

## ПРИМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ГАЗОРАЗРЯДНОГО ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ЗАДАЧ ДЕФЕКТОСКОПИИ

© 2024 г. Д.А. Дерусова<sup>1,\*</sup>, В.О. Нехорошев<sup>1,2,\*\*</sup>, В.Ю. Шпильной<sup>1,\*\*\*</sup>, А.В. РAUT<sup>3,\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Томский политехнический университет, Россия 634028 Томск, ул. Савиных, 7

<sup>2</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия 634055 Томск, пр. Академический, 2/3

<sup>3</sup>Российский университет дружбы народов, Россия 117198 Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

E-mail: \*red@tpu.ru; \*\*nvo@lnp.hcei.tsc.ru; \*\*\*vshpilnoy@list.ru; \*\*\*\*amolvr23@gmail.com

Поступила в редакцию 17.10.2024; после доработки 28.10.2024

Принята к публикации 29.10.2024

Представлены результаты исследования газоразрядного электроакустического преобразователя, функционирующего на основе импульсного разряда в воздухе при атмосферном давлении. Рассмотрено влияние конфигурации электродной системы на акустические характеристики преобразователя. Показано, что изменение объема разрядной камеры и межэлектродного зазора преобразователя оказывают значительное влияние на интенсивность излучения. Выявлены особенности, возникающие при использовании электроакустических преобразователей открытого и закрытого типов в задачах дефектоскопии. Показано, что газоразрядный электроакустический преобразователь открытого типа является достаточно мощным широкополосным источником сигнала возбуждения и имеет перспективы применения в неразрушающем контроле. Газоразрядный электроакустический преобразователь закрытого типа имеет преимущества при исследовании изделий с особыми требованиями к чистоте поверхности или величине прикладываемого внешнего электрического поля.

**Ключевые слова:** акустика, ультразвук, лазерная доплеровская виброметрия, дефектоскопия, композиционные материалы, полимерные материалы, искровой разряд, электроакустика, термоакустика, неразрушающий контроль.

## APPLICATION OF PULSE GAS-DISCHARGE ELECTROACOUSTIC TRANSDUCER FOR NONDESTRUCTIVE TESTING

© 2024 D.A. Derusova<sup>1,\*</sup>, V.O. Nekhoroshev<sup>1,2,\*\*</sup>, V.Yu. Shpil'noy<sup>1,\*\*\*</sup>, A.V. Raut<sup>3,\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Tomsk Polytechnic University, Russia 634028 Tomsk, st. Savinykh, 7

<sup>2</sup>Institute of High Current Electronics SB RAS, Russia 634055 Tomsk, Akademicheskoy Ave., 2/3

<sup>3</sup>Peoples' Friendship University of Russia, Russia 117198 Moscow, st. Miklukho-Maklaya, 6

E-mail: \*red@tpu.ru; \*\*nvo@lnp.hcei.tsc.ru; \*\*\*vshpilnoy@list.ru; \*\*\*\*amolvr23@gmail.com

This paper presents the results of a gas-discharge electro acoustic transducer of two configurations, operating on the basis of a pulsed discharge in air at atmospheric pressure. The influence of the electrode configuration on the acoustic characteristics of the transducer is considered. It is shown that a change in the volume of the discharge chamber and the inter electrode gap have a significant effect on the radiation intensity of the transducer. The features that arise when using open and closed type electro acoustic transducers in flaw detection problems are revealed. It is shown that an open type gas-discharge electroacoustic transducer is a sufficiently powerful broadband source of the excitation signal and has prospects for use in non-destructive testing. A closed type gas-discharge electroacoustic transducer has advantages when testing materials with special requirements for surface cleanliness or the magnitude of the applied external electric field.

**Keywords:** acoustics, ultrasound, laser Doppler vibrometry, flaw detection, spark discharge, electroacoustics, thermoacoustics, non-destructive testing.

DOI: 10.31857/S0130308224120034

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время технологический прогресс и развитие промышленного производства изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) имеют тенденцию к усложнению состава современных конструкционных материалов. С одной стороны, сочетание различных конструкционных компонентов позволяет оптимизировать физические свойства изделия под требуемые практические задачи, а с другой стороны, обуславливает возникновение специфических производственных и эксплуатационных дефектов. Например, в авиакосмических применениях [1–3] особое внимание уделяется использованию ПКМ для изготовления легковесных сэндвич-панелей с обшивкой из многослойного пластика. Такие конструкции способны выдержать сравнительно большие нагрузки на изгиб, а также поглощать внешние механические воздействия [4]. Однако при ударном воздействии в этих материалах

могут возникать дефекты в виде трещин, множественных расслоений, а также отслоений обшивки ПКМ от наполнителя [5—7].

При сложной форме поверхности изделия, наличии покрытий или особых требований к чистоте поверхности традиционные методы неразрушающего контроля (НК), подразумевающие непосредственное воздействие на объект исследования или размещение на нем датчиков, оказываются неприемлемы. В ряде случаев применение традиционных методов НК затруднено ввиду специфических условий проведения процедуры дефектоскопии. Сложности возникают при дефектоскопии объектов, нагретых до высоких температур, находящихся под электрическим потенциалом, механическим напряжением или давлением, вращающихся и движущихся частей механизмов. В связи с этим разработка методик контроля качества новых конструктивных материалов и изделий из них является актуальной задачей научных исследований и востребована на практике.

В последнее время особое внимание уделяется разработке бесконтактных методов НК для дефектоскопии и контроля качества изделий из ПКМ. Перспективным методом является неразрушающий контроль изделий с использованием сканирующей лазерной доплеровской виброметрии (СЛДВ) при бесконтактной акустической стимуляции материалов [8—10]. Данный подход подразумевает бесконтактное акустическое воздействие на контролируемые изделия и регистрацию свободных колебаний исследуемых образцов. Известно, что наличие дефектов в структуре материалов приводит к локальному уменьшению жесткости изделий и изменению их физических свойств [11]. При этом происходит изменение акустической характеристики всей исследуемой системы и возникают дополнительные спектральные линии, характерные для резонансных частот колебаний дефектов.

Несмотря на перечисленные преимущества, проведение неразрушающих испытаний в рамках описанного подхода имеет некоторые сложности. Во-первых, в воздушной среде происходит затухание акустических волн ультразвукового диапазона даже на небольших расстояниях от объекта (порядка нескольких сантиметров). Во-вторых, следует отметить частичное отражение вводимых акустических волн от поверхности контролируемых материалов из-за различия акустического импеданса сред. Отдельно стоит отметить, что частоты локальных резонансов подповерхностных дефектов характерных размеров порядка единиц и десятков миллиметров лежат в диапазоне частот от единиц до сотен килогерц [11—14]. Ввиду сложной структуры дефектов в ПКМ для регистрации резонансных откликов в зоне дефектов требуется применение широкополосного сигнала возбуждения. В результате формируются специфические требования к источнику возбуждения акустических волн в воздушной среде: бесконтактный излучатель должен иметь широкую полосу рабочих частот и достаточную акустическую мощность для активации локальных резонансных откликов в области дефектов.

В литературе описаны бесконтактные акустические системы на основе пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП), имеющих узкий диапазон рабочих частот [15]. На практике, для получения широкополосного сигнала используют ПЭП набор с различными частотными характеристиками [16]. При этом значительные трудности возникают с получением фазированного сигнала. Кроме того, мощность ПЭП ограничена его рабочим напряжением, следовательно, для повышения мощности приходится использовать ПЭП с большими массогабаритными показателями. Это приводит к сложностям при работе с объектами относительно небольших размеров или изделиями сложной формы.

В то же время в ряде работ показана возможность применения электрического разряда для колебаний молекул в различных средах [17], в частности генерации акустических волн в воздушной среде [18—20]. В некоторых случаях формирование акустических волн при протекании тока разряда связывают с так называемым электротермоакустическим эффектом [18]. Ранее авторами настоящей работы был предложен импульсный газоразрядный электроакустический преобразователь (ГЭАП), функционирующий на основе искрового разряда в воздухе при атмосферном давлении [21]. Было показано, что протекание тока искрового разряда в электродной системе ГЭАП сопровождается скачком давления в воздушной среде, в результате чего формируется мощный импульс (до 85 дБ) в относительно широком диапазоне частот от сотен герц до 4 МГц [21]. Однако в настоящее время недостаточно изучены как электрофизические процессы, приводящие к формированию акустических колебаний в воздушном пространстве, так и газоразрядные явления в ГЭАП такого типа. Особенности, возникающие на практике при использовании таких систем в задачах неразрушающего контроля, также практически не изучены.

В настоящей работе приведены результаты исследования газоразрядных и акустических процессов в ГЭАП при различных конфигурациях его электродной системы. В результате анализа экспериментально полученных данных дана характеристика ГЭАП как газоразрядной нагрузки. Выявлено влияние конструктивных особенностей электродной системы ГЭАП на его акустические характеристики. Определены режимы, пригодные для акустического возбуж-

дения объектов исследования в задачах неразрушающего контроля и дефектоскопии. На основе СЛДВ с применением ГЭАП выполнен модельный эксперимент по обнаружению дефекта в виде несквозного отверстия прямоугольной формы в полиметилметакрилате (ПММА).

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В ходе эксперимента для генерации сигнала возбуждения использовались импульсные ГЭАП на основе искрового разряда в воздухе при атмосферном давлении. Упрощенные схемы акустических систем на основе ГЭАП с различной конструкцией электродной системы представлены на рис. 1.

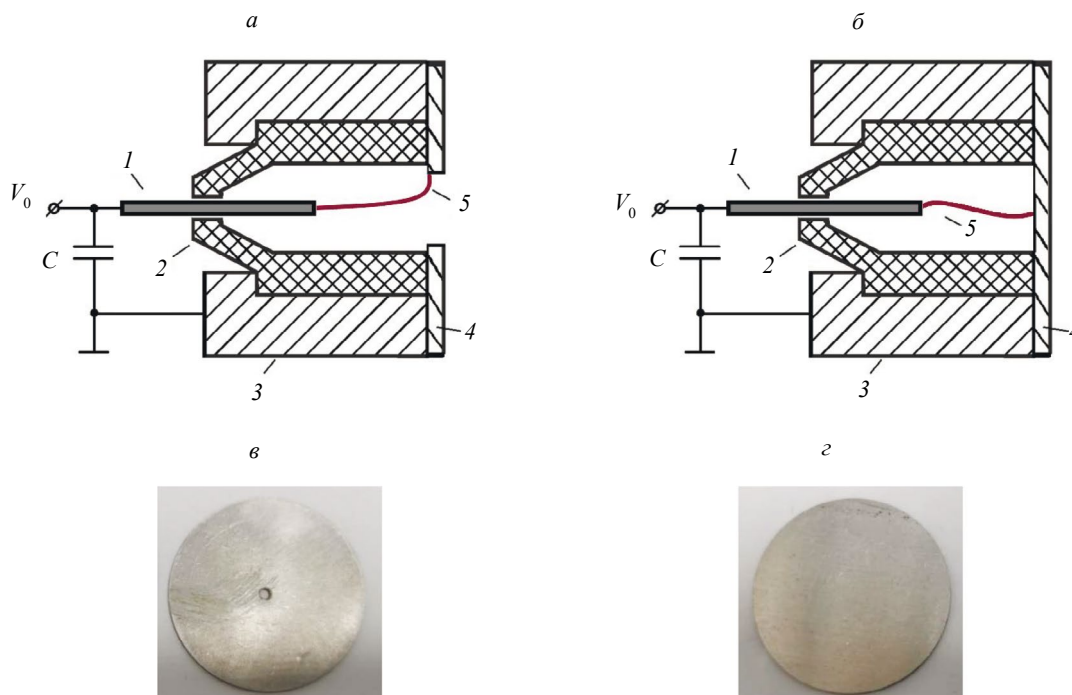


Рис. 1. Упрощенная схема ГЭАП открытого (а) и закрытого (б) типов, а также фотографии соответствующих обратных электродов открытого типа с отверстием (в) и закрытого типа (з): 1 — острый электрод; 2 — изолятор; 3 — обратный токопровод; 4 — дисковый электрод (мембрана); 5 — схематичное положение канала разряда.

Общей особенностью в работе систем для генерации акустических колебаний на основе импульсного ГЭАП является использование скачка давления, сопутствующего протеканию импульса тока разряда. Более подробно принцип действия ГЭАП описан в [19—21]. Основное отличие исследуемых ГЭАП заключается в конструкционном исполнении дискового электрода 4, выполняющего одновременно роль обратного токопровода в газоразрядном контуре и мембраны, которая является излучающей поверхностью электроакустического преобразователя. В случае, когда мембрана 4 выполнена с отверстием в центре (рис. 1а), объем электродной системы сообщается с атмосферой. Это позволяет беспрепятственно осуществлять вывод акустических колебаний в окружающее пространство. Излучающими поверхностями ГЭАП являются периферийная область плазмы газового разряда, поверхности электродов и изолятора. Такая конфигурация электродной системы ГЭАП условно называется открытой. В случае, когда мембрана 4 не имеет отверстия, она является одновременно основной излучающей поверхностью ГЭАП и диафрагмой, отделяющей объем разрядной камеры от внешней среды. Такая газоразрядная система условно называется закрытой (рис. 1б).

В настоящей работе приведены результаты исследования акустических характеристик ГЭАП закрытого и открытого типов при исполнении мембраны 4 в виде диска диаметром 30 мм с отверстиями диаметром от 1 до 3 мм в последнем случае. Все исследуемые мембраны изготовлены из дюралюминия толщиной 1 мм.

Колебания мембраны ГЭАП были зарегистрированы с использованием лабораторной установки на основе сканирующего лазерного доплеровского виброметра (рис. 2).

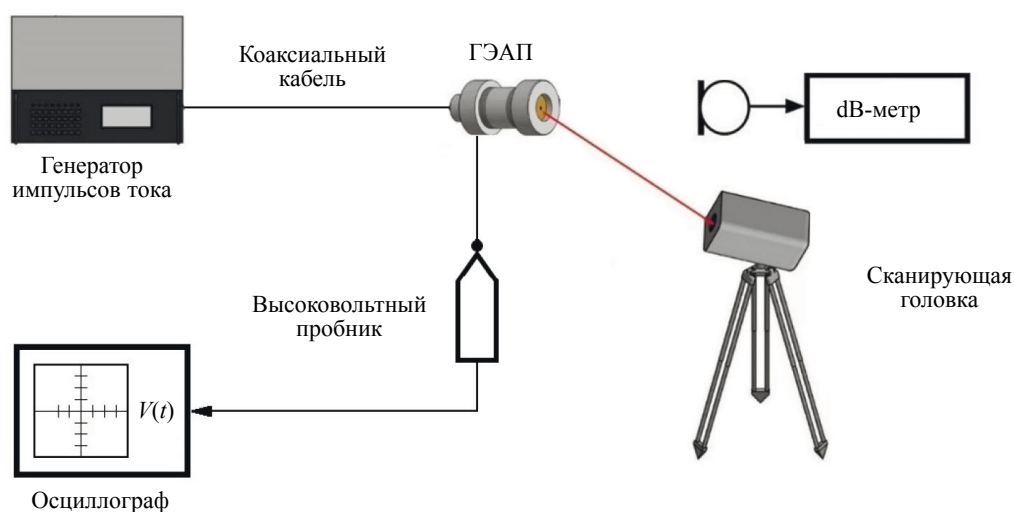


Рис. 2. Функциональная схема лабораторной установки для исследования ГЭАП.

Лабораторная установка включает сканирующую лазерную головку и систему управления доплеровского виброметра PSV-500-3D-HV (Polytec), ГЭАП с коаксиальной линией связи и специализированный генератор импульсов тока с выходным напряжением до 20 кВ и частотой следования импульсов до 3 Гц. Осциллограф DS5032E (Owon) и высоковольтный щуп HVP-28HF (Pintek) использовались для регистрации напряжения на газоразрядном промежутке. Измеритель уровня шума АТЕ-9015 (Актаком) использовался для определения перепада акустического давления в диапазоне частот до 8 кГц.

Колебания мембраны ГЭАП регистрировали с использованием лазерного виброметра во временном режиме при длительности записи одного импульса 6 мс. При исследовании ГЭАП закрытого типа измерения проводили в центре мембраны, а для открытого ГЭАП — на расстоянии 1 мм от края центрального отверстия. Полученные амплитудно-временные зависимости были использованы для оценки амплитуды виброперемещения на излучающей мембране и сравнительного анализа амплитудно-частотного спектра ГЭАП двух типов.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

#### 3.1. Характеристика ГЭАП как газоразрядной нагрузки

По сути, рассматриваемые ГЭАП схожи с газовым разрядником, работающим в режиме самопробоя. Поскольку система электродов ГЭАП близка к типу «острие—плоскость», потенциал распределен в межэлектродном промежутке неоднородно. Таким образом, электрическое поле вблизи потенциального электрода ГЭАП будет выше среднего поля в газоразрядном промежутке. Кроме того, электрод 1 контактирует с изолятором 2, что приводит к развитию пробоя по поверхности диэлектрика. Эти факторы вызывают уменьшение уровня напряжения, которое необходимо приложить для пробоя газоразрядного промежутка. Межэлектродная емкость ГЭАП не превышает 70 пФ.

Общей особенностью исследуемых ГЭАП является взаимосвязь между величиной межэлектродного зазора в газоразрядном промежутке и энергией, выделяющейся при протекании тока разряда. При увеличении зазора возрастает пробивное напряжение и увеличивается запас энергии в емкостном накопителе. Для межэлектродного зазора на уровне 10 мм пробивное напряжение достигает 15 кВ. В этом случае запас энергии в емкостном накопителе номиналом 2,3 нФ достигает около 0,25 Дж.

Индуктивность отрезка коаксиального кабеля составляет 2 мкГн, индуктивность электродной системы ГЭАП — приблизительно 200 нГн. Следовательно, суммарная индуктивность газоразрядного контура — 2,2 мкГн. При этом волновое сопротивление газоразрядного контура составит приблизительно 30 Ом. Таким образом, при максимальном выходном напряжении генератора около 15 кВ амплитуда импульса тока генератора будет ограничена на уровне 500 А. В действительности, амплитуда тока будет ниже из-за влияния сопротивления искрового разряда и потерь в емкостном накопителе, кабеле и электродах. Таким образом, условия протекания

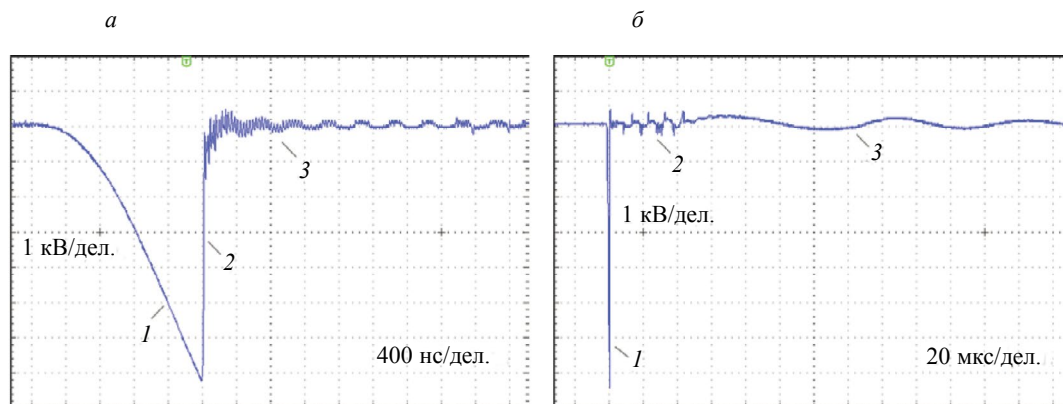


Рис. 3. Детальный (а) и общий (б) вид осциллограмм напряжения на газоразрядном промежутке.

ния газоразрядных процессов во многом определяются не только параметрами электрической схемы, используемой для возбуждения разряда, но и параметрами электродной системы ГЭАП.

В ходе эксперимента регистрировались осциллограммы напряжения на газоразрядном промежутке. Характерный вид осциллограммы напряжения, зарегистрированной при формировании импульса на газоразрядном промежутке с зазором 3 мм, приведен на рис. 3.

При детальном рассмотрении осциллограммы (рис. 3а) можно выделить три стадии. В первой стадии 1 происходит заряд емкостного накопителя от генератора импульсов тока. Длительность фронта импульса напряжения на газоразрядном промежутке составляет 2 мкс. В стадии 2 при определенной величине напряжения на электродах происходит формирование искрового разряда, что приводит к пробое газоразрядного промежутка. При величине зазора 3 мм пробивное напряжение составляет 7,2 кВ и запас энергии в емкостном накопителе достигает 60 мДж. В стадии 3 наблюдаются затухающие колебания напряжения горения разряда с частотой около 2,5 МГц. Длительность стадии 3 составляет около 4 мкс, что значительно больше длительности периода осцилляции напряжения. Это указывает на то, что сопротивление плазмы в канале искрового разряда значительно меньше волнового сопротивления в силовом разрядном контуре  $\rho = 30$  Ом. Приблизительная оценка средней величины эквивалентного сопротивления искры оказывается порядка 3 Ом. Видно, что основная доля энергии выделяется в искровом разряде за время около 1 мкс. В этом случае грубая оценка импульсной мощности в искровом разряде дает величину порядка 60 кВт.

На рис. 3б приведен общий вид осциллограммы напряжения с горизонтальной разверткой 20 мкс/дел. Стадия 1 соответствует процессам заряда емкостного накопителя и формированию искры, рассмотренным выше. По мере разряда емкостного накопителя напряжение горения разряда уменьшается, и происходит переход искрового разряда в разряд типа дуги (стадия 2). Ввиду осцилляций реактивной мощности в газоразрядном контуре дуговой разряд поддерживается при переменном токе частотой около 100 кГц. Напряжение горения увеличивается по мере спада тока разряда от 100 В до приблизительно 200 В. Длительность этой стадии составляет около 40 мкс. Вероятно, дуга приводит к эрозии изолятора и электродов, при этом практически не оказывая вклада в формирование акустических колебаний. Соответственно, наличие стадии 2 приводит к сокращению срока службы электродной системы ГЭАП и не является желательной. Далее, при определенном напряжении на емкостном накопителе поле в газоразрядном промежутке становится недостаточно для поддержания плазмы. Ток разряда обрывается и в стадии 3 наблюдаются затухающие колебания напряжения ввиду наличия остаточной энергии в первичном накопителе генератора импульсов тока. Длительность стадии 3 составляет приблизительно 300 мкс.

На основе данных, полученных из осциллограмм, определены пробивные напряжения при различных межэлектродных зазорах (рис. 4).

Для рассматриваемых электродных систем ГЭАП пробивное напряжение практически линейно зависит от величины межэлектродного зазора. Исходя из данных, полученных в ходе эксперимента, определена напряженность электрического поля, необходимая для пробоя по поверхности диэлектрика (фторопласт). Пороговая напряженность электрического поля в случае малых (до 2 мм) зазоров составляет около 20 кВ/см. При этом напряженность электрического поля, необходимая для пробоя промежутка более 3 мм, составляет около 10 кВ/см.

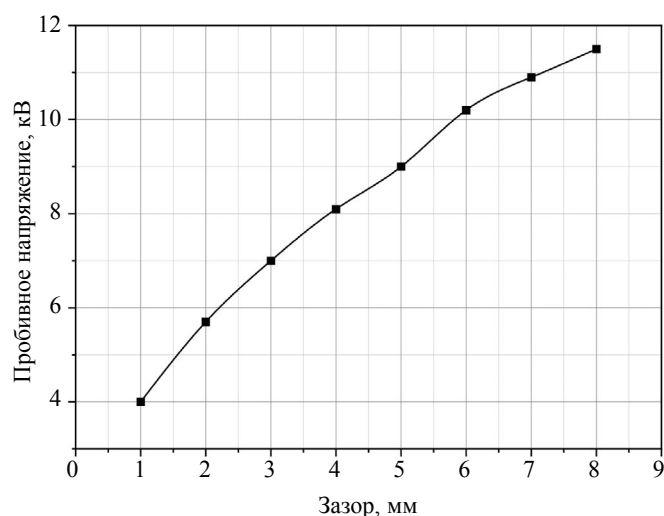


Рис. 4. Амплитуда напряжения, необходимая для развития пробоя по поверхности диэлектрика, при разных величинах межэлектродного зазора.

При минимальной величине зазора около 1 мм пробивное напряжение составляет около 4 кВ. В этом случае запас энергии в емкостном накопителе составляет около 20 мДж. При величине зазора 8 мм пробивное напряжение составляет около 11,5 кВ. В этом случае запас энергии в емкостном накопителе достигает 150 мДж. Таким образом, при изменении величины межэлектродного зазора от 1 до 8 мм запас энергии в емкостном накопителе увеличивается от 20 до 150 мДж. Импульсная мощность, соответственно, изменяется в диапазоне 20—150 кВт, что позволяет регулировать интенсивность излучения ГЭАП в широких пределах за счет изменения величины зазора газоразрядного промежутка.

### 3.2. Определение акустических характеристик газоразрядного электроакустического преобразователя

С использованием лазерного виброметра во временном режиме было измерено виброперемещение в центре мембран ГЭАП закрытого и открытого типов. Амплитуда первого максимума затухающих колебаний была определена с усреднением по пяти измерениям. Графики, отражающие временной ход виброперемещения на мембранах ГЭАП закрытого и открытого типов, приведены на рис. 5.

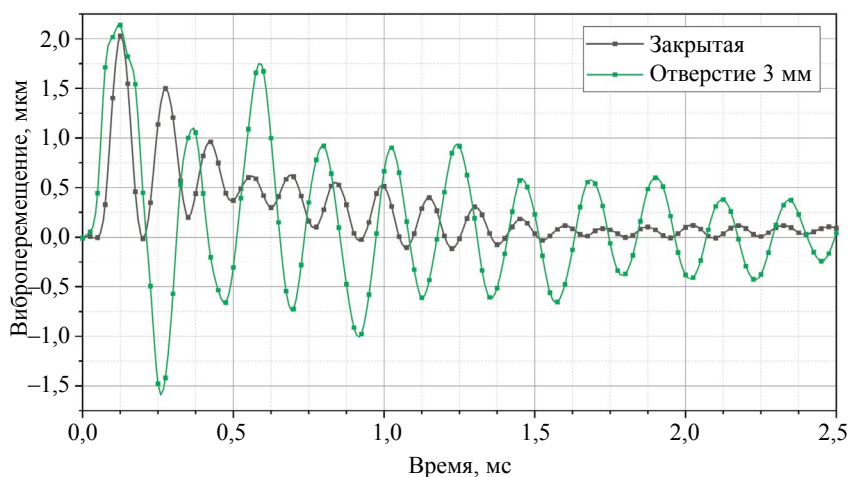


Рис. 5. Сигналы виброперемещения на мембранах ГЭАП закрытого и открытого типов. В ходе эксперимента величина межэлектродного зазора составляла 1 мм при объеме канала разряда 80 мм<sup>3</sup>.



При межэлектродном зазоре 1 мм амплитуда виброперемещения на мембранах ГЭАП закрытого и открытого типов сопоставима и достигает около 2 мкм. Соответствующие значения амплитуды виброскорости мембран открытого и закрытого типа также сопоставимы, и составляют 50 и 45 мм/с соответственно. На графике (см. рис. 5) видно, что среднее значение виброперемещения мембраны ГЭАП закрытого типа в рассматриваемом временном интервале отлично от нуля. Наблюдается смещение равновесного положения мембраны амплитудой около 1 мкм с характерной длительностью процесса порядка 0,5 мс. Это можно объяснить действием избыточного давления в газоразрядной камере, которое возникает ввиду теплового расширения газа при протекании тока разряда. В ГЭАП с открытой системой электродов такой эффект практически не выражен.

При исследовании частотной характеристики ГЭАП зарегистрированные амплитудно-временные зависимости были преобразованы в амплитудно-частотные спектры колебаний мембран ГЭАП с использованием преобразования Фурье, при усреднении данных по пяти измерениям. Полученные амплитудно-частотные спектры ГЭАП в диапазоне частот от 100 Гц до 100 кГц приведены на рис. 6.

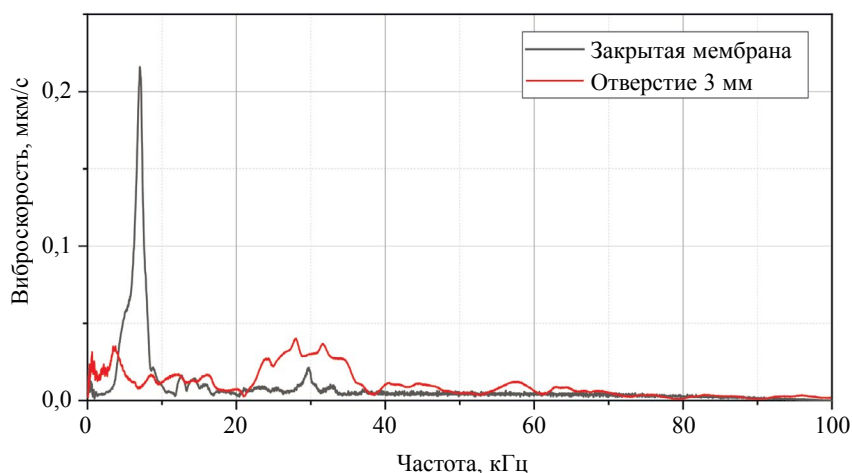


Рис. 6. Амплитудно-частотные спектры ГЭАП закрытого и открытого типов, измеренные в диапазоне частот от 100 Гц до 100 кГц. Диаметр отверстия в мембране ГЭАП открытого типа — 3 мм.

Как видно из рис. 6, амплитудно-частотные спектры электроакустических преобразователей с разной конструкцией электродной системы существенно отличаются. ГЭАП закрытого типа имеет выраженную полосу излучения с центральной частотой 7 кГц, характерной для основной моды колебаний мембраны. Значительная доля энергии колебаний сосредоточена в диапазоне частот от 3 до 10 кГц. Практически отсутствуют спектральные линии с частотами выше 35 кГц. Таким образом, основная доля энергии колебаний мембраны сосредоточена в слышимом звуковом диапазоне (до 10 кГц), максимальная ширина полосы излучения не превышает 33 кГц. Фактически, по своей акустической характеристике он близок к резонансным излучателям. Это объясняется тем, что мембрана ГЭАП является излучающей поверхностью с частотно-избирательными свойствами. В работе [20] было показано, что частотные свойства мембраны определяются, в основном, ее геометрическими размерами и свойствами используемого материала.

ГЭАП открытого типа имеет амплитудно-частотный спектр без ярко выраженных резонансных линий, однако спектральная плотность мощности распределена в диапазоне частот от сотен герц до 40 кГц неравномерно. В низкочастотной области спектра присутствуют спектральные линии с частотами от 300 Гц и пик с центральной частотой 3,7 кГц. В диапазоне частот от 4 до 17 кГц и от 20 до 40 кГц ГЭАП открытого типа имеет широкие полосы частот со значительной плотностью мощности излучения. В низкочастотной области спектра присутствуют линии с частотами 65 кГц и выше. Таким образом, амплитудно-частотный спектр ГЭАП открытого типа практически непрерывен и представляет собой полосу шириной около 70 кГц с неравномерной амплитудой сигнала. Такой ГЭАП является широкополосным источником звуковых и ультразвуковых колебаний, что представляет интерес для акустической стимуляции материалов и изделий при неразрушающем контроле.

### 3.3. Исследование влияния конструкции ГЭАП на его акустические характеристики

Поскольку условия протекания газоразрядных процессов в значительной степени определяются конструкцией разрядной камеры и электродов ГЭАП, необходимо более подробное исследование влияния конструкционных параметров на его излучающие характеристики. В ходе исследования была определена зависимость амплитуды виброперемещения в центре дюралюминиевой мембраны с отверстием 3 мм от объема разрядной камеры при фиксированном зазоре межэлектродного промежутка ГЭАП на уровне 1 мм. Для изменения объема разрядной камеры при постоянном зазоре использовался комплект изоляторов одинаковой длины и различным внутренним диаметром от 5 до 15 мм. Результаты виброизмерений представлены на рис. 7.

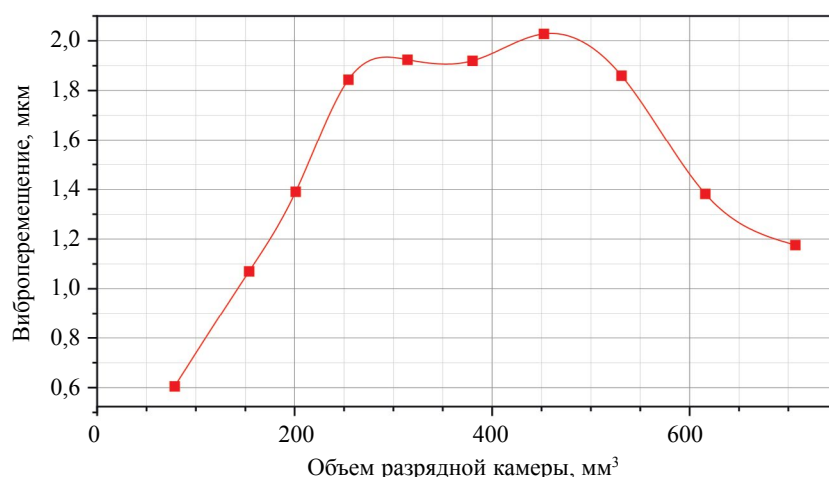


Рис. 7. Амплитуды виброперемещения поверхности мембраны при различных объемах разрядной камеры ГЭАП.

Зависимость амплитуды виброперемещения на мембране от объема газоразрядной камеры имеет сложный вид (см. рис. 7). Присутствуют участки с резким увеличением/уменьшением амплитуды виброперемещения при небольшом относительном изменении объема разрядной камеры, а также область, где амплитуда виброперемещения при изменении объема остается практически постоянной. В частности, при увеличении объема разрядной камеры от 80 до 250 мм³ наблюдается практически линейный рост амплитуды виброперемещения на мембране ГЭАП от 0,6 до 2 мкм. Последующее увеличение объема разрядной камеры до 530 мм³ практически не влияет на амплитуду виброперемещения мембраны ГЭАП. При дальнейшем увеличении объема разрядной камеры в настоящих условиях наблюдается снижение амплитуды виброперемещения на поверхности мембраны ГЭАП. При увеличении внутреннего диаметра изолятора с 12 до 15 мм, объем разрядной камеры увеличился на 25 %, однако амплитуда уменьшилась почти в 2 раза.

Интерпретировать такое поведение зависимости амплитуды виброперемещения мембраны от объема газоразрядной камеры можно в рамках следующих представлений. В разрядной камере происходит формирование перепада давления, и сила избыточного давления на мембрану будет зависеть от активной площади, следовательно, и от диаметра изолятора. Таким образом, первоначальный рост интенсивности вибраций можно объяснить увеличением активной площади мембраны. Спад интенсивности можно связать с тем, что избыточное давление распределяется на большую площадь поверхности, и сила, действующая на мембрану, уменьшается. Кроме того, колебания мембраны возбуждаются ввиду взаимодействия с акустическими волнами, отраженными от поверхностей электродной системы. В случае, когда частоты переотражений совпадают с собственными частотами мембраны, происходит возбуждение ее резонансных колебаний.

Практический интерес представляет определение диапазона конструкционных параметров, при которых ГЭАП имеет наиболее широкую полосу и большую мощность излучения. В ходе исследования определен диапазон объемов разрядной камеры от 250 до 500 мм³, который является оптимальным с точки зрения получения наибольшей амплитуды сигнала виброперемещения.



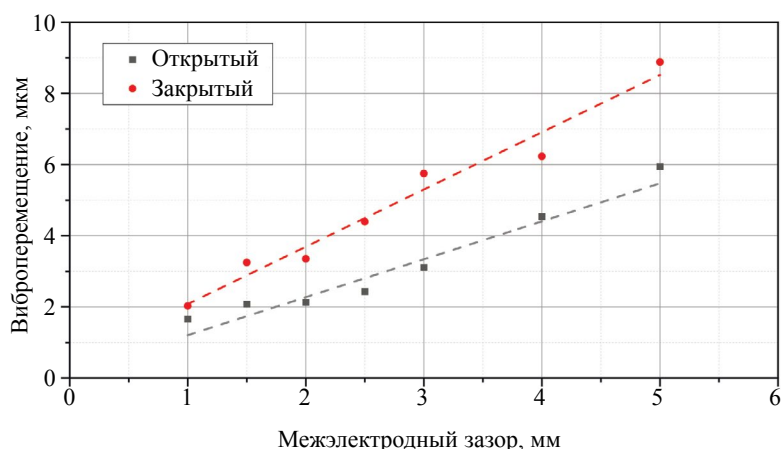


Рис. 8. Зависимость амплитуды виброперемещения в центре дюралюминиевой мембраны с отверстием 3 мм от межэлектродного зазора ГЭАП.

Далее, в ходе исследования определена зависимость амплитуды виброперемещения в центре мембраны от величины зазора межэлектродного промежутка ГЭАП. Межэлектродный зазор изменяли от 1 до 5 мм за счет использования изоляторов с различной высотой. Регистрация виброперемещения мембраны во времени осуществлялась лазерным виброметром. Полученная зависимость представлена на рис. 8.

Из полученных результатов следует, что увеличение межэлектродного зазора ГЭАП приводит к увеличению амплитуды виброперемещения в центре мембраны. Это объясняется тем, что при увеличении межэлектродного зазора возрастает уровень пробивного напряжения и энергия, передаваемая от разряда в импульсе. Примечательно, что амплитуда виброперемещения практически пропорциональна энергии, запасенной в емкостном накопителе на момент пробоя газоразрядного промежутка. Таким образом, за счет изменения межэлектродного зазора можно регулировать мощность излучения ГЭАП и задавать амплитуду виброперемещения излучающей поверхности. При величине межэлектродного зазора 5 мм уровень звукового давления в диапазоне частот до 8 кГц, измеренный на расстоянии 0,5 м от мембраны, достигал 75 дБ для ГЭАП открытого типа и 55 дБ для закрытого.

### 3.4. Применение ГЭАП в задачах неразрушающего контроля

Для выявления особенностей, возникающих при использовании ГЭАП открытого и закрытого типов в задачах дефектоскопии, проведены тестовые эксперименты с модельным дефектом в полимерном материале. В качестве образца для экспериментов использовалась пластина из полиметилметакрилата (ПММА) размером  $214 \times 60 \times 4$  мм<sup>3</sup> с модельным дефектом в виде несквозного прямоугольного отверстия размером  $15,0 \times 14,6$  мм, расположенным в центре. Глубина отверстия составляла 3,5 мм. В ходе эксперимента ГЭАП размещали с обратной стороны пластины на расстоянии 10 мм от ее поверхности, как показано на рис. 9.



Рис. 9. Расположение ГЭАП и исследуемого образца с модельным дефектом в ходе эксперимента.

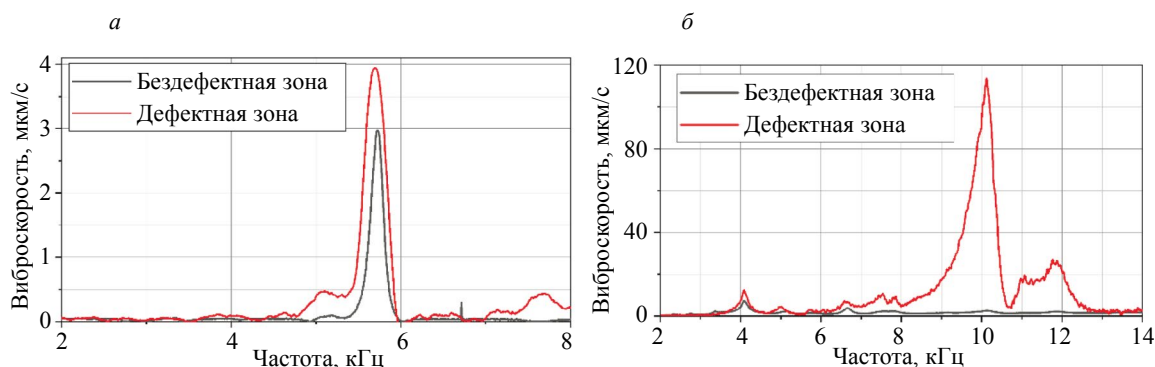


Рис. 10. Амплитудно-частотные спектры колебаний образца в области дефекта и бездефектной зоне, зарегистрированные с использованием ГЭАП закрытого (а) и открытого (б) типов.

При проведении неразрушающих испытаний пластина ПММА подвергалась бесконтактной импульсной акустической стимуляции с использованием ГЭАП. Частота следования импульсов разряда составляла 2,5 Гц. Величина зазора межэлектродного промежутка составила 5 мм. В результате лазерного вибросканирования в диапазоне частот до 50 кГц были получены амплитудно-частотные спектры колебаний пластины с шагом 5 Гц. Шаг сканирования составил 0,9 мм. На рис. 10 приведены усредненные амплитудно-частотные спектры колебаний всей пластины (бездефектная зона) и дефектной зоны, зарегистрированные при использовании ГЭАП закрытого (рис. 10а) и открытого (рис. 10б) типов.

При возбуждении упругих волн в образце с использованием ГЭАП закрытого типа (см. рис. 10а), колебания самой пластины и дефекта наблюдаются на одной частоте около 5,7 кГц. Это означает, что селективной резонансной стимуляции колебаний в области дефекта не происходит. Увеличение амплитуды сигнала по сравнению с бездефектной зоной происходит за счет локального снижения жесткости материала в области дефекта, что можно обнаружить при детальном анализе соответствующих виброграмм. Виброграмма, приведенная на рис. 11, отображает повышение амплитуды колебаний в области модельного дефекта.

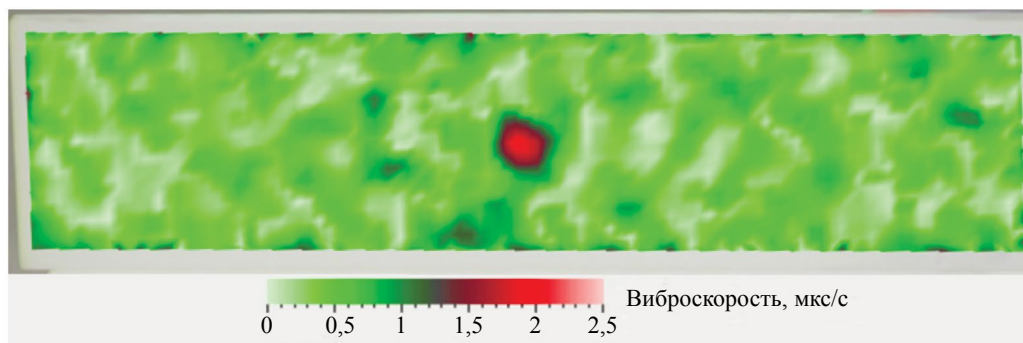


Рис. 11. Виброграмма, полученная при акустической стимуляции с использованием ГЭАП закрытого типа на частоте 9,8 кГц.

Амплитуда виброскорости в области дефекта на частоте 9,8 кГц не превышает 3 мкм/с при среднем значении сигнала в бездефектной области на уровне 0,35 мкм/с. Отношение сигнал/шум, определенное на основе полученных данных, относительно невелико и составляет 2. Такая ситуация типична для случаев, когда для акустической стимуляции дефектов в задачах НК применяют резонансные излучатели.

При анализе спектра колебаний образца, полученного с использованием ГЭАП открытого типа (см. рис. 10б), выявлены множественные спектральные линии, относящиеся к собственным частотам колебаний образца, а также выраженный пик на частоте 10,13 кГц, свидетельствующий о наличии резонансных явлений в области несквозного отверстия. Увеличение амплитуды сигнала в области дефекта по сравнению с бездефектной зоной происходит за счет

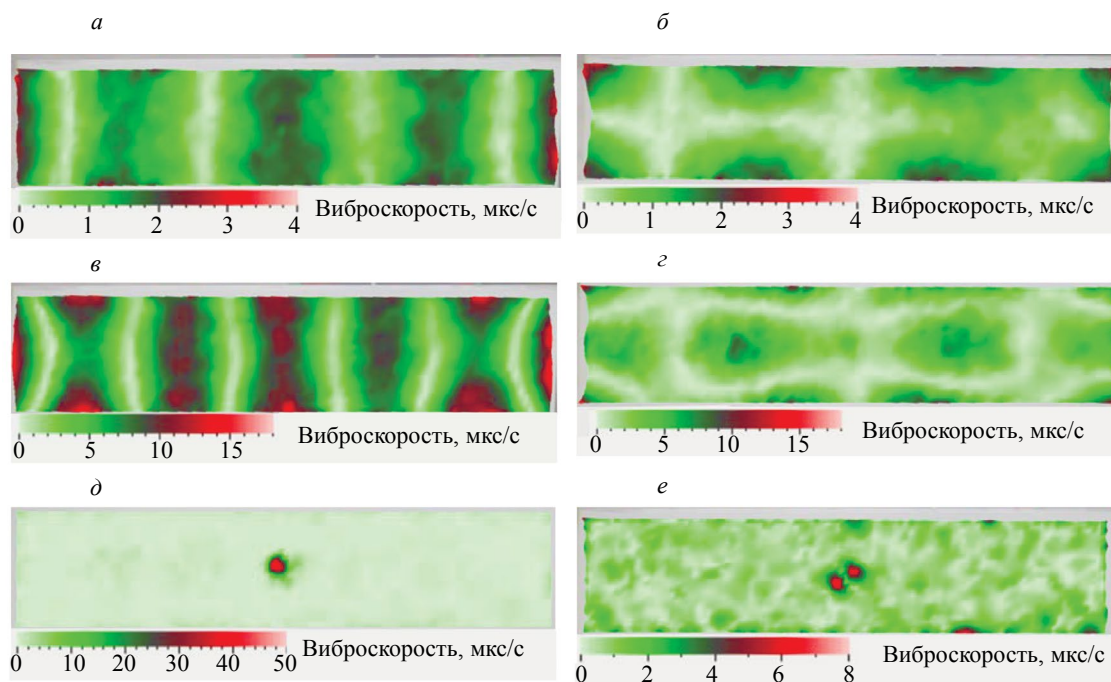


Рис. 12. Виброграммы пластины ПММА при акустической стимуляции с использованием ГЭАП открытого типа, зарегистрированные на собственных частотах колебаний пластины: 1681 Гц (а); 2356 Гц (б); 4094 Гц (в); 6656 Гц (г), а также резонансных частотах дефекта 10062 Гц (д); 20519 Гц (е).

возбуждения локального резонанса дефекта [11]. Данное явление происходит ввиду наличия в спектре сигнала возбуждения частот, совпадающих с основной частотой резонанса дефекта. Очевидно, что в данном случае происходит отклик как самого образца, так и его дефекта в процессе бесконтактной акустической стимуляции с применением ГЭАП открытого типа.

Принадлежность пиков на спектре к собственным частотам колебаний образца идентифицируется при детальном анализе виброграмм. В ходе частотного анализа данных были получены соответствующие виброграммы (рис. 12), отражающие пространственное распределение амплитуды колебаний на поверхности образца.

Из рис. 12 видно, что виброграммы отображают как собственные колебания пластины ПММА, так и резонансные колебания в области модельного дефекта. На рис. 12д и рис. 12е приведены виброграммы, отображающие резонансные колебания пластины в области дефекта. В частности, на частоте около 10 кГц зарегистрированы колебания, соответствующие основной резонансной частоте дефекта (соотношение сигнал/шум составляет 90), а на частоте 20,5 кГц (соотношение сигнал/шум составляет 15) наблюдаются колебания его второй резонансной гармоники. Следовательно, при использовании ГЭАП открытого типа акустическая стимуляция осуществляется в широком диапазоне частот. При анализе данных это позволяет получить более полную информацию о размере и форме дефекта. Стоит отметить, что получение сведений о собственных частотах объекта также имеет важное практическое значение при проектировании изделий, подвергаемых внешним механическим воздействиям.

#### 4. АНАЛИЗ ПРЕИМУЩЕСТВ И НЕДОСТАТКОВ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСКОНТАКТНЫХ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ГЭАП ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В ходе исследования определены характеристики ГЭАП, и выявлены особенности его использования в задачах НК. Для оценки амплитуды сигнала в области дефекта ( $\Delta v_d$ ) по отношению к бездефектной зоне ( $\Delta v_{nd}$ ) использовано стандартное выражение для расчета отношения сигнал/шум в виде:  $SNR = \frac{|\Delta v_d - \Delta v_{nd}|}{\sigma_d}$ , где  $\sigma_d$  — стандартное отклонение  $\Delta v_{nd}$  [22, 23]. Результаты сравнительного анализа ГЭАП с различной конструкцией электродной системы сведены в табл. 1.

Таблица 1

## Сравнительные характеристики ГЭАП открытого и закрытого типов

Параметры при межэлектродном зазоре 5 мм	ГЭАП открытого типа	ГЭАП закрытого типа
Уровень шума, дБ	74	54
Амплитуда виброперемещения на мембране излучателя, мкм	6	9
Амплитуда виброскорости колебаний мембраны, мм/с	50	44
Предельная частота, кГц	70	35
Активный диапазон частот, кГц	1—60	3—10
Вынос плазмы и микрочастиц	Есть	Нет
Электромагнитное излучение	Высокое	Низкое
Устойчивость к попаданию влаги	Нет	Да
Соотношение сигнал/шум при дефектоскопии	До 90	2

Преимущества ГЭАП закрытого типа заключаются в отсутствии выноса плазмы и микрочастиц из области газового разряда и малом уровне излучаемых электромагнитных помех [21]. Это может быть важно при использовании ГЭАП для неразрушающего контроля материалов и изделий с особыми требованиями к чистоте поверхности или амплитуде внешнего электрического поля. Недостатками являются относительно небольшая мощность излучения и узкий частотный диапазон.

В результате сравнительного анализа ГЭАП открытого и закрытого типов показано, что при открытом исполнении электродной системы электроакустический преобразователь имеет практически вдвое большую предельную частоту (до 70 кГц и выше) и большую интенсивность излучения (до 75 дБ на расстоянии 0,5 м от мембраны ГЭАП). Таким образом, преимущества ГЭАП открытого типа — широкий частотный диапазон и высокая мощность излучения. К недостаткам следует отнести вынос плазмы и микрочастиц из области газового разряда за пределы электродной системы, повышенный уровень излучаемых электромагнитных помех [21].

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы дана характеристика газоразрядного электроакустического преобразователя (ГЭАП) как газоразрядной нагрузки. Показано, что ГЭАП функционирует на основе искрового разряда в воздухе при атмосферном давлении, однако присутствуют стадии, соответствующие поддержанию дугового разряда. В рассматриваемых конструкциях ГЭАП возможно развитие разряда по поверхности диэлектрика. При изменении межэлектродного зазора от 1 до 8 мм пробивное напряжение возрастает от 4 до 11,5 кВ. Пробой развивается при электрических полях 10—20 кВ/см. Усредненная за активную длительность импульса 1 мкс величина сопротивления искрового канала не превышает 3 Ом. В этих условиях импульсная мощность, выделяющаяся в области плазмы разряда, превышает 100 кВт.

В ходе экспериментальных исследований показано, что геометрические размеры электродной системы ГЭАП в значительной степени определяют его акустическую характеристику. В частности, от зазора зависит амплитуда вибраций на поверхности мембраны преобразователя. Изменение объема разрядной камеры оказывает значительное влияние на акустическую характеристику ГЭАП. Определен диапазон объемов газоразрядной камеры (250—500 мм<sup>3</sup>), в котором достигается максимальная интенсивность излучения.

Проведен сравнительный анализ ГЭАП закрытого и открытого типов. На примере исследования образца полимерного материала с модельным дефектом показано, что при использовании ГЭАП закрытого типа не происходит селективной стимуляции колебаний в области дефекта. Тем не менее дефектные области можно обнаружить при детальном анализе соответствующих виброграмм, если за счет локального снижения жесткости материала в области дефекта происходит достаточное увеличение амплитуды сигнала по сравнению с бездефектной зоной. При использовании ГЭАП открытого типа для возбуждения акустических волн в исследуемых образцах проявляются как их собственные частоты, так и резонансные частоты дефектов. Причем, отношение сигнал/шум в области модельного дефекта достигает 90 при размещении ГЭАП на расстоянии 10 мм от контролируемого изделия.

Выявлены особенности, возникающие при использовании ГЭАП открытого и закрытого типов в задачах дефектоскопии. В частности, ГЭАП открытого типа является достаточно мощным широкополосным источником звуковых и ультразвуковых колебаний и представляет интерес для бесконтактной акустической стимуляции материалов и изделий при неразрушающем контроле. Но ГЭАП закрытого типа имеет преимущества в задачах неразрушающего контроля материалов и изделий с особыми требованиями к чистоте поверхности или величине прикладываемого внешнего электрического поля.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания «Наука», проект № FSWW-2023-0019, в работе применяли оборудование ЦКП НОИЦ «Наноматериалы и нанотехнологии ТПУ».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Круглень А.И.* Неразрушающий контроль в аэрокосмической промышленности / Сборник материалов VII Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики. В 3 томах. Под ред. Ю. Ю. Логинова. ФГБОУ ВО «СибГУ им. М.Ф. Решетнева». Т. 2. Красноярск. 2021. С. 813—815.
2. *Щербаков М.И.* Новые аспекты использования теплового неразрушающего контроля для различных объектов авиационной промышленности / Материалы III отрасл. конф. по измерит. технике и метрологии для исследований летательных аппаратов. Жуковский: ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, 2018. С. 381—386.
3. *Вешкин Е.А., Сатдинов Р.А., Баранников А.А.* Современные материалы для салона самолета // Труды ВИАМ. 2021. № 9 (103). С. 33—42.
4. *Сагомонова В.А., Долгополов С.С., Целикин В.В., Сорокин А.Е.* Исследование влияния интегрированного вибропоглощающего слоя на свойства композитных трехслойных звуко теплоизолирующих сэндвич-панелей // Труды ВИАМ. 2020. № 9 (91). С. 87—95.
5. *Соловьева О.В., Соловьев С.А., Шакурова Р.З.* Обзор современных керамических ячеистых материалов и композитов, применяемых в теплотехнике // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2023. № 1. С. 82—104.
6. *Медведский А.Л., Мартыросов М.И., Хомченко А.В., Дедова Д.В.* Исследование напряженно-деформированного состояния трехслойной панели с сотовым наполнителем при наличии внутренних дефектов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2022. № 2. С. 675—684.
7. *Юмашев В.М., Кузелев Н.Р., Маклашевский В.Я.* Комплексный радиационный контроль изделий, слоистых и композитных материалов в промышленности, авиационной и космической технике // Контроль. Диагностика. 2001. № 5. С. 35—36.
8. *Wandowski T., Mindykowski D., Kudela P., Radzienski M.* Damage localization using contact and non-contact narrow frequency band elastic wave generation // Measurement. 2023. V. 221. Article number 113504.
9. *Lan Z., Saito O., Okabe Y.* An insight on local defect resonance based on modal decomposition analysis: A two-dimensional case // Journal of Sound and Vibration. 2024. V. 596. Article number 118718.
10. *Seresini T., Sunetchiieva S., Pfeiffer H., Pfeiffer H., Glorieux Ch.* Defect Detection in Carbon Fiber-Reinforced Plate by Imaging of Mechanical Nonlinearity-Induced Sideband Vibrations // Vibration. 2023. V. 6. Is. 4. P. 796—819.
11. *Solodov I., Kreutzbruck M.* Local defect resonance of a through-thickness crack // Ultrasonics. 2021. Is. 118 (21). P. 106565. DOI: 10.1016/j.ultras.2021.106565
12. *Solodov I., Kreutzbruck M.* Mode matching to enhance nonlinear response of local defect resonance // Journal of Sound and Vibration. 2019. V. 461. P. 114916.
13. *Segers J., Hedayatrasa S., Poelman G., Paeppegem W.V., Kersemans M.* Nonlinear local wave-direction estimation for in-sight and out-of-sight damage localization in composite plates // NDT & E International. 2021. V. 119. P. 102412.
14. *Segers J., Hedayatrasa S., Poelman G., Paeppegem W.V., Kersemans M.* Robust and baseline-free full-field defect detection in complex composite parts through weighted broadband energy mapping of mode-removed guided waves // Mechanical Systems and Signal Processing. 2021. V. 151. P. 107360.
15. *Ultrasonic transducers, Technical notes / Olympus NDT.* 2006.
16. *Schiller S., Hsieh C.K., Chou C., Khuri-yakub B.* Novel high frequency air transducers // Review of progress in quantitative NDE. 1990. P. 795.
17. *Wang X.-Ch., Bai J.-X., Zhang T.-H., Sun Y., Zhang Y.-T.* Comprehensive study on plasma chemistry and products in pulsed discharges under Martian pressure // Vacuum. 2022. V. 203. Article number 111200.
18. *Daschewski M., Kreutzbruck M., Prager J., Dohse E., Gaal M., Harrer A.* Resonanzfreie Messung und Anregung von Ultraschall // Technisches Messen. 2015. V. 82. Is. 3. P. 156—66.
19. *Derusova D.A., Vavilov V.P., Nekhoroshev V.O., Shpil'noi V.Yu., Druzhinin N.V.* Features of Laser-Vibrometric Nondestructive Testing of Polymer Composite Materials Using Air-Coupled Ultrasonic Transducers // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. P. 1060—1071.
20. *Derusova D.A., Nekhoroshev V.O., Shpil'noi V.Yu., Vavilov V.P.* Developing novel gas discharge emitters of acoustic waves in air for nondestructive testing of materials // Sensors. 2022. V. 22. Is. 23. No. 99056. P. 14.

21. Derusova D.A., Vavilov V.P., Nekhoroshev V.O., Shpil'noi V.Y., Zuza D.A., Kolobova E.N. Analysis and NDT Applications of a Gas Discharge Electroacoustic Transducer // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2024. V. 60. Is. 2. P. 119—131.
22. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: Спектр, 2009. 544 с.
23. Li W., Van Gool L., Chen L., Xu D. Visual recognition in rgb images and videos by learning from rgb-d data // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2018. V. 40. Is. 8. P. 2030—2036.

## REFERENCES

1. Kruglenya A.I. Non-destructive testing in the aerospace industry / Collection of materials of the VII International scientific and practical conference dedicated to Cosmonautics Day. In 3 volumes. Ed. Yu. Yu. Loginov; FGBOU VO "SibSU named after M.F. Reshetnev". V. 2. Krasnoyarsk. 2021. P. 813—815. (In Russ.)
2. Shcherbakov M.I. New aspects of using thermal non-destructive testing for various objects of the aviation industry / Proceedings of the III industry conf. on measuring technology and metrology for aircraft research. Zhukovsky: TsAGI named after N.E. Zhukovsky, 2018. P. 381—386. (In Russ.)
3. Veshkin E.A., Satdinov R.A., Barannikov A.A. Modern materials for aircraft interior // Proceedings of VIAM. 2021. V. 9. Is. 103. P. 33—42. (In Russ.)
4. Sagomonova V.A., Dolgoplov S.S., Tselikin V.V., Sorokin A.E. Study of the influence of an integrated vibration-absorbing layer on the properties of composite three-layer sound-and-heat-insulating sandwich panels // Proceedings of VIAM. 2020. V. 9. Is. 91. P. 87—95. (In Russ.)
5. Solovieva O.V., Soloviev S.A., Shakurova R.Z. Review of modern ceramic cellular materials and composites used in heat engineering // News of universities. Problems of energy. 2023. V. 1. P. 82—104. (In Russ.)
6. Medvedskiy A.L., Martirosov M.I., Khomchenko A.V., Dedova D.V. Study of the stress-strain state of a three-layer panel with a honeycomb core in the presence of internal defects // Bulletin of Tula State University. Technical sciences. 2022. V. 2. P. 675—684. (in Russ.)
7. Yumashev V.M., Kuzelev N.R., Maklashevsky V.Ya. Integrated radiation control of products, layered and composite materials in industry, aviation and space technology // Control. Diagnostics. 2001. V. 5. P. 35—36. (In Russ.)
8. Wandowski T., Mindykowski D., Kudela P., Radzienski M. Damage localization using contact and non-contact narrow frequency band elastic wave generation // Measurement. 2023. V. 221. Article number 113504.
9. Lan Z., Saito O., Okabe Y. An insight on local defect resonance based on modal decomposition analysis: A two-dimensional case // Journal of Sound and Vibration. 2024. V. 596. Article number 118718.
10. Seresini T., Sunetchiieva S., Pfeiffer H., Pfeiffer H., Glorieux Ch. Defect Detection in Carbon Fiber-Reinforced Plate by Imaging of Mechanical Nonlinearity-Induced Sideband Vibrations // Vibration. 2023. V. 6. Is. 4. P. 796—819.
11. Solodov I., Kreutzbruck M. Local defect resonance of a through-thickness crack // Ultrasonics. 2021. Is. 118 (21). P. 106565. DOI: 10.1016/j.ultras.2021.106565
12. Solodov I., Kreutzbruck M. Mode matching to enhance nonlinear response of local defect resonance // Journal of Sound and Vibration. 2019. V. 461. P. 114916.
13. Segers J., Hedayatrasa S., Poelman G., Paepegem W.V., Kersemans M. Nonlinear local wave-direction estimation for in-sight and out-of-sight damage localization in composite plates // NDT & E International. 2021. V. 119. P. 102412.
14. Segers J., Hedayatrasa S., Poelman G., Paepegem W.V., Kersemans M. Robust and baseline-free full-field defect detection in complex composite parts through weighted broadband energy mapping of mode-removed guided waves // Mechanical Systems and Signal Processing. V. 151. 2021. P. 107360.
15. Ultrasonic transducers, Technical notes / Olympus NDT. 2006.
16. Schiller S., Hsieh C.K., Chou C., Khuri-yakub B. Novel high frequency air transducers // Review of progress in quantitative NDE. 1990. P. 795.
17. Wang X.-Ch., Bai J.-X., Zhang T.-H., Sun Y., Zhang Y.-T. Comprehensive study on plasma chemistry and products in pulsed discharges under Martian pressure // Vacuum. 2022. V. 203. Article number 111200.
18. Daschewski M., Kreutzbruck M., Prager J., Dohse E., Gaal M., Harrer A. Resonanzfreie Messung und Anregung von Ultraschall // Technisches Messen. 2015. V. 82. Is. 3. P. 156—66.
19. Derusova D.A., Vavilov V.P., Nekhoroshev V.O., Shpil'noi V.Yu., Druzhinin N.V. Features of Laser-Vibrometric Nondestructive Testing of Polymer Composite Materials Using Air-Coupled Ultrasonic Transducers // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. P. 1060—1071.
20. Derusova D.A., Nekhoroshev V.O., Shpil'noi V.Y., Vavilov V.P. Developing novel gas discharge emitters of acoustic waves in air for nondestructive testing of materials // Sensors. 2022. V. 22. Is. 23. No. 99056. P. 14.
21. Derusova D.A., Vavilov V.P., Nekhoroshev V.O., Shpil'noi V.Y., Zuza D.A., Kolobova E.N. Analysis and NDT Applications of a Gas Discharge Electroacoustic Transducer // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2024. V. 60. Is. 2. P. 119—131.
22. Vavilov V.P. Infrared thermography and thermal control. Moscow: Spektr, 2009. 544 p. (In Russ.)
23. Li W., Van Gool L., Chen L., Xu D. Visual recognition in rgb images and videos by learning from rgb-d data // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2018. V. 40. Is. 8. P. 2030—2036.