

# СПОСОБ ПЕРЕДАЧИ ЗАБОЙНОЙ ИНФОРМАЦИИ АКУСТИЧЕСКИМИ МЕТКАМИ ПРИ ТУРБИННОМ БУРЕНИИ

Г.А. Хмара, Ю.А. Савиных

(Тюменский государственный нефтегазовый университет)

*Преобразователь звука, частота, скорость звука, давление,  
акустическая метка*

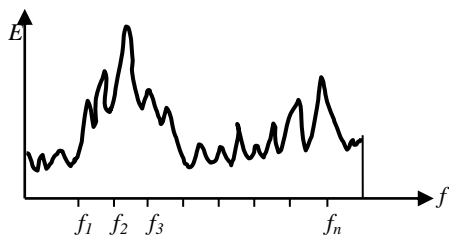
*Sound converter, frequency, speed of sound, pressure, acoustic tag*

**Technical solutions for transmission of bottomhole parameters by acoustic tags during downhole turbine motor drilling.**  
Khmar G.A., Savinykh Yu.A.

*A technical solution is proposed for transmitting the low-frequency signal from the bottom of the hole. A dependence of the acoustic tag on acoustic sound speed and pressure is identified. The features of the proposed sound converters functioning are analyzed. A quarter-wave converter was chosen. To obtain a reliable information from the bottomhole it is offered to use more than one quarter-wave converters. Fig.8, table 3, ref.5.*

Установлено, что звуковые колебания, генерируемые буровым инструментом, в буровой колонне имеют широкий неоднородный спектр. При передаче информации с забоя целесообразно использовать колебания звука низкой частоты, так как в этом диапазоне – наименьшее затухание. Для передачи информации предложена идея: использовать амплитудную модуляцию сигнала. В качестве технического решения предлагается использовать методы борьбы с шумами [1].

Наиболее эффективным средством борьбы с шумами являются преобразователи шума – глушители. При помощи глушителей низкой частоты в спектре технологического звука можно установить акустическую метку. Акустическая метка – это подавленная амплитуда на заданной частоте  $f_i$  в спектре технологического звука. Технологический звук, распространяющийся по промысловочной жидкости, имеет широкий неоднородный спектр – амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) такого звука представлена на рис.1.

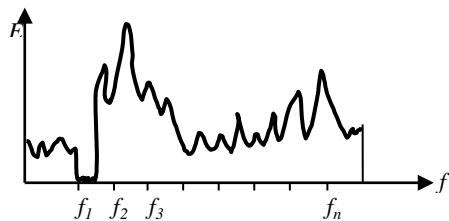


**Рис. 1.**  
**АЧХ технологического звука**

По принципу действия преобразователи шума делят на отражающие и диссипативные. В диссипативных преобразователях звуковая энергия превращается в тепло. В отражающих преобразователях уменьшение шума достигается за счет отражения энергии. Отражатели звука разделяются на широкополосные и узкополосные преобразователи. К узкополосным преобразователям относятся преобразователи Гельмгольца. Преобразователь Гельмгольца – это сосуд объемом  $V$ , сообщающийся с внешней средой через небольшое отверстие или трубку длиной  $l$  и площадью  $F$ . Резонансная частота определяется выражением [2]:

$$f_p = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{F}{l \cdot V}}, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость звука в среде. Резонансная частота преобразователя Гельмгольца только одна. При установке преобразователя Гельмгольца вблизи турбобура на спектре технологического звука эффективно можно сформировать одну акустическую метку, например, на частоте  $f_1$  (рис. 2).



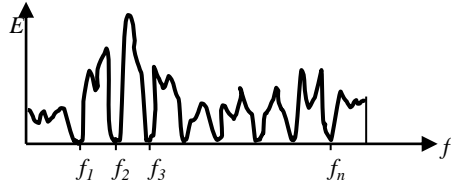
**Рис. 2.**  
**АЧХ технологического звука,  
промодулированная по амплитуде  
преобразователем Гельмгольца**

К широкополосным преобразователям относятся четвертьволновые преобразователи. Такие преобразователи выполняются в виде ответвленных труб и в виде кольцевых камер. Четвертьволновые преобразователи имеют несколько резонансных частот [2]:

$$f_{pn} = (2n - 1) \frac{c}{4l}, \quad (2)$$

где  $n=1, 2, 3, \dots$ ;  $l$  – длина резонатора. Длина четвертьволнового резонатора подбирается по первой резонансной частоте  $l = \frac{c}{4f_p}$ .

Установка четвертьволнового преобразователя вблизи турбобура позволяет эффективно сформировать полосу акустических меток, например, на частоте  $f_l$  и ее гармоник (рис.3).



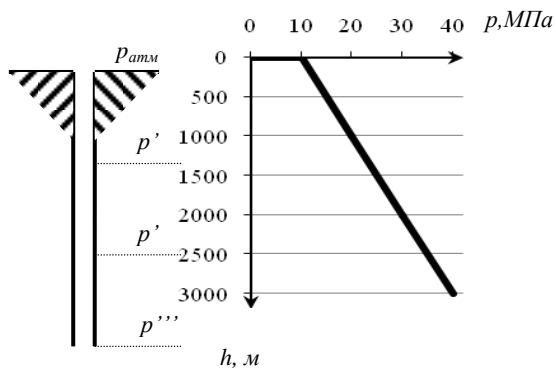
**Рис. 3.**  
**АЧХ технологического звука,**  
**промодулированного**  
**по амплитуде четвертьволновым**  
**преобразователем**

Сформированную акустическую метку в частотном спектре можно использовать, например, для передачи технологических параметров при турбинном бурении.

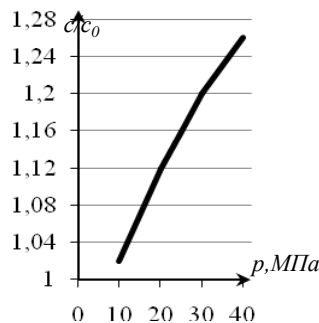
Как видно из формулы (1) и (2), резонансная частота преобразователей зависит от скорости звука в среде.

Скорость звука в промывочной жидкости зависит от давления [3]. На рис. 4 приведен пример изменения давления в скважине.

На рис. 5 показан график зависимости скорости звука от давления [3].



**Рис. 4.**  
**Изменение давления в скважине**



**Рис. 5. Зависимость изменения**  
**скорости звука от давления**

Ниже приведен пример расчета изменения скорости звука в скважине, заполненной промывочной жидкостью.

Результаты расчета сведены в таблицу 1.

На глубине  $h=0$  м давление в скважине равно атмосферному  $p_{атм}=0,1$  МПа, скорость звука, например,  $c_0=1500$  м/с. На глубине  $h=10$  м давление создается нагнетательными насосами и составляет, например,  $p_n=10$  МПа, тогда суммарное давление  $p=p_{атм}+p_n=10,1$  МПа, отношение  $c/c_0$  по графику (см. рис. 5) равно 1,02, значит скорость звука  $c=1,02 \cdot c_0=1,02 \cdot 1500=1530$  м/с. На глубине  $h=1000$  м существенно гидростатическое давление  $p_{гст}=\rho gh=10$  МПа, тогда суммарное давление  $p'=p_{атм}+p_{гст}+p_n=20,1$  МПа, отношение  $c/c_0=1,12$ , значит скорость звука  $c'=1,12 \cdot 1500=1680$  м/с. Аналогично, на глубине  $h=2000$  м – суммарное давление  $p''=30,1$  МПа, скорость звука  $c''=1800$  м/с; на глубине  $h=3000$  м – суммарное давление  $p'''=40,1$  МПа, скорость звука  $c'''=1890$  м/с.

Изменения скорости звука в промывочной жидкости от давления в скважине и глубины бурения приведены (табл. 1).

**Таблица 1**

**Зависимость изменения скорости звука от давления в скважине**

Глубина бурения, м	0	10	1000	2000	3000
Давление в скважине, МПа	0,1	10,1	20,1	30,1	40,1
Скорость звука, м/с	1500	1530	1680	1800	1890

Скорость технологического звука в промывочной жидкости растет с ростом давления в скважине (см. табл. 1). Следовательно, изменяется резонансная частота преобразователей звука.

Цель технического решения для реализации передачи технологических параметров при турбинном бурении – получение акустической метки при помощи амплитудной модуляции технологического звука с учетом реальных условий работы на забое скважины.

Для амплитудной модуляции технологического звука, генерируемого турбобуром, предлагается использовать преобразователи низкочастотного звука [1].

Ниже приведено сравнение эффективности рассматриваемых преобразователей звука двух типов для технических устройств.

Первый тип – преобразователь Гельмгольца.

Резонансная частота такого преобразователя, согласно формуле (1), зависит от его объема, площади отверстия горла, высоты горла и скорости звука в среде.

Объем, площадь отверстия, высота горла – постоянные величины для конкретного преобразователя.

Если резонансная частота преобразователя Гельмгольца на устье скважины составляет, например,  $f_p = 200$  Гц, то на глубине 1000 м резонансная частота равна

$$f'_p = \frac{1680}{2\pi} 0,84 = 224 \text{ Гц},$$

где  $\sqrt{\frac{F}{l \cdot V}} = \frac{200 \cdot 2\pi}{1500} = 0,84 \text{ 1/м}.$

Аналогично на глубине 2000 м:  $f''_p = \frac{1800}{2\pi} 0,84 = 240 \text{ Гц}.$

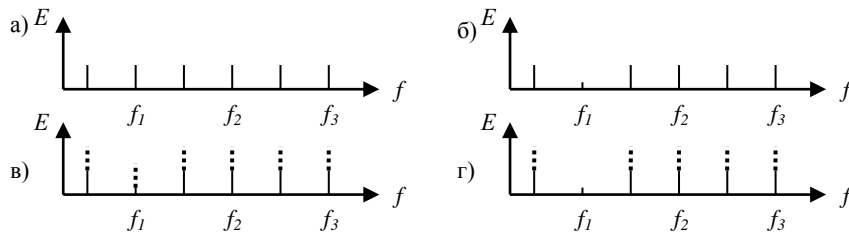
На глубине 3000 м:  $f'''_p = \frac{1890}{2\pi} 0,84 = 252 \text{ Гц}.$

Ранее установлено, что АЧХ звуковых помех, создаваемых буровыми насосами и долотом, накладываются на АЧХ технологического звука турбобура [1]. Кроме перечисленных постоянных помех существуют непериодические случайные звуковые помехи, связанные с ударами колонны на переходе пластов с разной плотностью.

В случае ударов бурильной колонны о стенки скважины или о забой возникает спектр шума, который заполнит область подавленных частот, например,  $f_1$ . Поэтому возникает необходимость в создании помехозащищенного канала связи.

Для получения достоверного сигнала требуется создать повторную модуляцию, то есть установить второй, третий и т.д. преобразователи Гельмгольца, настроенные на одну частоту.

На рис.6 представлен фрагмент спектра промодулированного по амплитуде технологического звука с помощью, например, двух преобразователей Гельмгольца.



**Рис. 6. АЧХ технологического звука, промодулированного двумя резонаторами Гельмгольца:**

*а – фрагмент спектра шума до модуляции; б – фрагмент спектра шума после модуляции одним преобразователем Гельмгольца; в – фрагмент спектра шума во время удара после модуляции одним преобразователем Гельмгольца; г – фрагмент спектра шума во время удара после модуляции двумя преобразователями Гельмгольца*

Второй тип – четвертьволновой преобразователь. Резонансная частота этого преобразователя по формуле (2) зависит от его длины и скорости звука в среде. Длина преобразователя при резонансной частоте, например, для 200

Гц составляет  $l = \frac{1500}{4 \cdot 200} = 1,875 \text{ м}$ , тогда на глубине 1000 м:

$$f'_{p1} = (2-1) \frac{1680}{4 \cdot 1,875} = 224 \text{ Гц – первая резонансная частота;}$$

$$f'_{p2} = (2 \cdot 2 - 1) \frac{1680}{4 \cdot 1,875} = 672 \text{ Гц – вторая резонансная частота;}$$

$$f'_{p3} = (2 \cdot 3 - 1) \frac{1680}{4 \cdot 1,875} = 1120 \text{ Гц – третья резонансная частота.}$$

На глубине 2000 м:

$$f''_{p1} = (2-1) \frac{1800}{4 \cdot 1,875} = 240 \text{ Гц – первая резонансная частота;}$$

$$f''_{p2} = (2 \cdot 2 - 1) \frac{1800}{4 \cdot 1,875} = 720 \text{ Гц – вторая резонансная частота;}$$

$$f_{p3}'' = (2 \cdot 3 - 1) \frac{1800}{4 \cdot 1,875} = 1200 \text{ Гц} - \text{третья резонансная частота.}$$

На глубине 3000м:

$$f_{p1}''' = (2 - 1) \frac{1890}{4 \cdot 1,875} = 252 \text{ Гц} - \text{первая резонансная частота;}$$

$$f_{p2}''' = (2 \cdot 2 - 1) \frac{1890}{4 \cdot 1,875} = 756 \text{ Гц} - \text{вторая резонансная частота;}$$

$$f_{p3}''' = (2 \cdot 3 - 1) \frac{1890}{4 \cdot 1,875} = 1260 \text{ Гц} - \text{третья резонансная частота.}$$

В условиях случайных звуковых помех, связанных с ударами колонны на переходе пластов с разной плотностью, аналогично преобразователю звука Гельмгольца, можно использовать повторную модуляцию, то есть установить дополнительные четвертьволновые преобразователи, настроенные на ту же частоту, что и первый преобразователь звука.

Для анализа расчетные данные резонансных частот преобразователей звука сведены в таблицу 2.

**Таблица 2**

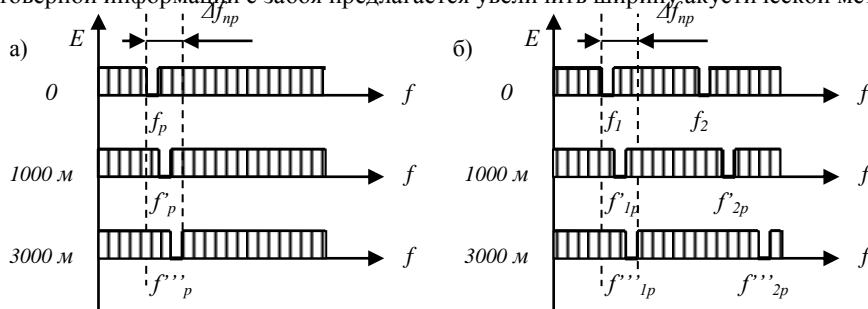
**Сравнительная оценка резонансных частот преобразователей звука**

Глубина бурения, м	0	1000	2000	3000
Резонансная частота преобразователя Гельмгольца, Гц	200	224	240	252
Резонансная частота четвертьволнового преобразователя, Гц				
1-я	200	224	240	252
2-я	600	672	720	756
3-я	1000	1120	1200	1260

Резонансная частота преобразователя Гельмгольца и четвертьволнового преобразователя растет с ростом глубины бурения, значит, при увеличении глубины скважины возникает смещение акустической метки. Максимальное смещение резонансной частоты наблюдается на глубине 3000м. Для приема достоверной информации следует учесть смещение этой частоты, то есть учесть смещение акустической метки (см. табл.2).

На рис. 7 показан пример смещения акустической метки в спектре технологического звука при увеличении глубины бурения для преобразователя Гельмгольца и четвертьволнового преобразователя.

Тогда принимаемый диапазон частот на устье скважины  $\Delta f_{np}$  будет широким, а подавленная частота в нем станет постоянно смещаться, что приведет к усложнению принимающей аппаратуры. Для решения задачи получения достоверной информации с забоя предлагается увеличить ширину акустической метки.



**Рис. 7. Смещение акустической метки в спектре технологического звука с ростом глубины бурения:**

*а – преобразователя Гельмгольца; б – четвертьволнового преобразователя*

Ширина акустической метки  $2\Delta f$  зависит от добротности  $Q$  преобразователя согласно формуле [4]:

$$2\Delta f = \frac{f_p}{Q}, \quad (3)$$

где  $f_p$  – резонансная частота преобразователя.

Следовательно, чем меньше добротность преобразователя, тем шире акустическая метка. Добротность преобразователя определяется согласно формуле [5]:

$$Q = \pi N, \quad (4)$$

где  $N$  – число колебаний, после которого амплитуда колебаний убывает в  $e$  раз. Тогда, число  $N$  также должно быть минимальным.

Число колебаний определяется формулой [4]:

$$N = 4 \sqrt{\frac{V \cdot l^3}{F^3}}, \quad (5)$$

где  $V$  – объем преобразователя а;  $F$  – площадь сечения горлышка;  $l$  – длина горлышка.

Подбором геометрических параметров преобразователя рассчитывается добротность  $Q$  и ширина акустической метки  $2\Delta f$ , например, для частоты  $f=200$  Гц, согласно формулам (3) и (4):

$$Q = \pi \cdot 1 / \pi = 1,$$

$$2\Delta f = \frac{200}{1} = 200 \text{ Гц}.$$

Акустическая метка преобразователя Гельмгольца на резонансной частоте  $f_p=200$  Гц будет находиться в полосе частот от 100Гц до 300Гц на устье скважины и от 126Гц до 378 Гц на глубине 3000м.

Акустическая метка четвертьволнового преобразователя на первой резонансной частоте  $f_{1p}=200$ Гц аналогичная акустической метке преобразователя Гельмгольца. Вторая резонансная частота такого преобразователя составит  $f_{2p}=3 \cdot 200=600$ Гц, ширина акустической метки  $2\Delta f_2=600$ Гц – в полосе от 300Гц до 900Гц на устье скважины и от 378Гц до 1134Гц на глубине 3000м. Третья резонансная частота  $f_{3p}=5 \cdot 200=1000$ Гц, ширина акустической метки  $2\Delta f_3=1000$ Гц – в полосе от 500Гц до 1500Гц на устье скважины и от 630Гц до 1890Гц на глубине 3000 м и так далее.

Приведено сравнение акустических меток, полученных с помощью преобразователя Гельмгольца и четвертьволнового преобразователя (табл. 3).

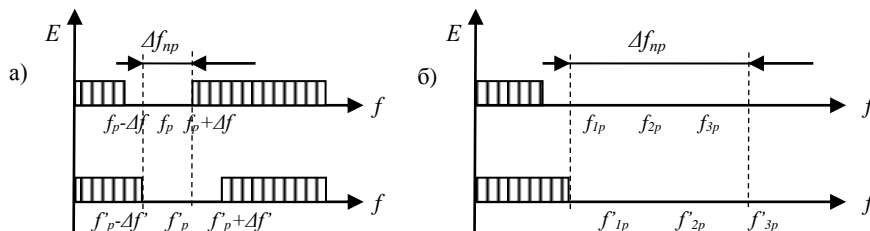
**Таблица 3**

**Сравнительная оценка акустических меток**

Тип преобразователя	Резонансная частота, Гц	Ширина акустической метки, Гц	Полоса акустической метки на устье скважины, Гц	Полоса акустической метки на глубине 3000м, Гц
Преобразователь Гельмгольца	200	200	100-300	126-378
Четвертьволновой преобразователь	1-я 200	200	100-300	126-378
	2-я 600	600	300-900	378-1134
	3-я 1000	1000	500-1500	630-1890

Из сравнения ширины акустических меток преобразователей видно, что применение четвертьволновых преобразователей предпочтительнее, так как при аналогичных резонансных частотах, акустическая метка четвертьволнового преобразователя шире акустической метки преобразователя Гельмгольца благодаря наличию резонансных гармоник.

Показан пример полосы подавленных частот в заданном диапазоне при использовании преобразователя Гельмгольца и четвертьволнового преобразователя (рис.8). В принимаемом диапазоне частот на устье скважины  $\Delta f_{np}$  всегда будет существовать полоса эффективно подавленных частот – информационный сигнал, не зависящий от давления и скорости звука. При применении преобразователя Гельмгольца  $\Delta f_{np}$  ограничена и справа и слева, при применении четвертьволнового преобразователя  $\Delta f_{np}$  почти не имеет ограничений справа, что значительно упростит принимающую аппаратуру.



**Рис. 8. Полоса подавленных частот при использовании широкополосных преобразователей:**

*а – преобразователя Гельмгольца; б – четвертьволнового преобразователя*

#### Выводы

Основная положительная сторона в применении преобразователей Гельмгольца – эффективное подавление низкочастотного шума, но в узкой полосе. К положительной стороне при применении четвертьволновых преобразователей можно отнести эффективное подавление низкочастотного шума в широкой полосе.

• На основании анализа рассмотренных преобразователей звука предлагается установить необходимое количество четвертьволновых преобразователей, которое позволяет создать акустическую метку в виде широкой

полосы подавленных частот – технологической информации на устье скважины, не зависящей от скорости звука и давления в процессе турбинного бурения.

#### **Список литературы**

1. Савиных Ю.А., Хмара Г. А. Звуковой канал связи для передачи технологических параметров при турбинном бурении. // Известия вузов. Нефть и газ. 2010, №3. - С.27-33.
2. Юдин Е.Я. Борьба с шумом на производстве: Справочник/ Е.Я. Юдин, Л.А. Борисов. - М.: Машиностроение, 1985. - 399 с.
3. Савиных Ю.А. Акустический канал связи для измерения и регулирования режимных параметров турбинного бурения. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ»; Тюмень: ИД «Слово», 2004. – 96 с.
4. Малов, Н. Н. Основы теории колебаний: пособие для учителей. – М.: Просвещение, 1971.
5. Исакович М.А. Общая акустика: Учебное пособие. – М.: Наука, 1973. – 496 с.

#### **Сведения об авторах**

**Савиных Ю. А.**, к.т.н., доцент, кафедра «Электроэнергетика», Тюменский государственный нефтегазовый университет, академик РАН; тел. +7 (3452) 41-70-22

**Хмара Г. А.**, ассистент, кафедра «Электроэнергетика», Тюменский государственный нефтегазовый университет; тел. +7 (3452) 41-70-22

**Savinykh Yu.A.**, PhD., associate professor of Department «Electric Power Engineering», Tyumen State Oil and Gas University, Academy of Natural Sciences; phone: +7 (3452) 41-70-22

**Khmara G.A.**, assistant lecturer of Department «Electric Power Engineering», Tyumen State Oil and Gas University, phone: +7 (3452) 41-70-22