

# ПЕРВИЧНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ КАВИТАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ

С.С. Зорин, С.Н. Цыганок, В.А. Нестеров

*Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Бийск*

Статья посвящена детальному рассмотрению конструкции и принципам работы первичного измерительного преобразователя для оценки кавитационной активности (интенсивности распространяемых в технологической среде ультразвуковых колебаний ( $\text{Вт/см}^2$ ) и их частоты (КГц)) в целях контроля параметров ультразвукового воздействия. В статье прослеживаются ключевые особенности данного датчика: способность оценивать физическую величину в условиях агрессивной технологической среды и его применимость в труднодоступных участках технологических объемов, используемых в производственных или исследовательских целях. Так же автор приводит некоторые сведения о результатах исследования готового датчика и адекватности его измерительных характеристик.

*Ключевые слова:* кавитация, ультразвук, датчик, прямой пьезоэффект

## ВВЕДЕНИЕ

В современном мире не представляется возможным найти хотя бы одну отрасль производства, не нуждающуюся в проведении тех или иных видов измерений. Переработка природного или синтетического сырья, рыболовный промысел, швейное дело – в одних областях можно ограничиться элементарными средствами измерения с низкой точностью, другим же требуются высокоточные электронные измерительные системы.

В последние годы активно развивается тенденция применения ультразвуковых колебаний высокой интенсивности для ускорения протекания различных физико-химических процессов, преимущественно в жидкой среде. Для достижения этой цели используется явление ультразвуковой кавитации. Однако часто достаточно проблематично осуществить измерение интенсивности кавитации, возникающей в технологическом объеме [1]. Для этого требуется специфичное средство измерения (кавитометр, гидрофон) с особым строением датчика, рассмотрению которого посвящена данная статья.

Целью исследования является разработка пьезоэлектрического первичного измерительного преобразователя для проведения измерений характеристик кавитационной активности в жидкой агрессивной среде.

## ТРЕБОВАНИЯ К ДАТЧИКУ

Согласно цели, поставленной в начале статьи, рассматриваемый датчик должен удовлетворять ряду следующих требований:

- 1) высокая чувствительность к воздействующим извне механическим колебаниям;
- 2) широкий частотный диапазон в пределах максимально возможной линейности функции преобразования;
- 3) возможность работы в термически агрессив-

ной (кипящие жидкости) технологической среде без разрушения деталей датчика;

4) возможность работы в химически агрессивной (растворы кислот и щелочей с высокой концентрацией, органические растворители) технологической среде без разрушения деталей датчика;

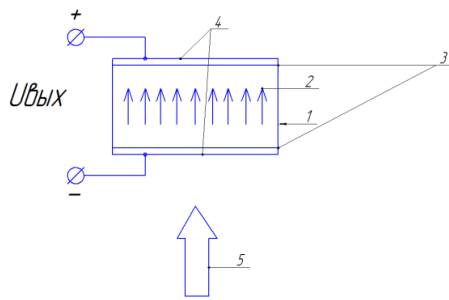
5) минимальное влияние окружающей среды на достоверность полезного сигнала датчика;

6) высокая портативность (компактность и малый вес), возможность использования при необходимости в труднодоступных участках технологических объемов;

7) высокая ремонтпригодность [2].

## ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Принцип действия рассматриваемого первичного измерительного преобразователя основан на прямом пьезоэлектрическом эффекте (рис. 1). Этот эффект заключается в том, что под влиянием внешнего механического воздействия, приводящего к деформации пьезокерамического чувствительного элемента, на гранях последнего возникает электрический заряд. Образовавшаяся на этих гранях разность потенциалов позволяет получить напряжение, пропорциональное деформации кристалла (следовательно, внешнему механическому воздействию). Это напряжение, представляющее собой измерительный сигнал, снимается посредством металлических проводников.



1 – пьезокристалл, 2 – направление деформации ячеек кристалла, 3 – противоположные грани кристалла, 4 – электроды с припаянными проводниками, 5 – направление внешнего воздействия

**Рис. 1. Прямой пьезоэлектрический эффект**

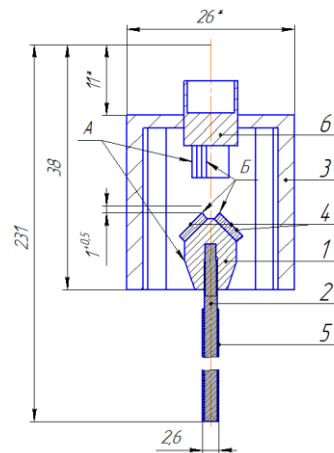
В виду того, что пьезоэлектрикам присуще явление полярности (наибольшая деформация ячеек пьезокристалла происходит в выделенном направлении), измерительный сигнал может иметь как положительный, так и отрицательный знак, что было необходимо учитывать при проектировании и сборке датчика [3].

### КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ

Для соблюдения всех требований, предъявляемых к датчику, определены следующие конструктивные подходы к реализации рассматриваемого пьезоэлектрического преобразователя.

В качестве чувствительного элемента выбран плоский параллелепипед, изготовленный из ЦТС-19, электрофизические характеристики которого достаточны для применения его в средствах измерения. Малые геометрические размеры (5x5x1,25 мм) позволят избежать возникновения лишних колебательных мод по всем его координатным осям и уменьшить количество собственных резонансов в начале частотного диапазона, в котором планируется проводить исследования [4].

Контакт пьезокерамики с технологической средой, в которой осуществляется процесс измерения, обеспечивает волновод частично погружного типа из стальной проволоки диаметром 2 мм. Такой подход позволяет изгибать волновод под произвольным углом (более 90°). Конструкция преобразователя (рис. 2) предусматривает возможность замены волновода при нарушении его изоляции или необходимости применения волновода другой длины или формы.



1 – крепление волновода, 2 – волновод, 3 – корпус, 4 – чувствительные элементы, 5 – трубка Ф-4Д, 6 – разъем-штекер USB Type C, А и Б – точки пайки сигнальных проводов соответствующей полярности, \* – размеры для справок

**Рис. 2. Первичный измерительный преобразователь**

Жесткую фиксацию волновода относительно чувствительного элемента обеспечивает крепление волновода. В нем предусмотрено резьбовое соединение между ним и сменным волноводом. Это позволит максимально нивелировать потери колебаний между точкой контакта со средой и пьезокерамикой.

Корпус датчика изготовлен по технологии быстрого прототипирования FDM. Данный подход обусловлен простотой выполнения, дешевизной и доступностью.

Внутри гидрофона от пьезокерамики до разъема USB Type C проходят сигнальные провода (на рисунке не изображены), в качестве которых используются медные многожильные проводники сечением 0,25 мм во фторопластовой оплетке. Соединение посредством USB Type C выбрано ввиду своего удобства.

Все свободное пространство внутри корпуса датчика при сборке заполняется раствором эпоксидной смолы ЭД-20 и отвердителя ПЭПА.

Для механической защиты волновода, исключения контакта с технологической средой, а также снижения влияния колебаний, направленных поперек его рабочей оси (что так же может нарушить достоверность измерительной информации), целесообразно использовать фторопласт-4. Данный материал выбран потому, что фторопласт-4 является самым стойким из всех известных материалов – пластмасс, металлов, стекла, эмалей, сплавов и т.п. На него совершенно не действуют кислоты, окислители, щелочи, растворители. При прочих равных условиях данный материал защитного слоя проводящего элемента может эксплуатироваться от минус 260 °С до плюс 260 °С. Фторопласт-4 не смачивается водой при кратковременном погружении (угол смачивания 126°), но смачивается при длительном пребывании в дистиллированной во-

де от 15 до 20 суток. В соленой воде (например, морской) на поверхности фторопласта-4 спустя от пятнадцати до двадцати суток отлагается пленка солей, смываемая дистиллированной водой. Коэффициент трения фторопласта-4 по стали ничтожен при широкой вариативности условий эксплуатации и резко возрастает лишь при эксплуатации при температуре 327 °С (в несколько раз), что приводит к катастрофически быстрому износу и разрушению материала защитного слоя датчика [5].

Готовый датчик монтируется внутри корпуса измерительного прибора. Его крепление является разъемным (фиксация осуществляется посредством фланца и двух винтов). Конструкция фланца при этом предусматривает дизайнерское углубление, для возможности смены волноводов без извлечения самого датчика.

#### АЧХ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА И ДАТЧИКА

В качестве доказательной базы для обоснования выбора конкретного пьезокерамического элемента было проведено экспериментальное получение АЧХ (амплитудно-частотной характеристики) на лабораторном стенде по следующей методике:

1) к контактным поверхностям (серебряное напыление) пьезокерамики припаяны тонкие 0,25 мм в сечении медные проводники;

2) последовательно пьезокерамике в измерительную цепь был включен (паяным соединением) резистор номиналом в 1 кОм (номинал взят произвольно);

3) на свободные концы проводников подавался сигнал синусоидальной формы с последовательно изменяемой в порядке возрастания в диапазоне от 1 до 200 кГц с шагом в 1 кГц частотой. Сигнал получен с помощью генератора НЧ сигналов ГЗ-112;

4) параллельно подключенный к резистору в измерительной цепи высокочастотный электрический щуп (имеет интерфейсный разъем типа BNC) передавал измерительный сигнал на осциллограф С1-55. При этом в ходе проведения всех измерений дополнительное усиление или ослабление сигнала, поступающего с генератора, не осуществлялось;

5) по показаниям осциллографа проводилась фиксация амплитуды колебаний электрического сигнала на резисторе (экспериментальные данные в табличном виде не включены в статью в виду своей громоздкости, только в графическом представлении);

6) при разработке чертежей, изготовлении деталей и последующей сборки предложенной конструкции датчика значительно изменились его массогабаритные характеристики (в сравнении с отдельным пьезоэлементом), удвоилось количество чувствительных элементов. Это могло привести к появлению изменений в характере АЧХ всего датчика. Поэтому был проведен повторный измерительный опыт с целью определения характера и масштаба изменений;

7) одинаковая измерительная схема и методика применялась в отношении как пьезокерамики отдельно, так и датчика в целом. По полученным в ходе измерительного эксперимента данным были построены кривые АЧХ в одной координатной плоскости (рис. 3).

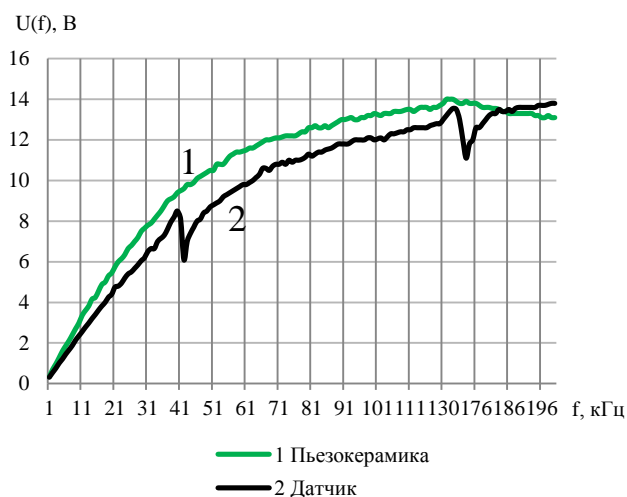


Рис. 3. АЧХ чувствительного элемента и датчика

При анализе графиков на рисунке 3 можно сделать вывод, что общий характер АЧХ сохранен. При равном в обоих случаях сигнале с генератора (на всем частотном диапазоне с учетом всех погрешностей) амплитуда выходного сигнала, снимаемого с резистора в измерительной цепи, несколько снизилась (с максимальной разницей, равной 2 В), что объяснимо увеличением массы датчика, после дополнения пьезокерамического элемента креплением волновода. Этой же разницей в массе, а так же возможной неравномерностью металла (наличия микропузырьков в металлическом объеме) и дополнительным демпфированием эпоксидной смолой, обусловлено наличие двух устойчивых искажений в АЧХ датчика. Изменение геометрических размеров привело к снижению порога появления собственной резонансной частоты пьезопреобразователя. Данные искажения могут быть учтены при математической обработке введением кусочной аппроксимации этих участков на интервалах по 2 кГц.

#### ПОДХОД К ПОЛУЧЕНИЮ ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДАТЧИКА

Весь частотный диапазон, рассмотренный в измерительном эксперименте, использовать нецелесообразно. Это объясняется тем, что подавляющее большинство ультразвуковых колебательных систем, применяемых для интенсификации технологических процессов в жидких средах, работают в достаточно узком диапазоне частот от 15 кГц до 45 кГц, а частота аку-

стического шума, возникающего при таком воздействии, в несколько раз (иногда в несколько десятков раз) меньше частоты излучаемых системой колебаний (если не учитывать гармонические составляющие). В данном случае достаточно короткого участка в пределах от 1 кГц до 40 кГц. При рассмотрении графиков на рисунке 3 очевидно, что на данном участке АЧХ имеет относительно линейный характер, что позволяет снизить влияние частоты колебаний на функцию преобразования.

Получение функции преобразования в табличном виде, пригодном для дальнейшей аппроксимации, целесообразно путем эмпирической калибровки за счет воздействия на готовый датчик ультразвуковой колебательной системы с известными характеристиками [2].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования разработан комплект конструкторской документации для изготовления первичного измерительного преобразователя, основанного на прямом пьезоэлектрическом эффекте. Данный датчик предназначен для использования в составе электронного измерительного прибора определения характеристик кавитационной активности.

К достоинствам конструкции полученного датчика можно отнести:

- 1) высокая чувствительность к воздействующим извне механическим колебаниям;
- 2) широкий рабочий частотный диапазон в пределах зоны максимальной равномерности АЧХ;
- 3) возможность работы в термически (кипящие жидкости) и химически агрессивной (растворы кислот и щелочей с высокой концентрацией, органические растворители) технологической среде без разрушения деталей датчика;
- 4) компактность, малый вес и возможность использования в труднодоступных участках технологических объемов.

Недостатком является сложность полученной функции преобразования.

Для достижения поставленной в начале исследования цели был выполнен ряд следующих задач:

- 1) проведен анализ научно-технической литературы с описанием конструкции пьезоэлектрических преобразователей, материалов, используемых для их изготовления, а также принципов их работы;
- 2) составлена подробная формулировка требований к разрабатываемому датчику, осуществлен выбор и обоснование конструкторского подхода, используемого при его проектировании;
- 3) благодаря изготовлению натурального прототипа датчика по разработанным чертежам осуществлено экспериментальное определение его АЧХ, на основании анализа которого выбрана наиболее оптимальный с точки зрения измерительных характеристик подход к построению функции преобразования.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1) Хорбченко, И.Г. Звук. Ультразвук. Инфразвук [Текст] / И.Г. Хорбченко. – М.: Знание, 1986.
- 2) Шарапов, В.М. Датчики: Справочное пособие [Текст] / В.М. Шарапов, Е.С. Полищук, Н.Д. Кошевой, Г.Г. Ишанин, И.Г. Минаев, А.С. Совлуков. — М.: Техносфера, 2012.
- 3) Гальперина, А.Н. К конструктивному расчету пакетных пьезокерамических преобразователей [Текст] / А.Н. Гальперина // Промышленное применение токов высокой частоты: сб. трудов ФГУП «ВНИИТВЧ». – 1966.
- 4) Пьезокерамические материалы и элементы. Каталог продукции ОАО «НИИ «Элла» [Электронное текстовое издание]. Режим доступа: <https://goo.gl/RQUYeZ> (дата обращения 22.04.2017).
- 5) Фторопласт-4. Электронный справочник компании «Фторопластовые Технологии» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://goo.gl/q2QLeH> (дата обращения 10.04.2017).

*Зорин Сергей Сергеевич – студент четвертого курса Технологического факультета, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», e-mail: separamed@gmail.com.*

*Цыганок Сергей Николаевич – канд. техн. наук, доцент каф. методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», e-mail: grey@bti.secna.ru.*

*Нестеров Виктор Александрович - канд. техн. наук, доцент каф. методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», e-mail: nva@bti.secna.ru.*

## PRIMARY MEASURING TRANSDUCER OF ACTIVITY OF CAVITATION

S.S. Zorin, S.N. Tsyganok, V.A. Nesterov

*Biysk Technological Institute, Biysk*

The article is devoted to a detailed consideration of the design and operation principles of the primary measuring transducer for assessing activity of cavitation (intensity of ultrasonic vibrations are propagated in the technological medium ( $W/cm^2$ ) and their frequency (KHz)) in order to control the parameters of ultrasonic action. The key features of this sensor are traced in the article: the ability to estimate the physical value in the conditions of an aggressive technological environment and its applicability in hard-to-reach areas of technological volumes used for production or research purposes. The author also gives some information about the results of the investigation of the finished sensor and the adequacy of its measurement characteristics.

*Index terms: cavitation, ultrasound, sensor, direct piezoelectric effect.*

### REFERENCES

1. Khorbchenko, I.G. Sound. Ultrasound. Infrason. Moscow, Russia: Znanie, 1986.
2. Sharapov, V.M. Sensors: A Reference Guide. Moscow, Russia: Technosphere, 2012.
3. Galperina, A.N. To the design calculation of batch piezoceramic transducers. Moscow, Russia: FGUP «VNIITVCH». 1966.
4. Piezoceramic materials and elements. Product Catalog of PAS «NRI «ELPA». Url: <https://goo.gl/RQUYeZ>.
5. Fluoroplastic-4. Electronic reference book of the company «Fluoroplast Technologies». Url: <https://goo.gl/q2QLeH>.

*Zorin Sergey Sergeevich – student of the fourth year of the Faculty of Technology, Biysk Technological Institute, e-mail: separamed@gmail.com.*

*Tsyganok Sergey Nikolaevich – Ph. D., associate professor at the char of methods and means of measurement and automation, Biysk Technological Institute, e-mail: grey@bti.secna.ru.*

*Nesterov Victor Alexandrovich – Ph. D., associate professor at the char of methods and means of measurement and automation, Biysk Technological Institute, e-mail: nva@bti.secna.ru.*