

# РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОВ И ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПЛЕНКИ ИЗ СОПОЛИМЕРА ВИНИЛИДЕНФТОРИДА

**В.А. Шабанов, И.А. Селезнев**

Описаны разработанные технологические решения для получения пьезоактивной пленки толщиной до 180 мкм из сополимера винилиденфторида (ПВДФ) марки Ф-2МЭ отечественного изготовления и электроакустических преобразователей (ЭАП) на её основе. Технология изготовления пьезоактивной пленки включает стадии ориентационной вытяжки экструзионной пленки ПВДФ и её поляризации в поле коронного разряда. Рассмотрены основные критерии выбора методов и технологических режимов изготовления пьезоактивной пленки ПВДФ, позволившие добиться её высоких пьезоэлектрических характеристик, сохраняющихся в широком диапазоне температур. Определена предпочтительная с точки зрения применения в составе гидроакустических приборов конструкция объемно-чувствительного ЭАП, состоящая из плоских активных элементов в виде многослойных пакетов пьезоактивной пленки, соединенных электрически последовательно. Необходимые чувствительность и электрофизические характеристики преобразователя могут обеспечиваться путем регулирования числа активных элементов и числа пьезоактивных слоев в них. Электрический и механический контакты слоев в активном элементе осуществляются при помощи тонких слоев токопроводящего полимерного клея, что позволяет получать конструкции на основе пьезоактивной пленки без токопроводящего покрытия на её поверхности. Это существенно упрощает технологию изготовления преобразователей, а также дает возможность создавать активные элементы любой конфигурации путем их раскроя из больших заготовок методами механической и гидроабразивной резки. Приведены характеристики полученной пьезопленки и изготовленных на ее основе ЭАП.

**Ключевые слова:** пьезопленка ПВДФ, электроакустический преобразователь.

До настоящего времени для электромеханического преобразования в составе гидроакустических приборов в основном применяются пьезокерамические элементы на основе составов ЦТСНВ-1, ЦТБС-3. Среди преимуществ пьезокерамики необходимо отметить высокие значения её электрофизических и пьезоэлектрических характеристик, высокую устойчивость пьезоэлементов к механическим и температурным воздействиям, а также сохраняемость их пьезоактивности в течение длительного времени. Это позволяет конструировать на их основе эффективные гидроакустические преобразователи и приборы, давно и с успехом применяемые на носителях различного назначения.

Однако для решения современных задач, в частности создания широкоапертурных бортовых гидро-

акустических антенн, в том числе для необитаемых подводных аппаратов, требуется разработка новых конструкций с улучшенными массо-габаритными характеристиками, улучшенной устойчивостью к гидродинамической помехе. В качестве перспективного направления рассматривается разработка и создание гидроакустических бортовых антенн в виде тонких и легких покровных модулей, позволяющих обеспечить формирование антенн различной площади при использовании единой технологии построения самих модулей. При этом для снижения уровня отраженного сигнала при воздействии гидролокационного сигнала целесообразно применять в составе их конструкций материалы с улучшенным согласованием с водной средой, а для снижения восприимчивости антенн к гидродинамической помехе – добиваться

максимального заполнения площади их апертуры активным материалом [1, 2].

Учитывая особенности классических технологий изготовления керамических пьезоэлементов, а также известные принципы построения преобразователей на их основе, создание тонких плоских конструкций при использовании пьезокерамики сопряжено с существенными техническими трудностями или вовсе невозможно. При этом высокая плотность применяемых керамических составов, в случае сплошного заполнения апертуры, приведет к значительному увеличению массы антенн, а также увеличению отраженного сигнала.

Таким образом, становится актуальной разработка технологий создания пьезоэлементов из пьезоэлектриков с принципиально отличающимися от пьезокерамики характеристиками, а также разработка конструкций и технологий изготовления преобразователей с их использованием.

В качестве одного из материалов для построения антенн новых конструкций с улучшенными характеристиками целесообразно рассматривать пьезоактивную пленку из сополимеров винилиденфторида.

Поливинилиденфторид (ПВДФ) появился на мировом рынке в начале 60-х годов и первоначально применялся для изготовления упаковочных пленок и защитных покрытий. Впервые пьезоэффект в пленках ПВДФ был обнаружен японскими исследователями в 1969 г. [1]. С этого момента за рубежом активно велись исследования по созданию пьезоактивных пленок ПВДФ, и на их основе – различных гидроакустических приборов.

На рис. 1 показан процесс монтажа на борт носителя покровной гидроакустической антенны разработки фирмы TUSL [3].



Рис. 1. Бортовая антенна на основе ПВДФ разработки фирмы TUSL

Возможности создания на основе пьезоактивной пленки пьезоэлементов сложной конфигурации реализованы в конструкции многолучевого эхолота разработки AIRMAR, представленного на рис. 2. В этом случае вытянутая форма плоского преобразователя в виде веретена способствует подавлению добавочных максимумов характеристики направленности каждого акустического канала и улучшению точности отображения рельефа дна [4].

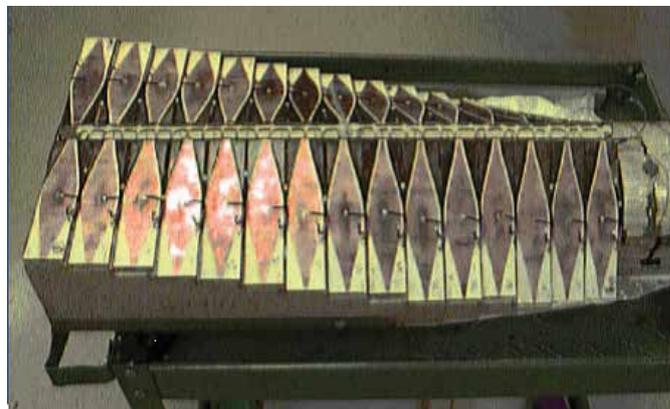


Рис. 2. Многолучевой эхолот на основе пьезоэлементов из пленки

#### ■ ПВДФ сложной формы производства AIRMAR Technology Corporation

Благодаря выраженной осевой анизотропии пьезохарактеристик поляризованной пленки ПВДФ из нее сравнительно несложно формировать объемно-чувствительные датчики в виде тонких многослойных конструкций большой площади. Такие конструкции не содержат воздушных полостей, что обеспечивает их высокую устойчивость к воздействию гидростатического давления. Путем формирования преобразователей с различным числом слоев пьезоактивного материала и комбинирования их последовательного и параллельного электрического соединения возможно в широких пределах регулировать их чувствительность и электрофизические характеристики. Гибкость пленки и её высокая устойчивости к механическим нагрузкам значительно уменьшают технологические ограничения при создании конструкций сложной конфигурации и большой площади, что позволяет добиваться максимального заполнения площади преобразователя активным материалом. При этом однородная восприимчивость по площади объемно-чувствительного датчика к воздействию акустического давления, в отличие от изгибных конструкций преобразователей, также должна способствовать эффективному усреднению гидродинамических помех.

Следует отметить высокую гидролитическую устойчивость ПВДФ и его низкую паропроницаемость. Это позволяет применять пленки на его основе без их тщательной защиты от водной среды, что, как правило, сопряжено с существенным усложнением конструкции и увеличением размеров преобразователей.

Один из возможных вариантов поставочного модуля для формирования плоских конструкций широкоапертурных антенн представлен на рис. 3.

Показанная конструкция состоит из плоских тонких электроакустических преобразователей, установленных в два ряда, что позволяет применять гидроакустические модули на борту носителя без гидроакустического экрана. Сплошное расположение преобразователей должно существенно уменьшить восприимчивость антенны к гидродинамической помехе. Малая толщина и малый вес конструкции позволяют применять поставочные модули для формирования антенн большой площади на борту различных носителей, в том числе необитаемых подводных аппаратов.

В России исследования по разработке чувствительных элементов из пленок ПВДФ и преобразователей на их основе проводились с 80-х до 2000-х годов. В результате проведенных в указанный период исследований был разработан сополимер винилиденфторида и тетрафторэтилена марки Ф-2МЭ, на основе которого были получены образцы пьезоактивной пленки толщиной до 100 мкм.

В отличие от других фторированных полимеров отечественного изготовления основным элементом технологии синтеза Ф-2МЭ является оригинальная иницирующая система, которая обеспечивает высокое значение его удельного объемного электрического сопротивления и соответственно способность пленки на его основе удерживать на поверхности значительный электрический потенциал. При этом высокое содержание в сополимере полярной  $\beta$ -кристаллической фазы и его температурно-механические свойства позволяют обеспечивать высокие значения пьезохарактеристик пленки и их сохраняемость при воздействии повышенных температур.

В то же время проводились исследования с целью разработки конструкций и технологии изготовления

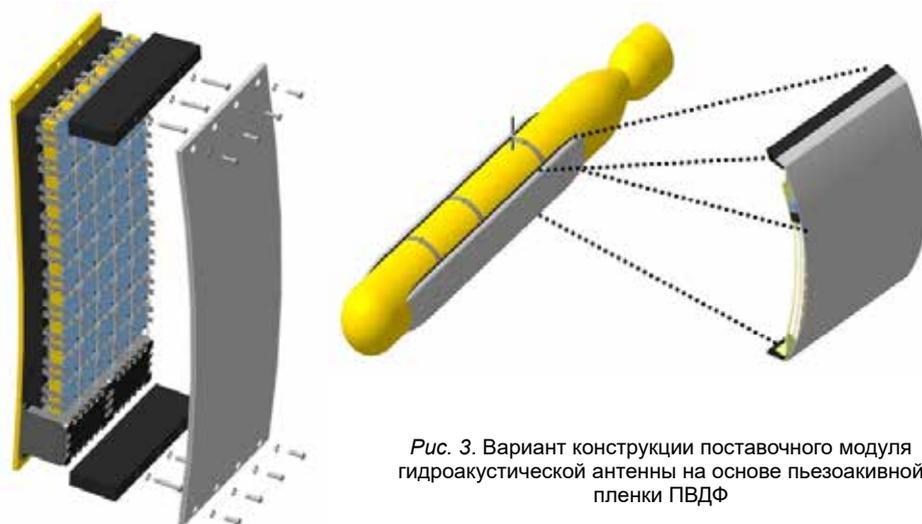


Рис. 3. Вариант конструкции поставочного модуля гидроакустической антенны на основе пьезоактивной пленки ПВДФ

многослойных преобразователей из пьезоактивной пленки. Однако в 2000 г. работы в этой области были остановлены в связи с прекращением их финансирования. Полученные технологические решения по изготовлению пьезоактивной пленки и преобразователей на её основе были утеряны.

Учитывая перспективность создания гидроакустических приборов на основе пьезоактивных элементов большой площади, АО «Концерн «Океанприбор», начиная с 2015 г., продолжил исследования с целью разработки технологических решений для изготовления пьезоактивной пленки из ПВДФ и тонких объемно-чувствительных электроакустических преобразователей (ЭАП) на её основе.

Вариант конструкции, принятый как оптимальный для разработки технологических решений построения многослойных плоских преобразователей, схематично представлен на рис. 3.

Преобразователь состоит из двух активных элементов в виде пакетов пьезоактивной пленки, соеди-

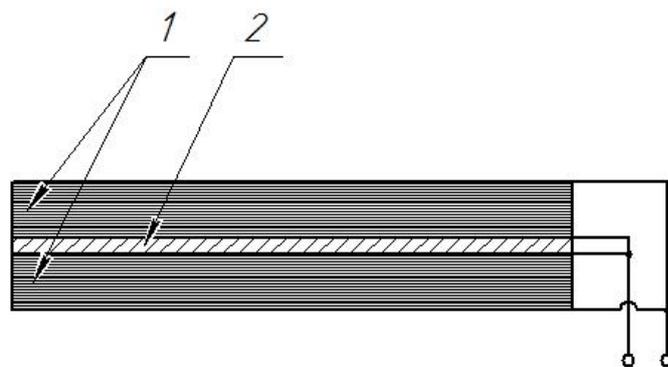


Рис. 4. Многослойный объемно-чувствительный электроакустический преобразователь: 1 – активный элемент из нескольких слоев пьезоактивной пленки ПВДФ; 2 – несущая пластина

ненных электрически параллельно. Слои пленки в пакете соединены электрически последовательно.

Статическая чувствительность такого преобразователя определяется соотношением:

$$\gamma = \frac{d_v \cdot h_{nl} \cdot n}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0},$$

где  $d_v = \sum_{i=1}^3 d_{3i}$  – объемный пьезоэлектрический модуль, Кл/Па;

$\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость ПВДФ;

$\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума;

$h_{nl}$  – толщина пьезоактивной пленки, м;

$n$  – число слоев пьезоактивной пленки.

Электрическая емкость преобразователя, очевидно, определяется соотношением:

$$C = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \frac{S \cdot N}{h_{nl} \cdot n},$$

где  $S$  – площадь активной части преобразователя, м<sup>2</sup>;

$N$  – число активных элементов, соединенных электрически параллельно.

Из показанных соотношений видно, что необходимые чувствительность и электрофизические характеристики преобразователя могут обеспечиваться путем регулирования числа пакетов и числа пьезоактивных слоев в них.

Показанная последовательность соединения слоев в конструкции преобразователя обусловлена очевидными технологическими трудностями при формировании большого числа узлов параллельного монтажа в многослойном пакете, а также необходимостью обеспечения их надежности в условиях эксплуатации в водной среде. В этом случае активные элементы можно рассматривать как базовые конструкции для построения преобразователей различной конфигурации и с различными характеристиками. Таким образом, при создании технологии изготовления преобразователя представляется целесообразным в первую очередь решать отдельную задачу разработки гибких технологий для формирования активных элементов различных размеров и конфигурации в виде конструкций из регулируемого числа последовательно соединенных слоев пьезоактивной пленки ПВДФ. Очевидно, что такие базовые элементы представляют собой укрупненный вариант пьезоактивной пленки и необходимость их создания обусловлена технологическими ограничениями при изготовлении пленки эквивалентной толщины. При этом создание элементов из большого числа тонких пьезоактивных слоев помимо трудоемкости технологических процессов сопряжено со сложностью

обеспечения равномерной толщины и механических свойств клеевых соединений, что необходимо для создания преобразователей с воспроизводимыми характеристиками. Поэтому помимо обеспечения высокой пьезоактивности одной из основных задач исследований являлась разработка технологии изготовления пьезоактивной пленки максимальной толщины.

Таким образом, для достижения цели разработки технологий изготовления ЭАП на основе пьезоактивной пленки ПВДФ решались следующие задачи:

- разработка технологии изготовления пьезоактивной пленки на основе ПВДФ максимальной толщины на основе фторопласта отечественной марки Ф-2МЭ;

- разработка технологии изготовления активных элементов из нескольких последовательно электрически соединенных слоев пьезоактивной пленки ПВДФ как базовых элементов для построения ЭАП различных конструкций;

- разработка конструкций, изготовление и исследование ЭАП на основе активных элементов для проверки качества полученных технологических решений.

В результате проведенных исследований разработана технология изготовления пьезоактивной пленки из экструзионной пленки Ф-2МЭ, включающая стадии ориентационной вытяжки экструзионной пленки Ф-2МЭ и её последующей поляризации в поле коронного разряда.

Основное назначение ориентационной вытяжки пленки ПВДФ состоит в переформировании надмолекулярной структуры полимера для увеличения содержания в нем полярной  $\beta$ -кристаллической фазы, которая является основным компонентом полимерной структуры, определяющим пьезоактивность пленки после её поляризации. Перестроение кристаллической структуры из неполярной  $\alpha$ -конформации в полярную  $\beta$ -конформацию происходит при ориентации молекул полимера вдоль ориентирующего механического воздействия [5].

Решение задачи разработки технологии ориентационной вытяжки экструзионной пленки Ф-2МЭ заключалось в определении оптимальных технологических режимов её растяжения (температуры, скорости и степени ориентационной вытяжки).

Режимы растяжения пленки подбирали исходя из положения, что температура и скорость растяжения должны обеспечивать формирование в пленке механических напряжений, необходимых для осуществления эффективного перехода структуры полимера из неполярных аморфной и  $\alpha$ -кристаллической фазы

в полярную  $\beta$ -фазу, при этом в процессе растяжения не должно происходить выраженной деструкции полимерных молекул и образования в пленке разрывов и микропустот.

При проведении исследований отмечено, что растяжение пленки до больших значений её деформации приводит к значительному изменению её прочностных характеристик в направлении, перпендикулярном ориентации, и уменьшению устойчивости к механическим напряжениям, возникающим при воздействии на неё поляризующего напряжения. Таким образом, оптимальная степень ориентационной вытяжки определялась исходя из максимальной эффективности кристаллического переформирования полимера с учетом изменения её прочности.

Полученная в соответствии с разработанными режимами ориентированная пленка толщиной до 180 мкм не содержит дефектов и обладает хорошей электрической и механической прочностью, что позволяет добиваться высоких значений пьезохарактеристик.

При выборе метода поляризации ориентированной пленки в поле коронного разряда разработчики в первую очередь руководствовались его технологичностью для изготовления пьезоактивной пленки большой площади. В отличие от метода контактной поляризации, когда электрическое напряжение прикладывается к пленке при механическом контакте электродов и её поверхности, в случае воздействия на пленку коронного разряда мощность электрического разряда при её электрическом пробое существенно меньше. При этом возникновение разряда не приводит к выгоранию пленки по большей её площади и не требует прекращения процесса дальнейшей поляризации.

В результате проведенных исследований создана лабораторная установка поляризации пленки ПВДФ в поле коронного разряда, а также определены технологические режимы процесса поляризации: напряженность поляризующего электрического поля, температура поляризации, время выдержки в электрическом поле.

Характеристики пьезоактивной пленки, полученной в соответствии с разработанными процессами, представлены в табл. 1.

Размер полученных образцов пьезоактивной пленки может быть увеличен при масштабировании разработанных установок ориентационной вытяжки пленки ПВДФ [6] и поляризации без изменения технологических режимов и исполнения технологических операций.

Электрический потенциал при поляризации выбранным методом формируется на поверхности пленки под действием коронного разряда, что не требует предварительного нанесения на поверхность пленки каких-либо токопроводящих покрытий. Полученная таким образом пьезоактивная пленка представлена на рис. 4.

Также в рамках проведенных работ разработаны технологические режимы магнетронного напыления в вакууме на поверхность поляризованной пленки



Рис. 5. Пьезоактивная пленка из ПВДФ марки Ф-2МЭ

Таблица 1. Характеристики пьезоактивной пленки на основе ПВДФ марки Ф-2МЭ

| Характеристика   | Ед. изм.          | Значение      |
|--|-------------------|---------------|
| Относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$           | -                 | 12,5–13       |
| Тангенс угла диэлектрических потерь ( $tg \delta$ )                                | -                 | 0,014         |
| Плотность  | г/см <sup>3</sup> | 1,8           |
| Пьезомодуль $d_{33}$   | пКл/Н             | 32            |
| Пьезомодуль $d_{32}$   | пКл/Н             | 2–3           |
| Пьезомодуль $d_{31}$   | пКл/Н             | 21            |
| Объемный пьезомодуль $d_v$   | пКл/Н             | 8-9           |
| Модуль упругости в направлении ориентационной вытяжки (при 25 °С)                  | ГПа               | 2,0           |
| Модуль упругости в направлении перпендикулярном ориентационной вытяжке (при 25 °С) | ГПа               | 1,8           |
| Диапазон предельных температур сохраняемости пьезохарактеристик.                   | °С                | минус 50 – 70 |
| Толщина  | мкм               | до 180        |
| Размеры, ширина /длина   | мм                | до 120/250    |



Рис. 6. Пьезоактивная пленка из ПВДФ марки Ф-2МЭ с металлическим токопроводящим покрытием

металлического покрытия на основе сплава алюминия. Внешний вид поляризованной пленки с металлическим токопроводящим покрытием представлен на рис. 5.

Пьезоактивная пленка после её металлизации не изменяет своих пьезохарактеристик, покрытие обладает хорошей прочностью контакта с поверхностью пьезоактивной пленки (в соответствии с результатами проведенных измерений значение прочности соединения при нормальном отрыве составляет 10,5 МПа).

Основными проблемами при разработке технологических методов изготовления многослойного преобразователя являлись: устойчивость конструкции при её длительной эксплуатации в водной среде, необходимость обеспечения последовательного электрического контакта между слоями пьезоактивной пленки без нарушения плоской конфигурации конструкции, обеспечение малой толщины и прочности клеевого соединения слоев пленки и соответственно прочности конструкции.

Актуальность проблемы устойчивости конструкции к воздействию воды наглядно демонстрируют результаты проведенных испытаний макетов преобразователей, изготовленных из нескольких слоев пленки Ф-2МЭ с металлическим покрытием. Слои пленки склеивали эпоксидным клеем. Макеты изготавливали без гидроизолирующих слоев. Таким образом, водная среда воздействовала непосредственно на границы клеевых соединений пьезоактивных слоев. Установлено, что даже кратковременное воздействие воды приводит к существенному уменьшению прочности клеевого соединения и его разрушению при незначительных нагрузках. При этом разрушение клеевого соединения происходит по границе контакта пленки и покрытия металла. По всей видимости, это можно объяснить воздействием расклинивающего давления воды при её проникновении между полярированными поверхностями металла и ПВДФ.

Таким образом, обеспечение прочности и надежности преобразователей на основе металлизированной пьезоактивной пленки при их эксплуатации в водной среде возможно только при наличии их надежной и паронепроницаемой гидроизоляции, что может существенно усложнить конструкцию преобразователя. С точки зрения обеспечения долговечности и надежности гидроакустического оборудования представляется целесообразным создание многослойных активных элементов на основе пьезоактивной пленки без металлического покрытия. Один из возможных вариантов



Рис. 7. Активный элемент на основе пьезоактивной пленки Ф-2МЭ

конструкции такого элемента представлен на рис. 7.

Показанный активный элемент представляет собой пакет из нескольких слоев пьезоактивной пленки Ф-2МЭ (без металлического токопроводящего покрытия), склеенных между собой сплошным слоем токопроводящей клеевой композиции. При этом клеевой слой обеспечивает механическое и электрическое соединение пьезоактивных слоев. По двум сторонам пакета, а также на токопроводящий клей наклеены армирующие электроды в виде металлических пластин.

Для склеивания многослойных активных элементов разработан токопроводящий клеевой состав ЭКН-Т на основе эпоксидного связующего и углеродного наполнителя. Технологические характеристики клея позволяют производить его нанесение на поверхность пленки ПВДФ методами пневматического напыления, что позволяет получать сплошной тонкий клеевой слой (толщиной от 15 мкм). Выбор наполнителя обусловлен его незначительной активностью при взаимодействии с водой, а также низкой стоимостью по сравнению с дисперсными коррозионноустойчивыми металлическими наполнителями – серебро, медь с покрытием серебра и пр.

Также разработан метод склеивания многослойных конструкций, позволяющий обеспечить тонкие сплошные клеевые соединения пьезоактивных слоев, распределенные по всей площади активного элемента [7]. Характеристики клеевых слоев на основе разработанной композиции, сформированные в соответствии с разработанным методом, представлены в табл. 2.

Значения адгезионной прочности отвержденной композиции к поверхности пьезоактивной пленки Ф-2МЭ превосходят значения адгезионной прочности токопроводящих покрытий меди и сплава алюминия.

Отвержденный клей ЭКН-Т обладает значительно меньшим удельным значением электрической проводимости по сравнению с металлическими покрытиями. Однако, учитывая малую толщину клеевого слоя в активном элементе, электрическое сопротивление контакта между пьезоактивными слоями невелико. При этом сложение электрического сигнала по площади активного элемента осуществляется за счет высокой электропроводности армирующих электродов. Эффективность электрического соединения пьезоактивных слоев подтверждается низкими значениями тангенса угла электрических потерь.

Таким образом, разработанная технология не требует применения дорогостоящей и трудоемкой стадии металлизации пьезоактивной пленки. Наличие распределенного по всей площади слоя электрического контакта делает возможным изготовление активных элементов необходимого размера и конфигурации путем раскроя больших заготовок. Это снижает требования к точности выполнения технологических операций при склеивании пьезоактивных слоев и увеличивает возможности автоматизации технологических процессов. Экспериментально подтверждено, что изготовленные макеты можно обрабатывать фрезерованием по торцу, а также подвергать гидроабразивной резке без разрушения клеевых соединений и нарушения последовательности электрического соединения слоев.

**Таблица 2. Характеристики токопроводящего клея ЭКН-Т и токопроводящих покрытий ЧЭ, разработанных в проекте «КОРСАР»**

| Характеристика   | ЭКН-Т | Покрывтие меди       | Покрывтие АМГ-6      |
|--|-------|----------------------|----------------------|
| Адгезионная прочность к поверхности пьезоактивной пленки Ф-2МЭ, МПа              | 20,8  | 13,0                 | 10,5                 |
| Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·м                              | 0,017 | $1,72 \cdot 10^{-8}$ | $6,73 \cdot 10^{-8}$ |
| Тангенс угла диэлектрических потерь активного элемента из пьезослоев с покрытием | 0,015 | 0,014                | 0,014                |

При создании конструкций гидроакустических преобразователей и антенн малой толщины одной из основных проблем становится необходимость

обеспечения их долговечности при длительной эксплуатации в водной среде с учётом ограничений толщины их гидроизолирующих слоев. Таким образом, основным вопросом долговечности разрабатываемых конструкций становится устойчивость пьезоактивной пленки и активных элементов на её основе к воздействию воды, продиффундировавшей через слой гидроизоляции. При этом возможны три варианта причин выхода из строя активного элемента: существенное уменьшение пьезоактивности пленки Ф-2МЭ при длительном воздействии воды; разрушение клеевых соединений слоев активного элемента; образование по границе контакта торца активного элемента и герметизирующего слоя пленки воды, что может привести к образованию непосредственного электрического контакта между электропроводными слоями клея и, как следствие, нарушению последовательного соединения пьезоактивных пленок в активном элементе.

Устойчивость пьезохарактеристик поляризованной пленки к воздействию воды подтверждена экспериментально путем выдержки образцов пленки в дистиллированной воде в течение 6 месяцев, что не привело к существенному изменению их пьезоактивности, в частности изменение значений их пьезомодуля составило не более 1-2 пКл/Н при начальных значениях 31-34 пКл/Н.

Для оценки устойчивости клеевых соединений ЭКН-Т к воздействию воды изготовленные активные элементы выдерживали в дистиллированной воде в течение 110 суток. У исследованных элементов не установлено заметных дефектов клеевых соединений, а также изменения их электрической емкости и тангенса угла диэлектрических потерь, что говорит об отсутствии скрытых участков разрушения клеевого контакта и о сохранении электрофизических характеристик клея.

Задача электрической изоляции токопроводящих слоев может быть решена при обеспечении надежного адгезионного контакта гидроизолирующего слоя ЭАП к поверхности торца активного элемента. Действительно, выдержка макета активного элемента после лакирования поверхности его торцов эпоксидной композицией в дистиллированной воде в течение 150 суток не привела к изменению его емкости. Неизменное значение электрической емкости свидетельствует об отсутствии конденсированной воды под тонким слоем лака и, как следствие, о сплошности его контакта с торцевой поверхностью активного элемента.

Устойчивость разработанных активных элементов к воздействию воды позволяет формировать на



Рис. 8. Вариант исполнения ЭАП на основе пьезоактивной пленки Ф-2МЭ.

их основе тонкие и надежные при эксплуатации в водной среде конструкции ЭАП без использования сложных узлов герметизации. Пример подобной конструкции представлен на рис. 8.

Характеристики изготовленных ЭАП показанного варианта конструкции представлены в табл. 3.

Таблица 3. Характеристики ЭАП изготовленных на основе пьезоактивной пленки Ф-2МЭ

| Характеристика   | Ед. изм. | Значение      |
|--|----------|---------------|
| Размеры ЭАП длина/ширина/толщина                                 | мм       | 120/120/6     |
| Размеры слоя активного материала длина/ширина                    | мм       | 90/90         |
| Рабочий диапазон частот  | Гц       | до 8000       |
| Электрическая емкость  | нФ       | 1             |
| Тангенс угла диэлектрических потерь ( $tg \delta$ )              | -        | 0,014         |
| Диапазон предельных температур сохраняемости пьезохарактеристик. | °С       | минус 50 – 70 |
| Толщина  | мм       | до 10         |
| Размеры, ширина /длина   | мм       | до 120/250    |

На рис. 9 показана амплитудно-частотная характеристика чувствительности изготовленного ЭАП.

Как показывают результаты проведенных измерений, изготовленные ЭАП обладают высокой чувствительностью и равномерной амплитудно-частотной зависимостью в широком диапазоне частот.

Таким образом, в результате проведенных работ разработана технология изготовления образцов пьезоактивной пленки на основе ПВДФ отечественного

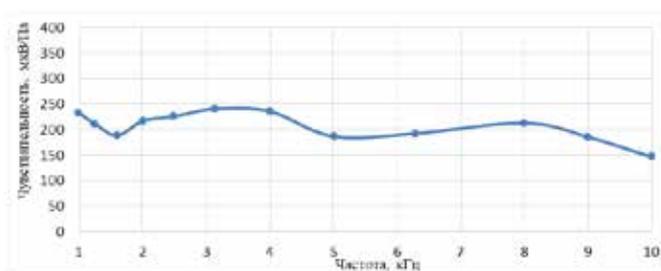


Рис. 9. АЧХ чувствительности ЭАП

производства марки Ф-2МЭ толщиной до 180 мкм с хорошими пьезохарактеристиками, сохраняющимися в широком диапазоне температур.

Разработанные технологические решения позволяют создавать активные элементы в виде пакетов из нескольких слоев пьезоактивной пленки, соединенных электрически последовательно. При этом пьезоактивные слои склеиваются между собой полимерной токопроводящей клеевой композицией и для изготовления активных элементов не требуется предварительное нанесение на поверхность пьезоактивной пленки токопроводящего покрытия, что существенно упрощает технологию ее изготовления.

Активные элементы могут быть изготовлены различной формы и с любым числом пьезоактивных слоев для решения конкретных задач без необходимости переориентирования производства.

Сохраняемость характеристик пленки и активного элемента при непосредственном воздействии на них водной среды позволяет создавать на их основе гидроакустические приборы малой толщины при сравнительно малых толщинах гидроизолирующих слоев.

На основе разработанных активных элементов изготовлены электроакустические преобразователи малой толщины. Результаты исследований электроакустических преобразователей показали высокие значения их чувствительности и её равномерную амплитудно-частотную характеристику в широком диапазоне частот, что может рассматриваться как подтверждение эффективности разработанных технологических методов.

Таким образом, в результате проведенных работ получены технологические решения, необходимые для изготовления ЭАП на основе пьезоактивной пленки из фторопласта Ф-2МЭ отечественного производства, которые могут применяться для создания гидроакустических антенн малой толщины и массы, с высоким заполнением площади их апертуры активным материалом.

Проект «Корсар» выполнен при поддержке Фонда перспективных исследований.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шатохин А.В., Полканов К.И., Жуков В.Б., Селезнев И.А. Концепции проектирования современных гидроакустических антенн ВМФ // Морская радиоэлектроника. 2017. № 2(60). С. 26–28.
2. Жуков В.Б., Катунин А.А., Селезнев И.А. Гидроакустические преобразователи на основе перспективных пьезоматериалов // Труды XIV Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» СПб: СПб научный центр РАН, 2018. С. 11–17.
3. ВМС и кораблестроение: Дайджест зарубежной прессы [Текст] / под ред. В. М. Пашина. СПб.: ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 2006. Вып. 44. 145 с.
4. ВМС и кораблестроение Дайджест зарубежной прессы [Текст] / под ред. В. С. Никитина. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2018. Вып. 85. 131 с.
5. Космынин Б.П., Гальперин Е.Л., Цванкин Д.Я. Структурные изменения при деформации поливинилиденфторида // Высокомолекулярные соединения А. 1970. Т. 12, № 6. С. 1254–1259.
6. Устройство для одноосной ориентационной вытяжки полимерной плёнки [Текст]: патент на полезную модель № 183615 Рос. Федерация: МПК: (2006.01) B29C 55/06, B 65H 23/16 / Катунин А.А., Шатохин А.В., Варламов О.С., Грозин Д.Н., Дышкин П.Н., Жуков В.Б., Захарова Е.В., Коннов Е.И., Лукьянова Н.В., Панасова Л.Г., Пантелеева О.В., Прохорова В.А., Селезнев И.А., Смирнова О.В., Шабанов В.А., Шмидт Э.Г., Шустрова В.И., Щетинина М.Г.; № 2018109381; заявл. 16.03.2018; опубл. 27.09.2018, Бюл. № 27.
7. Способ изготовления чувствительного элемента электроакустического преобразователя на основе пьезоактивной пленки из поливинилиденфторида (ПВДФ) и устройства для склейки чувствительного элемента [Текст]: патент на изобретение № 2680670 Рос. Федерация: МПК: (2006.01) H04R 31/00 / Катунин А.А., Шатохин А.В., Жуков В.Б., Коннов Е.И., Лукьянова Н.В., Петрова А.В., Селезнев И.А., Смирнова А.Н., Смирнова О.В., Морокина Н.В., Черныш О.М., Шабанов В.А., Шмидт Э.Г.; – № 2018109379; заявл. 16.03.2018; опубл. 25.02.2019, Бюл. № 6.

## Об авторах

**ШАБАНОВ Василий Алексеевич**, начальник научно-исследовательского сектора

АО «Концерн «Океанприбор»,

Адрес: г. Санкт-Петербург, Чкаловский пр. 46

**Область научных интересов:** разработка и исследования полимерных материалов для гидроакустической техники

Тел.: 8(906)264-74-12

E-mail: vasilii\_shabanov@mail.ru

**СЕЛЕЗНЕВ Игорь Александрович**, д. ф.-м. н., заместитель генерального директора

АО «Концерн «Океанприбор»,

Адрес: Санкт-Петербург, Чкаловский пр. 46

Тел.: 8(911)905-49-37

E-mail: seleznev\_i\_a@mail.ru

## Для цитирования:

Шабанов В.А., Селезнев И.А. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОВ И ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПЛЕНКИ ИЗ СОПОЛИМЕРА ВИНИЛИДЕНФТОРИДА // Подводные исследования и робототехника. 2021. №. 4(38). С. 4–14. DOI: 10.37102/1992-4429\_2021\_38\_04\_01.

