

*А. Л. Суркаев, Р. К. Аржуханов, К. А. Киракосян***ВОЛНОВОДНЫЙ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ
ИМПУЛЬСНОГО ДАВЛЕНИЯ****Волгоградский государственный технический университет**

alsurkaev@mail.ru, kinnomans@mail.ru, 677595@mail.ru

Автор, ответственный за переписку: Анатолий Леонидович Суркаев, alsurkaev@mail.ru

В настоящей работе представлен волноводный пьезоэлектрический преобразователь давления на основе пьезокерамики ЦТС-19, реактивный акустический волновод которого выполнен из смеси материалов, относящихся к неньютоновским жидкостям. Описана его конструкция, предложена методика градуировки и проведены эксперименты по определению значения переводного коэффициента. Представлены градуировочные установки, принцип действия которых основывается на методе падающего груза и импульсного электромеханического воздействия.

Ключевые слова: волноводный пьезоэлектрический преобразователь давления, неньютоновские жидкости, падающий груз, электрический взрыв проводников, ударная волна, конденсированная среда, разрядная камера

*A. L. Surkaev, R. K. Arghuhanov, K. A. Kirakosan***WAVEGUIDE PIEZOELECTRIC PULSE PRESSURE TRANSDUCER****Volgograd State Technical University**

This paper presents a waveguide piezoelectric pressure transducer based on piezoceramics (TsTS-19), the reactive acoustic waveguide of which is made of a mixture of materials related to non-Newtonian fluids. Its design is described, a calibration technique is proposed, and experiments are conducted to determine the value of the conversion factor. Calibration units are presented, the operating principle of which is based on the method of a falling weight and pulsed electromechanical action.

Keywords: waveguide piezoelectric pressure transducer, non-Newtonian fluids, falling weight, electrical explosion of conductors, shock wave, condensed medium, discharge chamber

Введение

Разрядно-импульсные технологии (РИТ) в современном мире находят широкое применение при решении прикладных и фундаментальных задач. На сегодняшний момент исследование пространственно-временных характеристик генерируемых ударных волн электрического разряда, в частности, представляет собой огромный интерес и является актуальной задачей. Для получения необходимой и достоверной информации о параметрах ударно-волновых возмущений разрабатываются и применяются различного рода методы и приборы ис-

следования [1–4]. Одно из перспективных и наиболее распространенных направлений, применяемых в методах исследования быстропротекающих процессов, базируется на использовании прямого пьезоэлектрического эффекта. Так, в частности, различного рода преобразователи, созданные на основе природных материалов (кварц, турмалин, ниобат лития и др.), искусственных и специально поляризуемых в электрическом поле пьезоэлектрических материалов (пьезокерамика типа титаната бария, титаната свинца, цирконата свинца и др.). Следует отметить, что пьезокерамика имеет ряд

преимуществ по отношению к перечисленным преобразователям. Чувствительность пьезокерамики ЦТС-19 в десятки раз превосходит чувствительность кристаллов кварца, применяемого как в зарубежных, так и отечественных датчиках, имеет достаточно высокое значение температуры точки Кюри (более 290 °С) и сохраняет постоянство пьезоэлектрических свойств до давления в несколько сотен атмосфер.

Дальнейшее расширение технических возможностей измерительной аппаратуры обуславливает необходимость не только разработки, в частности, новых пьезодатчиков давления, но и усовершенствования имеющегося стендового оборудования для их испытания и градуировки. В работе [5] приводится описание простых и дешевых пьезокерамических датчиков на основе пьезокерамики ЦТС-19 для измерения быстроменяющихся и пульсирующих давлений. Испытания и исследования характеристик датчиков проводились на статическом и динамическом стендах и в ударной трубе.

Большое число современных технологии связаны с измерением давлений в объемах жидкости на значительных расстояниях от канала разряда. В связи с этим в целях расширения технологических возможностей возникает актуальная задача – регистрация импульсного давления в закрытом объеме воды при повышенных гидростатических давлениях и близком расстоянии от источника ударных возмущений [6]. Для тарировки и испытаний предложенного датчика авторами использовалась разрядная камера высокого давления, позволяющая поддерживать гидростатическое давление и близость приемной части датчика к каналу разряда (источнику гидродинамического возмущения – волны импульсного давления).

Целью работы является разработка конструкции волноводного пьезоэлектрического преобразователя давления, позволяющего регистрировать параметры ударных волн, воздействующих на поверхность обрабатываемого объекта в жидкости, а также методики его градуировки.

Конструкция волноводного пьезоэлектрического преобразователя давления

На рис. 1 представлена конструкция преобразователя и его основные элементы, на фото (рис. 2) – внешний вид. Волноводный пьезоэлектрический преобразователь давления [7] содержит пьезоэлектрическую таблетку 1, приемный волновод 2 в виде цилиндра и реактивный волновод 3 в виде цилиндра из смеси материалов неньютоновских жидкостей. Сопряженные торцы волноводов 2, 3 и пьезоэлектрическая таблетка 1 склеены между собой эпоксидной смолой. Конструкция размещена в полости цилиндрического механически прочного диэлектрического корпуса 5. Отличительной особенностью волноводного пьезоэлектрического преобразователя давления заключается в том, что реактивный волновод (акустический волновод, установленный с противоположной стороны пьезоэлемента относительно активного приемного волновода) выполнен в виде цилиндра из смеси химически чистого силикона ($[R_2SiO]_n$) и кварцевого песка (SiO_2), которые следует рассматривать как неньютоновские жидкости. Выполнение активного приемного волновода в виде цилиндрического стержня позволяет реализовать возможность регистрации мощных ударных волн произвольного профиля волнового фронта на близком расстоянии от канала разряда в объеме жидкости и эффектив-

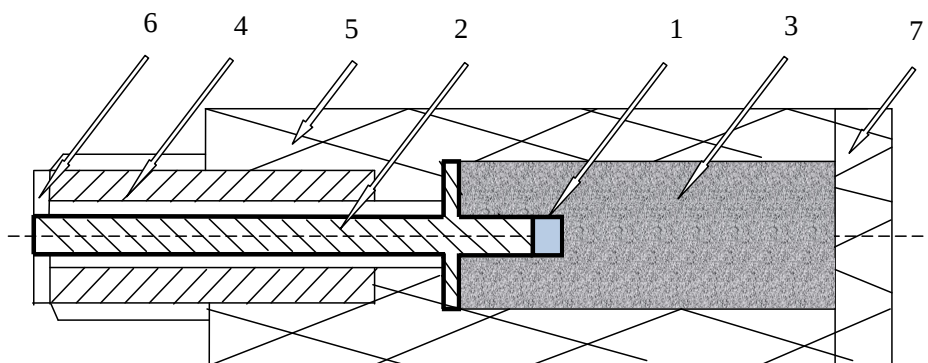


Рис. 1. Волноводный пьезоэлектрический преобразователь давления:

1 – пьезоэлектрический элемент; 2 – активный волновод; 3 – реактивный волновод; 4 – металлическая часть корпуса с резьбовым креплением; 5 – основная часть корпуса; 6 – гидроизоляционная шайба; 7 – крышка

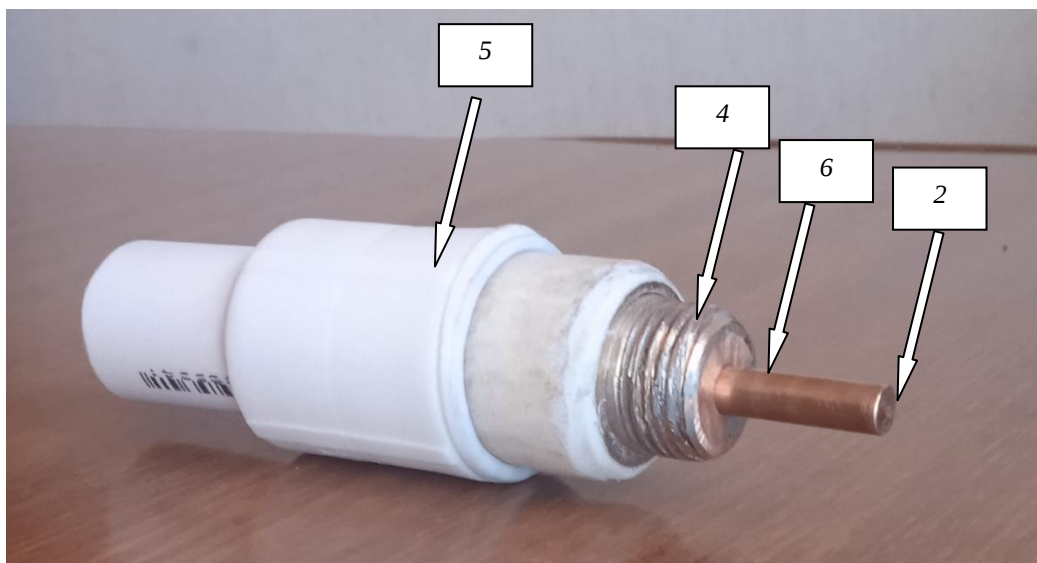


Рис. 2. Волноводный пьезоэлектрический преобразователь давления:
2 – активный волновод (торец волновода выполнен в единой плоскости с торцом корпуса и положение показано в состоянии его сборки); 4 – металлическая часть корпуса с резьбовым креплением;
5 – основная часть корпуса; 6 – гидронизоляционная шайба

ную помехоустойчивость от паразитного электромагнитного излучения высоковольтного электрического разряда. Одним из основных требований, накладываемых при применении акустических волноводов в различных конструкциях, является акустическое согласование материалов пьезокерамики и волновода. Наилучшими в этом соотношении являются пьезокерамика ЦТС-19 и металл бериллий, то есть $\rho_k c_k \approx \rho_\theta c_\theta$, где ρ_k, c_k и ρ_θ, c_θ – плотность и скорость звука в керамике и в бериллии, соответственно. Так, для керамики – $\rho_k c_k \approx 23,68 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{с}}$ и бериллия

$\rho_\theta c_\theta \approx 23,18 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{с}}$. Вариации пропорций смеси силикона и кварцевого песка (неньютоновские жидкости) для реактивного волновода позволяют приблизиться к данным параметрам,

в частности, $\rho_n c_n \approx 22,34 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{с}}$. Неньютоновские жидкости при высокоскоростном, импульсном механическом воздействии на них ведут себя подобно механически твердым телам, имеющим жесткую кристаллическую структуру. Кроме того, они обладают высоким коэффициентом поглощения звуковых волн в широком диапазоне частот. Поэтому не будет возникать паразитного возмущения, отраженного от конца реактивного волновода, негативно влияющего на полезный сигнал пьезоэлектрического преобразователя.

Методики градуировки

Метод градуировки посредством падающего груза имеет достаточно убедительное теоретическое обоснование и широко используется на практике [8–10]. Используя результаты математического моделирования процесса механического импульсного воздействия, оказываемое на стержневой волновод при условии абсолютной жесткости границы [11] пьезокерамика–реактивный волновод, и считая, что возникающее механическое напряжение – импульс давления $p(t)$ в волноводе пропорционально напряжению пьезогенератора, имеем: $p(t) = k U(t)$. Переводной коэффициент равен:

$$k = \frac{C_k \rho_2 c_2^2}{\pi r^2 \theta E_2 \chi},$$

где r_0 – радиус пьезоэлемента, θ – пьезоэлектрический модуль керамики, C_k – емкость керамики, E_2 – модуль Юнга керамики. ($\chi = (\cos(\omega t) + \sin(\omega t) - \exp(-\omega t))$). На рис. 3 представлены характерная осциллограмма электрического импульса $U(t)$ механического воздействия падающего груза на волновод и осциллограмма прямоугольного сигнала, позволяющего определить время контакта падающего груза с волноводом. Масса падающего груза $m = 6 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$, высота подъема $h = 9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Время взаимодействия определяется из осциллограммы прямоугольного им-

пульса. Радиус пьезоэлемента $r_0 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Волноводный преобразователь давления распо-

ложен горизонтально и закреплен на массивном основании.

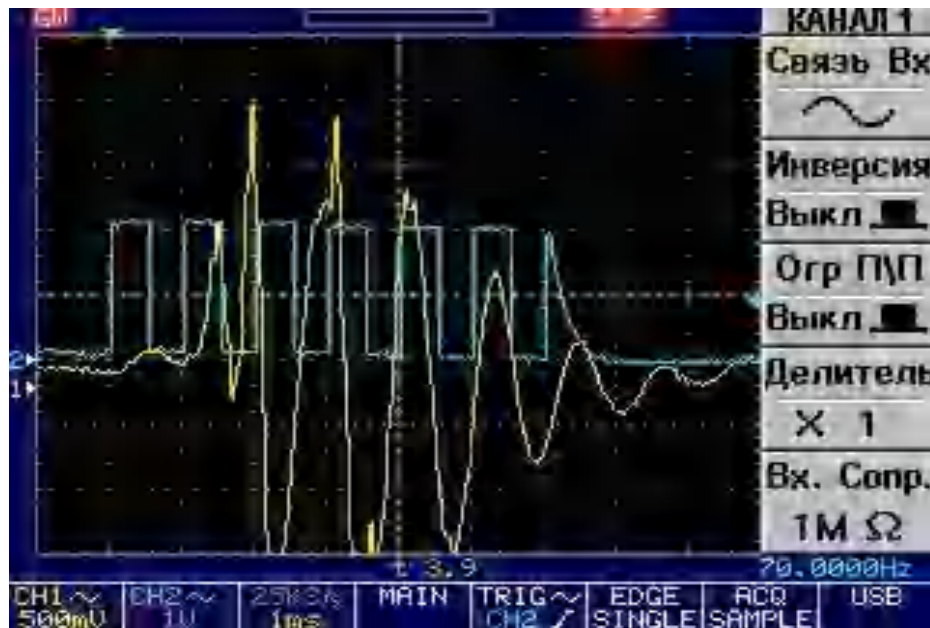


Рис. 3. Характерная осциллограмма генерируемого напряжения пьезопреобразователем давления, получаемая при импульсном механическом воздействии падающего груза на приемный волновод. Прямоугольный сигнал показывает время взаимодействия падающего груза с волноводом

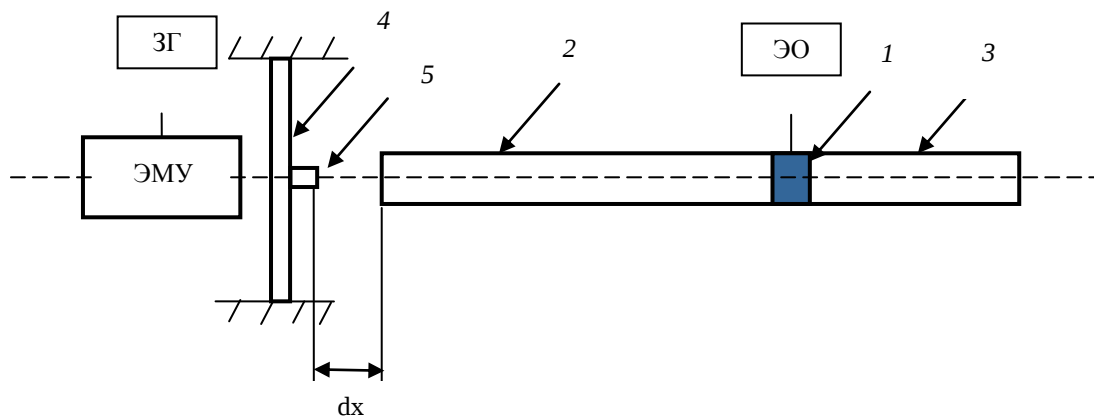


Рис. 4. Схема градуировки преобразователя методом электромагнитного механического воздействия:
1 – пьезоэлемент; 2 – активный волновод; 3 – реактивный волновод; 4 – колеблющееся устройство; 5 – падающее тело (шток);
ЭМУ – электромагнитное устройство; ЗГ – звуковой генератор; ЭО – электронный осциллограф

Другой вариант метода градуировки основывается на формировании импульсного ударного возмущения в преобразователе давления с использованием вынужденных колебаний воздействующего тела – ударника (рис. 4). Электрический сигнал частотой $\nu \approx 20 \div 150 \text{ Гц}$ подается на электромагнитное устройство, посредством которого генерируются механические колебания ударника по аналогии с падающим телом. При возбуждении колебаний ударник достигает торца активного волновода, генерируя в нем акустическое возмущение, кото-

рое регистрируется электронным осциллографом. Измеряя расстояние между ударником и волноводом dx , можно определить амплитуду колебаний. Проводя тривиальные математические действия для колеблющегося тела, имеем:

$$x = A \sin(\omega t), \quad a = A \omega^2 \sin(\omega t),$$

$$p = m A S^{-1} \omega^2 \sin(\omega t),$$

где x – смещение; A – амплитуда; $\omega = 2\pi\nu$ – частота; a – ускорение; m – масса падающего тела; p – импульсное давление; S – площадь сечения активного волновода. Результат показан на рис. 5.

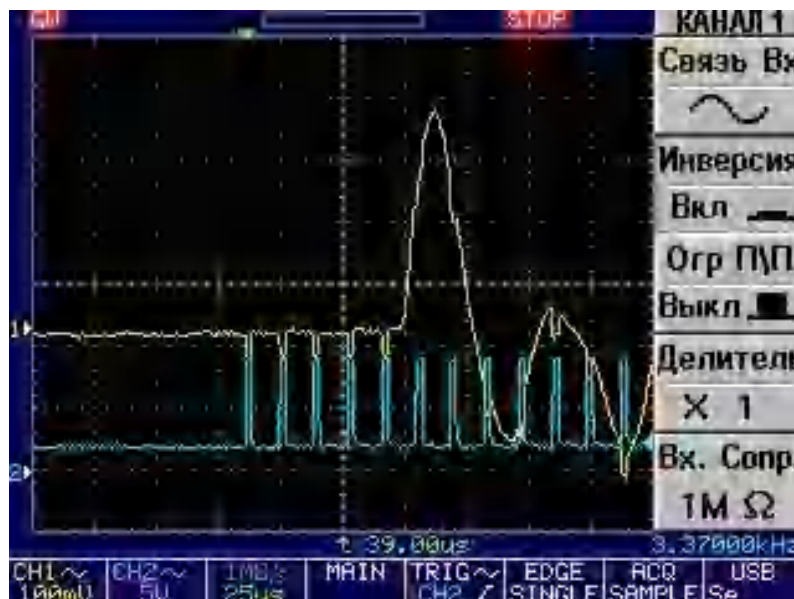


Рис. 5. Характерная осциллограмма генерируемого напряжения пьезопреобразователем давления, получаемая при импульсном механическом воздействии падающего груза на приемный волновод. Прямоугольный сигнал показывает время взаимодействия падающего груза с волноводом

В задачах широкого спектра ударно-волновое воздействие передается на обрабатываемый объект посредством ударных волн, распространяющихся в конденсированной среде. Для получения достоверной информации и корректного приближения к условиям рассматриваемых задач при регистрации импульса давления необходимо градуировку волноводного пьезоэлектрического преобразователя производить в присутствии конденсированной среды, как непосредственного воздействующего элемента на выделенный предмет. Для того чтобы смоделировать возбуждение и распространение ударной волны в конденсированной среде, в нашем случае дистиллированной воде, по аналогии с [12], разработана (рис. 6) градуировочная экспериментальная установка. На торце стенки закрытой цилиндрической камеры 1 устанавливается волноводный пьезоэлектрический преобразователь давления 2. Камера заполняется передающей конденсированной средой – водой 4. Поршень 3, на который воздействует падающий груз 5 при отклонении на изменяемый угол α , формирует в цилиндре импульс давления. Цилиндр 2 располагается горизонтально, опираясь на жесткую плиту. Электрический сигнал $U(t)$, генерируемый пьезоэлектрическим преобразователем 1, через соответствующую RC-цепь регистрируется запоминающим цифровым осциллографом – ЭО. Как было указано выше, в качестве реактивного акустического волновода применялась вещество, относящееся к неньютоновской жидкости, что позволяет избежать регист-

рации и учета отраженного от противоположной стенки паразитного сигнала, приблизить акустические сопротивления пьезокерамики и смеси, а также применить понятие абсолютной жесткой границы.

Падающий груз в виде бойка на рукоятке, расположен на вертикальной стойке с возможностью изменения положения посредством шарнирного устройства. Изменение угла обеспечивает возможность вариации запасенной потенциальной энергии падающего груза и, соответственно, принять скорость удара груза о поршень. Механический импульс, полученный поршнем, трансформируется в импульс давления акустической волны, воздействующий на пьезопреобразователь. Электрический сигнал $U(t)$, генерируемый пьезокерамическим преобразователем, регистрируется запоминающим цифровым осциллографом ЭО. Расчет амплитуды импульсного давления осуществляется исходя из законов сохранения:

$$(M + m)gH = \frac{J\omega^2}{2},$$

где M – масса бойка; m – масса рукоятки, принимаемой как однородный стержень длиной ℓ ; J – момент инерции падающего груза относительно оси вращения (рукоять и боек), H – высота подъема; R – радиус вращения падающего груза. Таким образом, для линейной скорости $v = \omega R$ имеем:

$$v = \sqrt{\frac{2(M + m)gH}{J}} R.$$

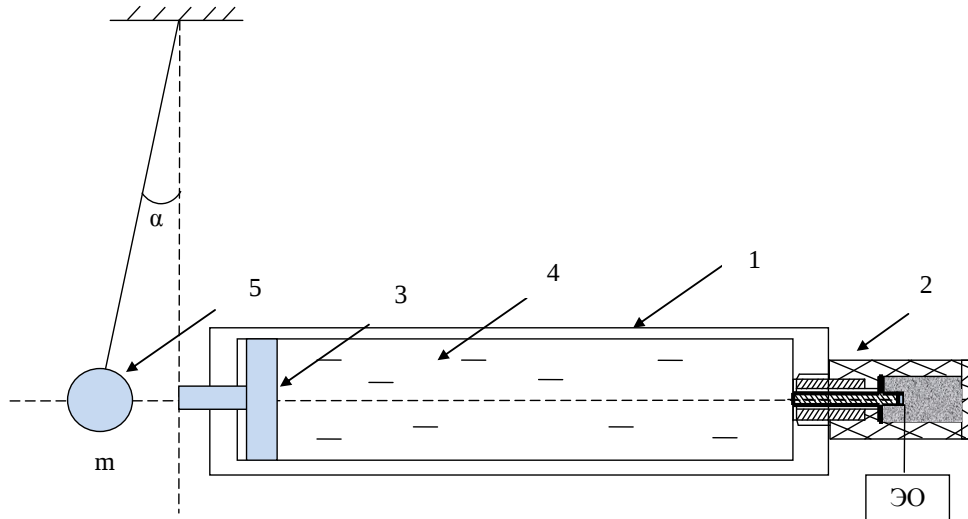


Рис. 6. Схема установки для градуировки волноводного пьезоэлектрического преобразователя давления:
1 – цилиндрическая разрядная камера; 2 – волноводный пьезоэлектрический преобразователь давления;
3 – поршень; 4 – передающая среда; 5 – падающий груз; ЭО – электронный запоминающий осциллограф

Далее, используя основное уравнение динамики вращательного движения, определим среднее значение силы действующей на жидкость:

$$F = \frac{\Delta L}{R\Delta t} = \frac{J\omega}{R\Delta t} = \frac{1}{R\Delta t} \sqrt{2(M+m)JgH},$$

где ΔL – момент импульса падающего груза; Δt – длительность взаимодействия. Зная площадь поперечного сечения поршня S , можно оценить величину импульса давления в жидкости:

$$P = \frac{F}{S} = \frac{1}{R\Delta t S} \sqrt{2(M+m)JgH}.$$

Масса бойка	Масса рукоятки	Длина рукоятки	Масса поршня	Площадь поршня	Расстояние от оси вращения до центра масс бойка	Высота подъема центра масс
$M, \text{ кг}$	$m, \text{ кг}$	$\ell, \text{ м}$	$m_0, \text{ кг}$	$S, \text{ м}^2$	$R, \text{ м}$	$H, \text{ м}$
0,480	0,180	0,313	0,096	$2,78 \cdot 10^{-3}$	0,35	0,35-0,55

На рис. 7 показаны характерные осциллограммы генерируемого напряжения пьезопре-

образователем давления $p(t) = kU(t)$ от величины механического возмущения.

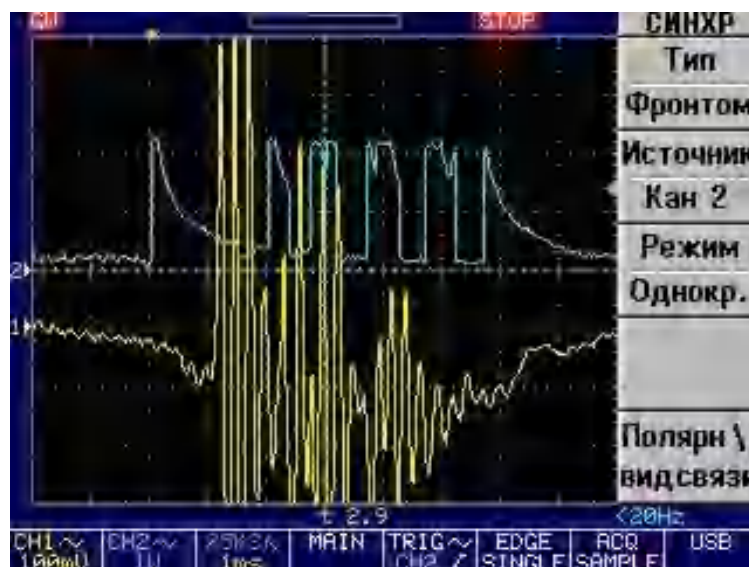


Рис. 7. Характерная осциллограмма генерируемого напряжения пьезопреобразователем давления, получаемая при импульсном механическом воздействии падающего груза на приемный волновод. Прямоугольный сигнал показывает время взаимодействия падающего груза с волноводом

В результате проведенных экспериментов и анализа результатов получены значения переводного коэффициента для волноводного пьезоэлектрического преобразователя давления с убедительной согласованностью при использовании представленных методик градуировки:

$$k_1 = 1.2 \cdot 10^6 \text{ Па/В}, \quad k_2 = 4.8 \cdot 10^6 \text{ Па/В}, \\ k_3 = 4.20 \cdot 10^6 \text{ Па/В}.$$

Заключение

Таким образом, в работе представлен волноводный пьезоэлектрический преобразователь давления, реактивный акустический волновод которого выполнен из смеси материалов, относящихся к неньютоновским жидкостям. Рассмотрены методики градуировки, принцип действия которых основывается на импульсном механическом воздействии на преобразователь. Проведены эксперименты по определению значения переводного коэффициента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пьезоэлектрическое приборостроение: сборник в 3-х т. / под ред. А. Е. Панича. – Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ, 2006.
2. A. Grinenko, V. Ts. Gurovich, Ya. E. Krasik and others / Analysis of shock wave measurements in water by a piezoelectric pressure / Review of scientific instruments V. 75, N. 1 J. 2004. DOI: 10.1063/1.1630832.
3. Кочетков, И. И. Ударно-волновые процессы при взрыве проводников в воде и пузырьковых средах / И. И. Кочетков, А. В. Пинаев // Физика горения и взрыва. – 2015. – Т. 51, № 6. – С. 109–119.
4. Sankarsan, Padhy, Susmita Panigrahi / Measuring Projectile Velocity using Shock Wave Pressure Sensors Defence Science Journal, Vol. 64, No. 6, November 2014, pp. 499–501. DOI : 10.14429/dsj.64.8108.
5. Голуб, В. В. Пьезокерамические датчики для измерения быстроменяющихся и пульсирующих давлений / В. В. Голуб, Ю. В. Жилин, Н. А. Марчук // Приборы и техника эксперимента. – 2018. – № 4. – С. 132–139. DOI: 10.1134/S0032816218040055.
6. Жекул, В. Г. Пьезоэлектрический волноводный датчик для измерения импульсного давления в замкнутых объемах жидкости при высоковольтном электрическом разряде / В. Г. Жекул, А. П. Смирнов и др. // Электротехника і Електромеханіка. – 2017. – № 5. DOI: 10.20998/2074-272X.2017.5.09.
7. Волноводный датчик импульсных давлений ПМ МПК G01L 23/10 (2006.01) № RU 204491 U1 / А. Л. Суркаев, Д. А. Канцдалов, В. И. Усачев, В. А. Суркаев ; ВолгГТУ. – Волгоград. Заяв.: 2021103134, 10.02.2021, Опубл.: 27.05.2021, Бюл. № 36.
8. Бескаравайный, Н. М. Теоретические основы измерения импульсных давлений в жидких средах / Н. М. Бескаравайный, В. В. Поздеев. – Киев: Наукова думка, 1981. – 190 с.
9. Позднеев, В. А. Математическая модель процесса градуировки волнового пьезокерамического датчика методом падающего шарика / В. А. Позднеев, Вад. А. Позднеев, В. В. Тульский // Сб. науч. стат. Процессы преобразования энергии при электровзрыве. – Киев: Наукова думка, 1988. – С. 94–101.
10. Юсупов, Р. Ю. Измерение импульсных давлений в объеме расплава в условиях интенсивных импульсных помех / Р. Ю. Юсупов, Е. Е. Кострюков // Вестник Самарского аэрокосмического университета № 5 (36). – 2012. – С. 257–262.
11. Surkaev, A. L. Investigation of a pulsed waveguide piezoelectric pressure sensor / Surkaev A.L., Kul'kov V. G. // Acoustical Physics. Volume 52, Number 2 / 2006. – P. 218–221.
12. Суркаев, А. Л. Методика измерения давления ударно-акустической волны электрического взрыва проводника в разрядной камере с конденсированной средой / А. Л. Суркаев, Ю. П. Муха // Контроль. Диагностика. – 2020. – Т. 23. – № 8. – С. 50–55.