенными непроводящими пластинами, которые разделены также непроводящей прокладкой заданной толщины с отверстием, охватывающим всю систему

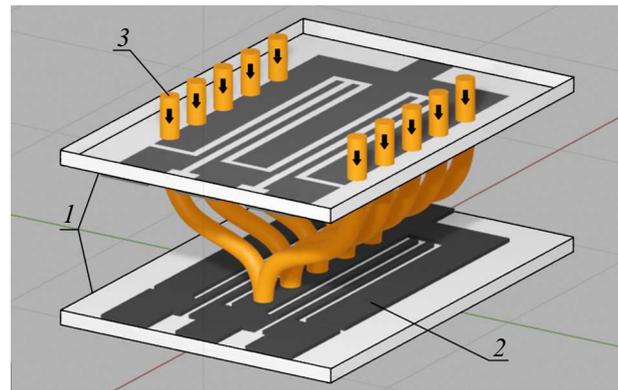


Рис. 1. Схема чувствительного элемента с плоским каналом: 1 — пластина с отверстиями, 2 — электроды, 3 — линии течения жидкости.

электродов как на одной, так и на другой пластинах. На каждой пластине изготовлены электроды в виде параллельных проводящих дорожек, расположенных на внутренней стороне и имеющих заданный при изготовлении зазор. Пластины также содержат отверстия для доступа рабочей жидкости к электродам, при этом отверстия в верхней и нижней пластинах смещены относительно друг друга. В этом случае, силы инерции, действующие на рабочую жидкость в направлении, перпендикулярно плоскости указанных пластин, формируют поток жидкости, протекающий сквозь преобразующую электрохимическую структуру. При этом в пространстве между пластинами поток жидкости оказывается направлен преимущественно вдоль поверхности пластин и перпендикулярно проводящим дорожкам. Таким образом, формируется поток жидкости, обеспечивающий перенос ионов между электродами указанной преобразующей структуры. Впервые такая конструкция была предложена для платиновых электродов в работе [35] и исследована для небольшого набора геометрических характеристик преобразующей системы.

Основные параметры, влияние которых на коэффициент преобразования электрохимической ячейки исследуется в настоящей работе — это расстояние между электродами, которое задается шириной реза лазерной машины, и ширина канала, определяемая толщиной использованной прокладки.

1.4. Электрохимическая ячейка с углеродными электродами, изготовленными на стенках цилиндрического канала

Аналогичный преобразующий элемент состоит из двух параллельных диэлектрических пластин, разделенных прокладкой с отверстием, охватывающим все электроды электрохимической ячейки (рис. 2). На обеих сторонах каждой пластины расположены электроды в виде проводящего углеродного слоя, покрывающего

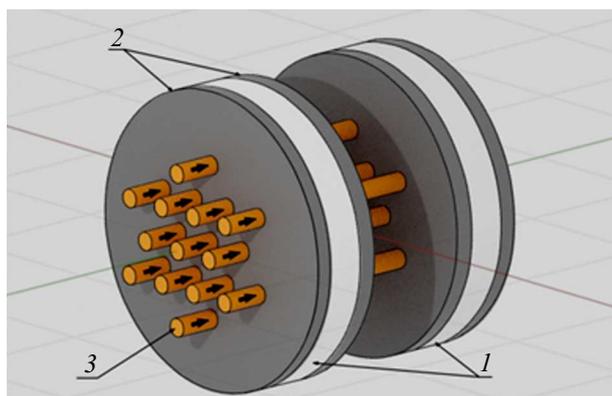


Рис. 2. Схема чувствительного элемента с цилиндрическим каналом: 1 — пластина, 2 — электроды, 3 — линии течения жидкости.

всю площадь. Со стороны катода поверх проводящего слоя дополнительно изготавливается диэлектрическое покрытие. В пластинах также имеются круглые отверстия, позволяющие рабочей жидкости проходить через преобразующий элемент. Каждое отверстие можно представить себе как цилиндрический канал, в котором жидкость переносит ионы между электродами разных полярностей.

Нужно отметить, что практически изготовленные на пластинах отверстия имеют заметную конусность, что связано с использованием при их изготовлении лазерного луча. При этом диаметр отверстия на входе луча будет больше выходного. Фрезерование лазерным лучом осуществляется с внешней стороны ячейки, поэтому входные отверстия будут видны на анодном слое, а выходные — на катодном. Для правильной работы устройства важно, чтобы диаметр выходного отверстия не превышал определенного значения, что позволит сохранить допустимый уровень протекания реакции на катоде.

В дальнейшем будет исследоваться влияние расстояния между электродами и ширины рабочего канала на чувствительность прибора, где в случае ячейки с цилиндрическим каналом указанные геометрические параметры равны толщине диэлектрической пластины и диаметру отверстий на выходе лазерного луча соответственно.

2. Изготовление образцов и методика проведения экспериментальных исследований

2.1. Способ изготовления образцов с плоским каналом

Из листа стеклотекстолита FR-4 толщиной 0.5 mm с помощью лазерного маркиратора G-MARK 100 [36] вырезается заготовка в виде квадрата размером

45 × 45 mm. Данная заготовка размещается в оснастке и комплексом лазерной гравировки „UniMarker UV Mini“ [37] с обеих сторон пластины гравироваются места под нанесение углеродной резистивной полимерной пасты ПУРП-0.05 [38]. Далее производится обработка заготовок спиртовым раствором. На обработанные заготовки методом трафаретной печати наносится паста и проводится отверждение в сушильном шкафу (рис. 3, *a*). С помощью лазерного маркиратора обрабатывается поверхность пасты по чертежу (рис. 3, *c, d*). Для каждого требуемого значения зазора между электродами разрабатывается индивидуальный чертеж и формируется программа для управления лазерной станком. Снова производится обработка заготовок спиртовым раствором. На заключительной операции контактные площадки из отвержденной пасты, сформированные на краях образцов, дополнительно покрываются углеродной пастой, на пасту приклеиваются выводы из медной изолированной проволоки 0.1 mm в диаметре, и проводится отверждение в сушильном шкафу. На место приклеивания выводов наносится эпоксидный двухкомпонентный клей.

Готовые элементы (рис. 3, *b*) проходят контрольные замеры зазоров и сопротивления. Качество созданных образцов контролировалось при помощи микроскопа с возможностью снимков чувствительного элемента с десятикратным увеличением (рис. 3, *e–i*). Также производилось измерение реального расстояния между электродами с использованием микроскопа. Результаты показали, что интервалы между электродами для четырех видов образцов составляли 275, 170, 105, 55 μm. Разброс расстояний между электродами в пределах одного вида образцов был менее 5 μm. Кроме того, измерялось сопротивление электродов из проводящей пасты, для проведения испытаний принимались образцы с сопротивлением между крайними точками электродов не более 400 Ω.

2.2. Способ изготовления образцов с цилиндрическим каналом

Из листа стеклотекстолита FR-4 заданной толщины с помощью лазерного маркиратора вырезается квадратная заготовка размером 45 × 45 mm. Заготовки обрабатываются спиртовым раствором. Наносится углеродная паста методом трафаретной печати на заготовку и проводится отверждение в сушильном шкафу. На катодный слой наносится диэлектрическая паста методом трафаретной печати и проводится отверждение в сушильном шкафу. С помощью лазерного маркиратора создается мелкая сетка из 2500 отверстий. Для этого для каждого заданного диаметра каналов изготавливается чертеж (рис. 4, *a*) и создается программа для работы лазерного станка. Производится обработка заготовок спиртовым раствором. Контактные площадки заполняются углеродной пастой, приклеиваются выводы из медной изолированной проволоки, и проводится отверждение в сушильном шкафу. На место приклеивания выводов наносится эпоксидный

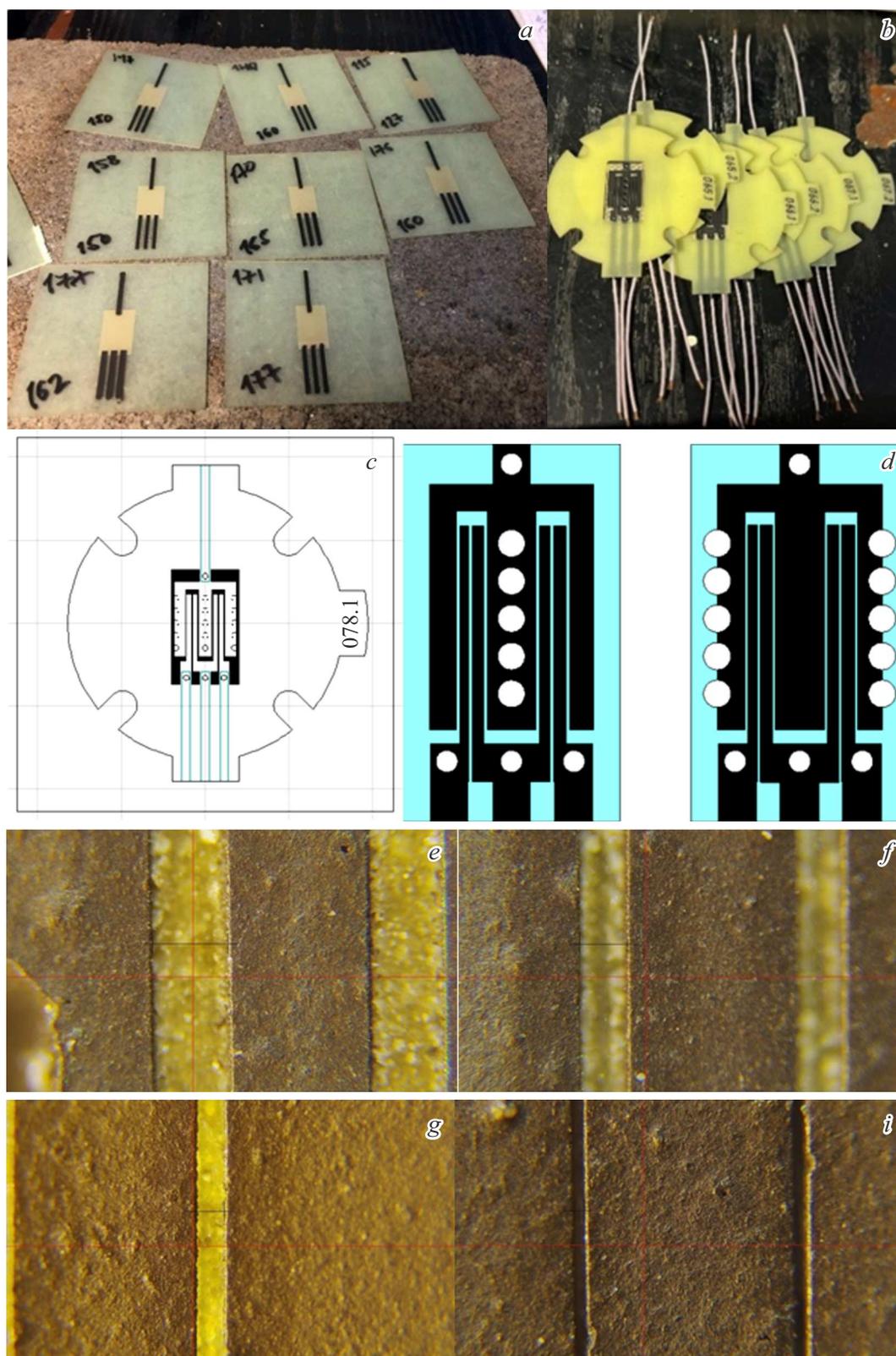


Рис. 3. Ячейка с плоским каналом: *a* — заготовки; *b* — готовые образцы; *c* — чертеж заготовки; *d* — чертеж электродов и отверстий; *e–i* — образцы с зазорами 275, 170, 105 и 55 μm соответственно.

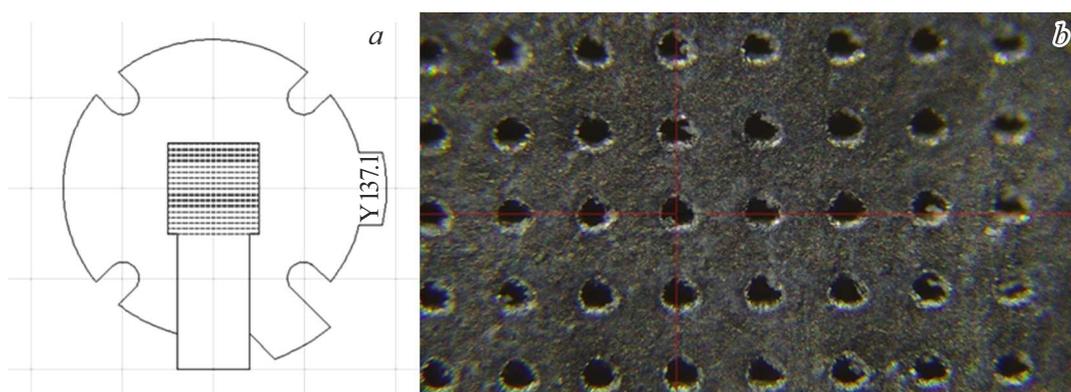


Рис. 4. Ячейка с цилиндрическим каналом: *a* — чертеж заготовки; *b* — фотография готового образца чувствительного элемента.

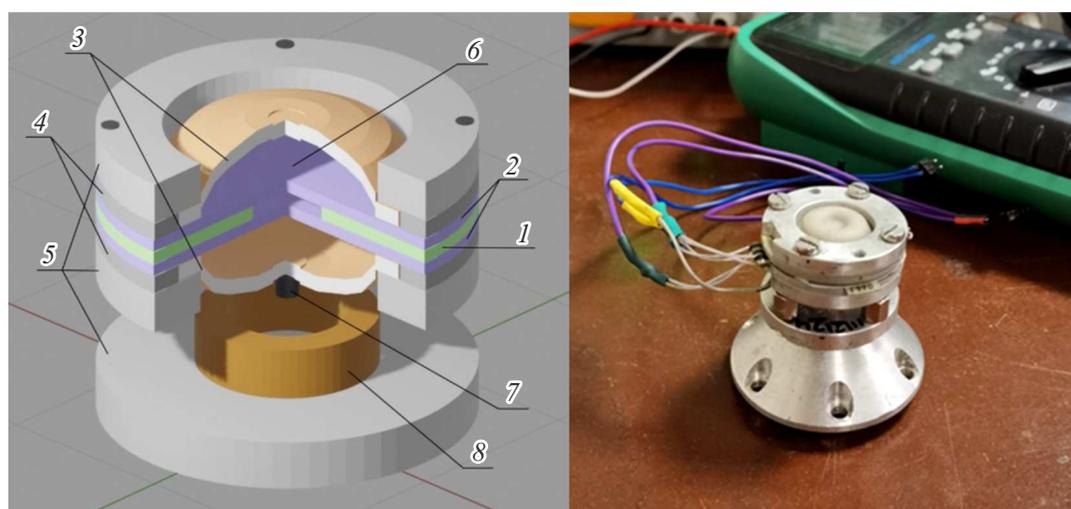


Рис. 5. Схема собранного датчика (слева): 1 — прокладка, 2 — пластины с электродами, 3 — мембраны, 4 — ограничительные кольца, 5 — фланцы и держатель катушки, 6 — раствор электролита, 7 — магнит, 8 — катушка; фотография собранного датчика (справа).

двухкомпонентный клей. Готовые элементы (рис. 4, *b*) проходят контрольные замеры диаметров каналов и сопротивления.

2.3. Изготовление макета датчика на основе исследуемых электрохимических ячеек

Для анализа характеристик готовые образцы электрохимических ячеек вне зависимости от их конкретного типа собирались по единой схеме, показанной на рис. 5. Герметизирующая прокладка 1 помещалась между стеклотекстолитовыми пластинами, на которых были расположены электроды 2. С обеих сторон этих пластин устанавливались резиновые мембраны 3 и ограничительные кольца 4. Завершали конструкцию металлические фланцы 5 с резьбой для крепежных винтов.

Собранные таким образом элементы датчика фиксировались в тисках для обеспечения герметичности и

дополнительно скреплялись винтами. При закручивании винтов герметизирующая прокладка и уплотнительные кольца мембран плотно прижимались к текстолитовым пластинам, что обеспечивало герметичность внутренней полости датчика. После завершения сборки через узкое отверстие в ограничительном кольце датчика заполнялись электролитом 6 — водным раствором LiI 4M с добавлением молекулярного иода в концентрации 0.03 M, с использованием шприца, после чего проводилась дегазация в вакуумной камере.

Собранный датчик оснащался электромагнитным актуатором: на одну из мембран прикреплялся магнит 7, рядом с которым находилась катушка 8, зафиксированная на неподвижной части конструкции. Такой актуатор преобразует колебания тока в катушке в механические колебания электролита в преобразующем элементе, что позволяет моделировать действия инерционных сил при сейсмических сигналах в заданном диапазоне частот [39].

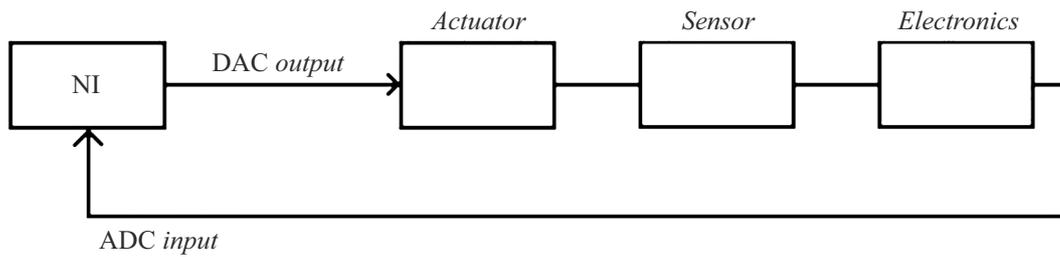


Рис. 6. Принципиальная схема установки.

2.4. Методика исследования зависимости коэффициента преобразования от геометрических параметров электрохимической ячейки

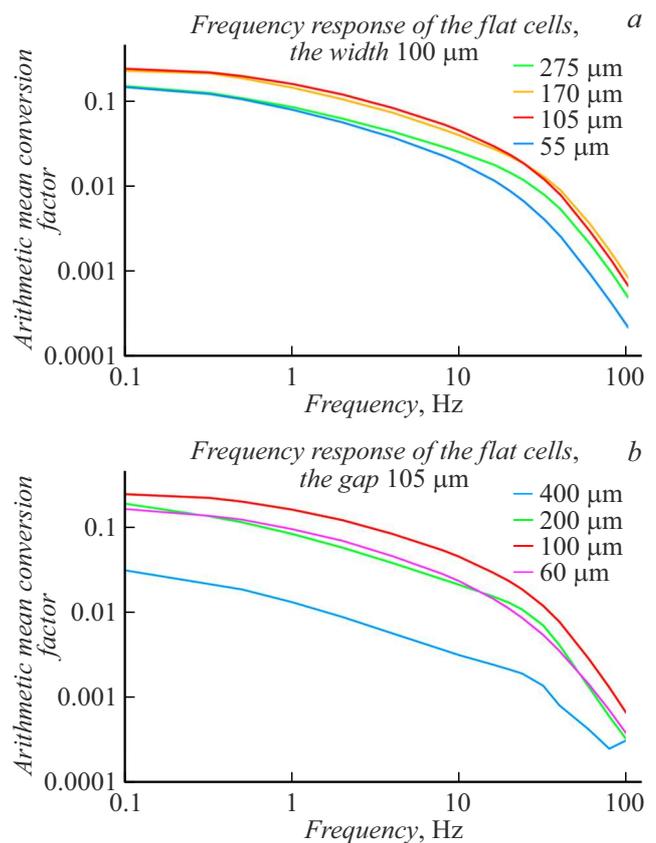
В ходе работы устанавливалась зависимость чувствительности датчика от величины зазора между электродами и толщины рабочего канала. Опытные образцы с плоским каналом имели 4 варианта расстояний между электродами: 275, 170, 105, 55 μm . Толщина рабочего канала для образцов с плоским каналом принимала значения 0,4, 0,2, 0,1 mm. Для каждого варианта расстояний было изготовлено по 3 образца чувствительных элементов.

Для ячеек с цилиндрическим каналом было выбрано 3 варианта толщины стеклотекстолитовых пластин: 200, 100, 60 μm . Допустимый диаметр отверстий сетки, часто использующийся в работе с ячейками данного типа, имеет размеры порядка нескольких десятков микрон. В настоящей работе для программы лазерной установки были заданы диаметры отверстий сетки 36, 40, 44, 48 μm . При замерах фактические размеры составили порядка 55, 60, 65, 70 μm . Для каждого варианта также было изготовлено по 3 образца преобразующих элементов.

При измерениях, согласно схемы на рис. 6, с выхода ЦАП подавался синусоидальный сигнал на катушку электромагнитного актуатора сопротивлением 150 Ω , амплитуда сигнала варьировалась в диапазоне 30–200 mV, частота варьировалась в диапазоне 0,05–100 Hz. Актуатор образовывал колебания тока в катушке в механическое движение электролита в датчике. Сигнал с датчика считывал 16-разрядный АЦП (компания National instruments модель NI USB-6215) [40]. Полученные данные обрабатывались в программе DADiSP для получения амплитудно-частотной характеристики прибора.

3. Результаты

Зависимость чувствительности (отношение сигнального тока, полученного с образца, к току в катушке) образцов с плоским каналом от частоты сигнала на выходе ЦАП приведена на рис. 7. Рис. 7, *a* иллюстрирует характеристики ячеек с фиксированной шириной

Рис. 7. Частотные характеристики образцов с плоским каналом: *a* — при различных значениях зазора между электродами; *b* — при различных значениях ширины рабочего канала.

канала, усредненных по нескольким образцам идентичной геометрии, разным цветам соответствуют разные межэлектродные расстояния. Рис. 7, *b* показывает характеристики образцов с фиксированным расстоянием между электродами, усредненных по нескольким образцам идентичной геометрии, разным цветам соответствуют разные величины ширины канала. В рамках настоящей работы для каждого усреднения группы прототипов одной геометрии было изготовлено малое количество образцов, поэтому задача о нахождении дисперсии не ставилась. По полученным данным проведем сравнение характеристик образцов с плоским каналом с различными конфигурациями преобразующего элемента.

Закономерным результатом (рис. 7, *a*) является низкая чувствительность образцов с расстоянием между электродами $275\ \mu\text{m}$ по сравнению с параметрами 170 и $105\ \mu\text{m}$: такой зазор значительно снижает градиент концентрации, и, согласно уравнению конвективной диффузии, чем меньше градиент, тем меньше чувствительность прибора. Предположительную причину низкой чувствительности образцов с зазором $55\ \mu\text{m}$ демонстрирует рис. 8: величина зазора сопоставима с высотой электродов над пластиной, что делает исходное предположение о планарности конструкции неверным. В области между электродами формируется гидродинамическая тень, т.е. часть рабочей жидкости перестает участвовать в преобразовании внешнего сигнала. Данные позволяют сделать однозначный вывод: для ячеек с плоским каналом в выбранном диапазоне параметров существует оптимальное расстояние между электродами.

Проанализируем характеристики рис. 7, *b*. Заметна относительно низкая чувствительность образцов с шириной канала $0.4\ \text{mm}$ и образцов с шириной $0.06\ \text{mm}$ на фоне параметров 0.2 и $0.1\ \text{mm}$. Результат для образцов с шириной канала $0.4\ \text{mm}$ предсказуем: с увеличением ширины канала уменьшается его гидродинамическое сопротивление, как следствие, снижается скорость тока рабочей жидкости, и, согласно уравнению конвективной диффузии, снижается чувствительность прибора. Образцы с шириной канала $0.06\ \text{mm}$ подвержены другому механизму: при значительном уменьшении ширины канала доля молекул раствора, вовлеченных в граничное прилипание на стенках канала, возрастает, что также снижает эффективную скорость тока жидкости электролита, и, следовательно, снижает чувствительность прибора. Таким образом, было установлено, что для ячеек с плоским каналом существует оптимальное значение ширины рабочего канала.

Зависимость коэффициента преобразования от частоты сигнала для ячеек с цилиндрическим каналом приведена на рис. 9. Рис. 9, *a* иллюстрирует характеристики ячеек с фиксированной шириной канала, усредненных по нескольким образцам идентичной геометрии, разным цветам соответствуют разные межэлектродные расстояния. Рис. 9, *b* показывает характеристики образцов с фиксированным расстоянием между электродами, усредненных по нескольким образцам идентичной геометрии,

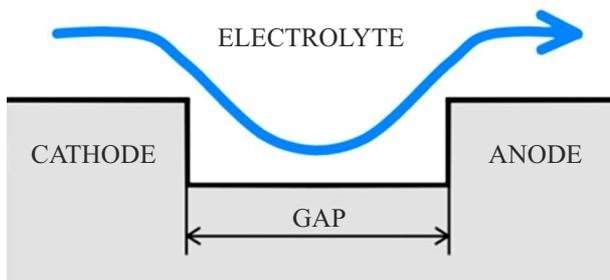


Рис. 8. Гидродинамическая тень.

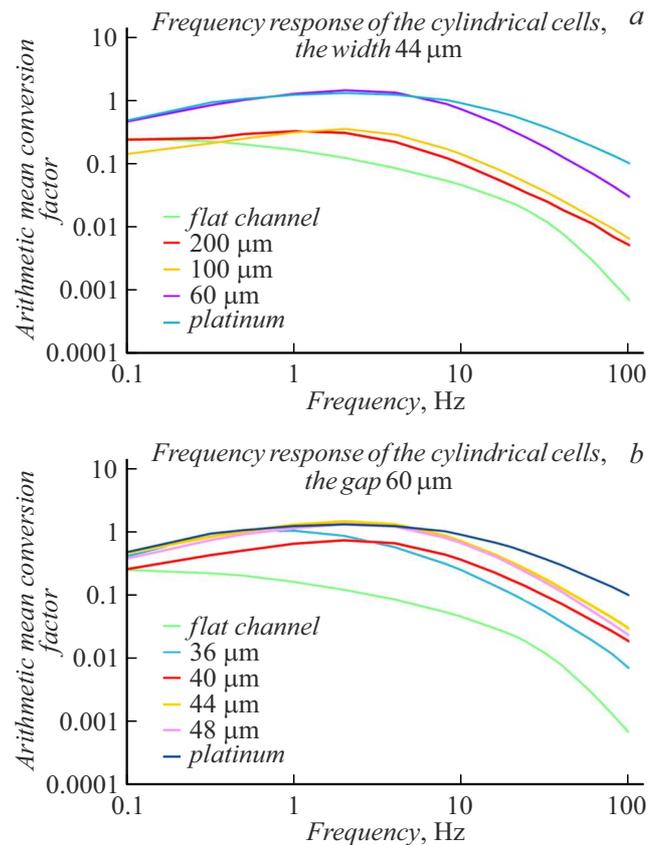


Рис. 9. Частотные характеристики образцов с цилиндрическим каналом: *a* — при различных значениях зазора между электродами; *b* — при различных значениях ширины рабочего канала.

разным цветам соответствуют разные величины ширины канала. Как и ранее, в силу малого количества образцов для усреднения характеристик вопрос о вычислении дисперсии не исследовался. Кроме того, для сравнения на графики добавлены характеристики лучшего образца с плоским каналом, полученные в настоящей работе (расстояние между электродами $105\ \mu\text{m}$, толщина канала $0.1\ \text{mm}$) и серийно используемого преобразующего чувствительного элемента на базе платиновой сетки производства компании „Р-сенсорс“, конструкция которого описана в работе [41].

По полученным данным проведем сравнение характеристик образцов с плоским каналом с различными конфигурациями преобразующего элемента. На рис. 9, *a* кривые зеленого цвета соответствуют образцам с плоским каналом, красного — ячейкам с цилиндрическим каналом на текстолитовых подложках толщиной $200\ \mu\text{m}$, оранжевого — цилиндрическому каналу на подложках толщиной $100\ \mu\text{m}$, фиолетового — толщиной $60\ \mu\text{m}$, синего — образцы с платиновой сеткой. На рис. 9, *b* кривые голубого цвета соответствуют образцам с шириной канала $36\ \mu\text{m}$, оранжевого — ширине $40\ \mu\text{m}$, красного — ширине $44\ \mu\text{m}$, фиолетового — ширине $48\ \mu\text{m}$. Судить о

характеристике можно по тому, насколько большая область спектра, в которой она преобладает над другой характеристикой. Таким образом, была выявлена простая монотонная зависимость в заданном диапазоне толщины текстолитовых пластин: чем меньше расстояние между электродами, тем больший коэффициент преобразования имеет образец. Полученный результат согласуется с теоретически ожидаемым, согласно качественному анализу уравнения конвективной диффузии (1), а также более детальному анализу, представленному в работе [42]. Механизмы, описывающие поведение характеристик при различных значениях ширины рабочего канала, аналогичны тем, что были описаны для ячеек с плоским каналом: при ширине канала $36\ \mu\text{m}$ доля молекул рабочей жидкости, вовлеченных в процессы граничного прилипания, велика, в свою очередь, это означает, что соответствующая ей характеристика расположена относительно ниже остальных. Характеристика образцов, имеющих ширину $48\ \mu\text{m}$, незначительно уступает кривой с шириной $44\ \mu\text{m}$: широкий канал создает низкое гидродинамическое сопротивление, и, как следствие, низкую скорость течения раствора. Установлено, что для ячейки с цилиндрическим каналом также существует оптимальное значение ширины рабочего канала.

Заключение

Таким образом, в работе представлен технологический процесс изготовления преобразующих элементов для молекулярно-электронных датчиков движения на основе углеродных материалов с применением трафаретной печати и лазерной обработки материалов, который позволяет реализовать широкий диапазон геометрических характеристик преобразующих электрохимических ячеек. Проведенные экспериментальные исследования изготовленных образцов позволили выявить ширину рабочего канала и межэлектродное расстояние, при которых коэффициент преобразования достигает своего наибольшего значения для рассматриваемых конфигураций планарного типа и оказывается вполне соответствующим преобразующим элементам, изготовленным из платиновой сетки. При этом стоимость исходных материалов и технологического процесса оказывается многократно более низкой.

Указанные обстоятельства позволяют рассчитывать на широкое применение углеродных материалов при создании молекулярно-электронных датчиков для наиболее массовых областей применения, прежде всего, для сейсморазведки.

Благодарности

Авторы благодарны Е.А. Ушакову за помощь в сборке опытных образцов и заполнение их рабочей жидкостью. Также авторы признательны С.Ю. Авдюхиной за изготовление на 3D принтере деталей для сборки экспериментальных образцов.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансировании Российским научным Фондом проект № 22-19-00211.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D. Yang, X. Wang, J. Sun, H. Chen, Ju, L. Chenhao, L. Tingting, T. Baofeng, F. Zhen. *Micromachines*, **12** (9), (2021).
- [2] V. Potylitsyn, D. Kudinov, D. Alekseev, E. Kokhonkova, S. Kurkov, I. Egorov, A. Pliss. *Sensors*, **21** (7), (2021).
- [3] A. Krylov, I. Egorov, S. Kovachev, D. Ilinskiy, O. Ganzha, G. Timashkevich, K. Roginskiy, M. Kulikov, M. Novikov, V. Ivanov, E. Radiuk, D. Rukavishnikova, A. Neeshpapa, G. Velichko, L. Lobkovsky, I. Medvedev, I. Semiletov. *Sensors*, **21** (12), (2021).
- [4] B. Liu, J. Wang, D. Chen, T. Liang, C. Xu, W. Qi, X. She, V. Agafonov, A. Shabalina, J. Chen. *IEEE Sens. J.*, **21** (19), 21305 (2021).
- [5] B. Liu, J. Wang, D. Chen, J. Chen, T. Liang, W. Qi, X. Zheng, X. She. *IEEE Sens. J.*, **21** (14), 15972 (2021).
- [6] Y.K. Cheung, H. Yu. *IEEE Sens. J.*, **21** (19), 21322 (2021).
- [7] D. Zaitsev, V. Agafonov, E. Egorov, S. Avdyukhina. *Broadband MET Hydrophone in EAGE Conference & Exhibition 2018*, 11–14 June 2018 (Copenhagen, Denmark, 2018)
- [8] D.L. Zaitsev, S.Y. Avdyukhina, M.A. Ryzhkov, I. Evseev, E.V. Egorov, V.M. Agafonov. *J. Sens. Sens. Syst.*, **7**, 1 (2018).
- [9] I. Egorov, A. Bugaev, D. Chikishev. *Strong motion molecular-electronic accelerometer*, in *International Multidisciplinary Scientific Geo Conference Surveying Geology and Mining Ecology Management (SGEM, 2019)*, v. 19, № 1.1, p. 959–966.
- [10] D. Zaitsev, E. Egor, A. Shabalina. *High resolution miniature MET sensors for healthcare and sport applications*, in *Proceedings of the International Conference on Sensing Technology (ICST, 2019)*, v. 2018-Decem, p. 287–292.
- [11] V. Agafonov, I. Kompaniets, B. Liu, J. Chen. *Micromachines*, **13** (2), (2022).
- [12] A. Krylov, I. Egorov, S. Kovachev, D. Ilinskiy, O. Ganzha, G. Timashkevich, K. Roginskiy, M. Kulikov, M. Novikov, V. Ivanov, E. Radiuk, D. Rukavishnikova, A. Neeshpapa, G. Velichko, L. Lobkovsky, I. Medvedev, I. Semiletov. *Sensors*, **21** (12), (2021).
- [13] W. Qi, B. Liu, T. Liang, J. Chen, D. Chen, J. Wang. *Micromachines*, **12** (10), (2021).
- [14] Y. Hou, R. Jiao, H. Yu. *Sensors Actuators, A Phys.*, **318**, 112498 (2021).
- [15] L. Sobisevich, V. Agafonov, D. Presnov, V. Gravirov, D. Likhodeev, R. Zhostkov. *Sensors (Switzerland)*, **20** (24), 1 (2020).
- [16] C. Nunn, R. Garcia, Y. Nakamura, M. Angela, T. Kawamura, D. Sun, L. Margerin, R. Weber, M. Drilleau, M. Wiczorek, A. Rivoldini, P. Lognonné, P. Zhu. *Space Sci. Rev.*, **216** (5), (2020).

- [17] D. Presnov, A. Sobisevich, P. Gruzdev, V. Ignatievc, A. Kon'kov, A. Moreev, A. Tarasov, A. Shuvalov, A.S. Shurup. *Acoust. Phys.*, **65** (5), 593 (2019).
- [18] А.В. Череповский, М.Т. Абдулвалиев, А.П. Тиссен, В.М. Толкачев. *Приборы и системы разведочной геофизики*, **3** (66), 46 (2020).
- [19] Ю.Г. Ерофеев, В.М. Агафонов, А.Г. Казанин, Д.Г. Куома, С.О. Базилевич, А.А. Чижиков, С.А. Прилипко, В.В. Ланцев, А.П. Демонов, А.В. Литвачук, Г.Г. Луковников, А.В. Зиборов, И.Н. Долотказин, Е.А. Кошелев. *Нефть. Газ. Новации*, **10** (251), 23 (2021).
- [20] J. Stefano, L. Orzari, H. Silva-Neto, V. de Ataíde, L. Mendes, W. Coltro, C. Longo, R. Thiago, C. Bruno. *Curr. Opin. Electrochem.*, **32**, 100893 (2022).
- [21] C. Xu, J. Wang, D. Chen, J. Chen, W. Qi, B. Liu, X. She. *Proc. IEEE Int. Conf. Micro Electro Mech. Syst.*, **2021** (1), 378 (2021).
- [22] W. Qi, C. Xu, B. Liu, X. She, T. Liang, D. Chen, J. Wang, J. Chen. *Micromachines*, **12** (6), (2021).
- [23] X. She, J. Wang, D. Chen, J. Chen, C. Xu, W. Qi, B. Liu, T. Liang. *Sensors (Switzerland)*, **21** (3), 1 (2021).
- [24] B. Liu, J. Wang, D. Chen, J. Chen, T. Liang, W. Qi, X. Zheng, X. She. *IEEE Sens. J.*, **20** (18), 10469 (2020).
- [25] M. Ryzhkov, V. Agafonov. *Sensors (Switzerland)*, **20** (18), 1 (2020).
- [26] X. Zheng, D. Chen, J. Wang, J. Chen, C. Xu, W. Qi, B. Liu. *Sensors (Switzerland)*, **19** (18), (2019).
- [27] V. Krishtop, D. Zhevnenko, E. Gornev, S. Vergeles, A. Bugaev, V. Popov, P. Dudkin, S. Kohanovsky, T. Krishtop. *Adv. Mater. Proc.*, **4** (1), 3 (2019).
- [28] L. Chen, Z. Sun, G. Li, D. Chen, J. Wang, J. Chen. *Sensors (Switzerland)*, **18** (4), (2018).
- [29] G. Li, Z. Sun, J. Wang, D. Chen, J. Chen, L. Chen, C. Xu, W. Qi, Y. Zheng. *Sensors (Switzerland)*, **18** (4), (2018).
- [30] A. Bugaev, A. Antonov, V. Agafonov, K. Belotelov, S. Vergeles, P. Dudkin, E. Egorov, I. Egorov, D. Zhevnenko, S. Zhabin, D. Zaitsev, T. Krishtop, A. Neeshpapa, V. Popov, V. Uskov, A. Shabalina, V. Krishtop. *J. Commun. Technol. Electron.*, **63** (12), 1339 (2018).
- [31] B. Liu, J. Wang, D. Chen, T. Liang, C. Xu, W. Qi, X. She, V. Agafonov, A. Shabalina, J. Chen. *IEEE Sens. J.*, **21** (19), 21305 (2021).
- [32] V. Krishtop, V. Agafonov, A. Bugaev. *Russ. J. Electrochem.*, **48** (7), 746 (2012).
- [33] А.Н. Григин, А.Д. Давыдов. *Электрохимия*, **35** (3), 305 (1999).
- [34] V.M. Agafonov, V.A. Agafonova, I.V. Egorov. *IEEE Sensors Lett.*, **8** (3), 1 (2024).
- [35] Электронный ресурс. G-MARK 100. Режим доступа: <https://g-mark.ru/catalog/lazernye-markiratory/g-mark-100/>
- [36] Электронный ресурс. Unimarker. Режим доступа: <https://unilaser.ru/unimarker>
- [37] Электронный ресурс. Polymer Pastes for Fiberglass and Hardened Paper Substrates. Режим доступа: <http://depa.ru/ptsp.htm>
- [38] A. Bugaev, V. Agafonova, I. Egorov, E. Agafonova, S. Avdyukhina. *Micromachines*, **13** (3), 360 (2022).
- [39] Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.ni.com/ru-ru/shop/model/usb-6215.html>
- [40] E. Anikin, E. Egorov, V. Agafonov. *IEE Sensors Lett.*, **2** (2), 1 (2018).
- [41] V. Agafonov, I. Kompaniets, B. Liu, J. Chen. *Micromachines*, **13** (153), (2022).