

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.3.9>

УДК: 534.213.4; 517.518.82

РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ ЗАТУХАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СИГНАЛА В СКВАЖИНЕ

О.В. Стукач^{1,2}, И.А. Ершов², С.В. Быков², И.В. Трубин²

¹ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20

² Новосибирский государственный технический университет
630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, д. 20

Статья поступила в редакцию 13 февраля 2023 г.

Аннотация. Проблема передачи телеметрической информации требует всестороннего изучения новых каналов связи и нахождения окон прозрачности для распространения волн в полосе рабочих частот. Электромагнитные каналы связи энергетически малоэффективны и имеют низкую скорость передачи данных. У кабельных каналов связи высокая стоимость обслуживания, а передача телеметрии невозможна на больших глубинах. В статье представлены результаты разработки приёмно-передающего ультразвукового устройства для передачи телеметрической информации. Приёмник и передатчик выполнен на базе пьезоизлучателя ЗП-25. Частота передаваемого сигнала составляет 20 кГц. Для исследования распространения акустического сигнала была использована экспериментальная установка, имитирующая часть добывающей скважины. В результате была получена линейная регрессионная модель затухания акустического сигнала в скважине. Произведено сравнение с теоретической моделью распространения акустического сигнала. Обнаружено расхождение полученной модели с теоретической. Показано, что линейная регрессия согласуется с результатами экспериментов и является хорошей имитационной моделью для процесса передачи сигнала, а нелинейные эффекты в

рассматриваемой полосе частот незначительны. Также экспериментально полученная модель имеет гораздо меньшее затухание по сравнению с теоретической.

Ключевые слова: измерение в процессе бурения, скважинная телеметрия, ультразвуковой канал, моделирование затухания.

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта № 22-29-00024.

Автор для переписки: Ершов Иван Анатольевич, ershov@corp.nstu.ru

Введение

Значительную долю экспорта многих стран составляет углеводороды. Их добыча сопряжена с решением ряда задач по поддержанию скважин в работоспособном состоянии. Это требует непрерывного мониторинга параметров скважин с помощью геофизической аппаратуры с последующей передачей телеметрической информации от забоя к устью. В системах измерения во время бурения (measurement-while-drilling, MWD) и каротажа в процессе бурения (logging-while-drilling, LWD) используют множество технологий передачи сигналов. Передача данных по кабелю имеет высокую скорость передачи данных, но является технически сложной или невозможной в MWD и LWD [1, 2]. Электромагнитные каналы связи отличаются относительно низкой скоростью передачи данных и энергетически малоэффективны [3]. В статье представлено исследование ультразвукового канала связи, средой распространения которой является внутритрубное пространство. В предыдущих исследованиях было показано, что связь на УВЧ и СВЧ связана с высоким затуханием сигнала в канале [4]. Предполагается, что снижение частоты передачи в сторону ультразвука позволит уменьшить затухание сигнала, благодаря чему будет увеличена дальность передачи и достоверность передаваемой информации. Помимо этого положительный эффект может оказать интерференция, возникающая при распространении акустического сигнала в закрытом пространстве. Связано это с увеличением уровня сигнала за

счёт наложения волн, сопровождающегося чередованием максимумов и минимумов интенсивности в пространстве.

Исследования возможности использования кабеля для передачи информации показывают, что использование одножильного кабеля может обеспечить скорость передачи данных 115 kbps по кабелю длиной 7000 метров. Авторы статьи [5], сочетая мультиплексирование с ортогональным частотным разделением и характеристики одножильного кабеля, проектируют высокоскоростную одножильную систему передачи данных каротажа. В исследовании использовался Camesa – одножильный кабель с защитой от сероводорода. Авторы отмечают, что при увеличении частоты сигнала происходит резкое возрастание затухания сигнала. Сигнал с частотой выше 100 кГц не может быть обнаружен. Для решения данной проблемы было использовано мультиплексирование с ортогональным частотным разделением (OFDM). Основная идея состоит в том, чтобы использовать множество ортогональных поднесущих. По сравнению с системой, в которой используется одна несущая, данный метод использует группу смежных несущих с узкой полосой частот, каждая из которых модулируется отдельно. В статье представлены результаты тестирования в лабораторных условиях. В реальных условиях кабель нельзя использовать в MWD системах из-за вращения бурильной трубы.

Исследование электромагнитного канала представлено в статье [6]. Авторами предложено схемотехническое решение для увеличения мощности передатчика. Передатчик работает на частоте 10 Гц, что нельзя назвать хорошим выбором, потому что для передачи информации требуется мощный источник питания. Выходная мощность передатчика не приводится. Дальность связи не исследуется и не оценивается. Статья показывает, что перенос спектра частот в более высокочастотную область может улучшить тактико-технические характеристики забойной телеметрической системы.

Авторы статьи [7] отмечают, что в системе LWD на акустический сигнал влияют сильные помехи. Они вызваны акустическими шумами, создаваемыми

буровым оборудованием и затуханием сигнала в передающей среде. На поверхность при бурении поступают различные звуковые колебания: от бурового насоса и турбобура в жидкости, от турбобура по колонне бурильных труб и от долота по горной породе. Колонна бурильных труб представляет собой конструкцию, состоящую из стальных труб и алюминиевых замков, создающих сопротивление передаче сигнала. Шум бурения состоит от шума бурового долота и поверхностного шума. Авторы предлагают использовать технологию одной несущей с выравниванием в частотной области (SC-FDE), которая обладает преимуществами технологии OFDM, но при этом не имеет высокого отношения пиковой мощности к средней. В статье приведён сравнительный анализ технологий OFDM и SC-FDE. Он показал, что использование технологии SC-FDE повышает надёжность передачи данных.

В статье [8] для подавления шумов бурения предлагается использовать многоуровневую частотную манипуляцию (ML-FSK) в приемопередающей системе с дифференциальными детекторами энергии. Передатчик состоит из энкодеров Грея и многоуровневых модуляторов FSK. Авторы обращают внимание на предотвращение межсимвольной интерференции благодаря использованию защитного интервала. Для демонстрации эффективности приёмника авторы показали частоты ошибок по битам (BER) системы псевдокогерентного кодирования ML-FSK с наличием шума бурения и без него. Была достигнута скорость передачи данных 92 бит/с.

Метод гидроимпульсной телеметрии [9] заключается в передаче информации от забоя к устью с помощью волны давления в буровом растворе. Передатчик содержит пульсатор, включающий в себя статор и ротор [10]. Скорость передачи данных у данной системы очень низкая, ориентировочно 0,5-10 бит/с. Используется частотная манипуляция сигнала. Демодуляция сигнала является сложной задачей, поскольку в нижней части буровой колонны находится много инструментов с движущимися частями, которые являются источниками гидравлического шума. Помимо этого, высокий уровень шума создаётся буровыми насосами. Формула для расчёта частоты спектральных

составляющих шума, вызванного работой насоса, приведена в статье [11]. Кроме того, генерируемый сигнал будет значительно затухать при прохождении пути от забоя к устью. В статье [10] показаны способы обработки слабого сигнала при помощи быстрого преобразования Фурье и непрерывного вейвлет-преобразования. Авторами было получено, что непрерывное вейвлет-преобразование, в отличие от быстрого преобразования Фурье, позволяет выявить все частотные компоненты сигнала с его временными характеристиками. Подходы к совершенствованию системы на базе гидроимпульсной телеметрии рассмотрены в статье [12]. Авторы стремятся достигнуть скорости 10 бит/с на расстоянии 30000 футов. Для этого они разработали «направленные фильтры», которые работают с малым расстоянием между преобразователями и большой продолжительностью дискретизации в типичной шумной среде буровой установки.

В статье [13] предложено корректировать параметры подземной передачи для повышения эффективности и надежности системы передачи. Авторы отмечают, что BER канала бурового раствора достигает 10^{-3} . Для сравнения, канал бурового раствора имеет восходящую линию связи со скоростью около 4~16 бит/с и нисходящую линию связи со скоростью менее 1 бит/с. В процессе бурения, при помощи адаптивного протокола передачи с обратной связью RaptorQ, оценивают качество канала и отправляют информацию для настройки параметров передачи от забоя к устью скважины.

В настоящее время задача идентификация полезного сигнала относительно проста. Она использует пороговый метод, основанный на том, что амплитуда полезного импульсного сигнала больше, чем амплитуда шума. Это приводит к потере полезных импульсов в сложных рабочих условиях. В статье [14] предложен новый алгоритм обработки данных. В нем время начала кадра данных определяется с использованием коэффициента корреляции и импульса синхронизации. Моделирование выполнено с использованием данных реального процесса бурения в системе гидроимпульсной передачи.

Итак, хотя результаты показывают эффективность предложенных методов, их целесообразно исследовать применительно к акустической системе.

1. Данные и методы решения задач, принятые допущения

Общая тенденция развития акустических методов передачи данных связана с глубоким изучением структуры поля, вызванных особенностями распространения ультразвуковых колебаний во вмещающей среде. Важнейшей задачей является разработка и создание новых методов передачи и приёма акустических колебаний в объеме, что позволит детально изучить характер распределения акустического поля. Особенно сложная структура поля получается в ограниченной вмещающей среде, примером которой является бурильная труба и затрубное пространство.

Для исследования перспективности использования ультразвукового передатчика для создания канала связи забойной телеметрической системы (ЗТС) была разработана экспериментальная установка, имитирующая часть добывающей скважины (рис. 1). Установка состоит из двух труб – внешней (обсадная колонна) и внутренней (насосно-компрессорная труба). Передатчик размещён на конце трубы, приёмник можно свободно перемещать внутри трубы. Было проведено две серии измерений – с прямой трубой (длина 4,1 метра) и с изогнутой в двух местах трубой (длина 4,2 метра). Данные считывались с подключенного к приёмнику осциллографа.

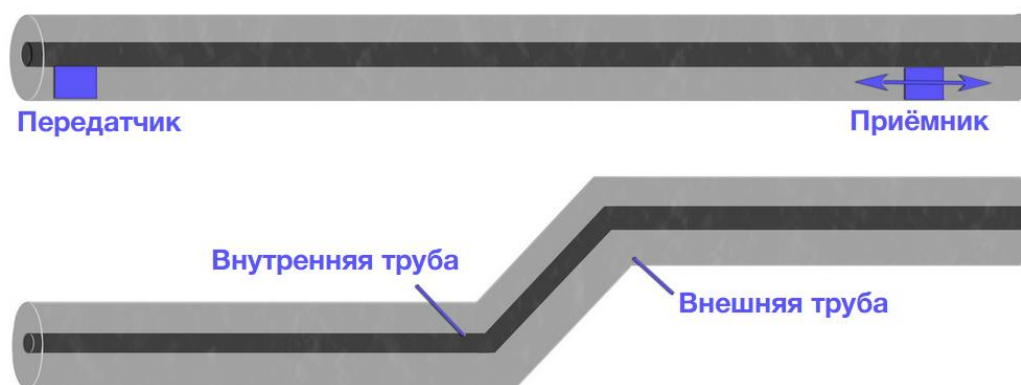


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

В приёмнике и передатчике использовались пьезоизлучатели ЗП-25. Внешний вид приёмника и передатчика показан на рис. 2. Передаваемый сигнал представлял собой набор символов в шестнадцатеричной системе счисления: AA0800B2, где B2 – это контрольная сумма AA+08. Частота передаваемого сигнала 20 кГц. Перед передачей сигнал был преобразован согласно коду Манчестер-II.

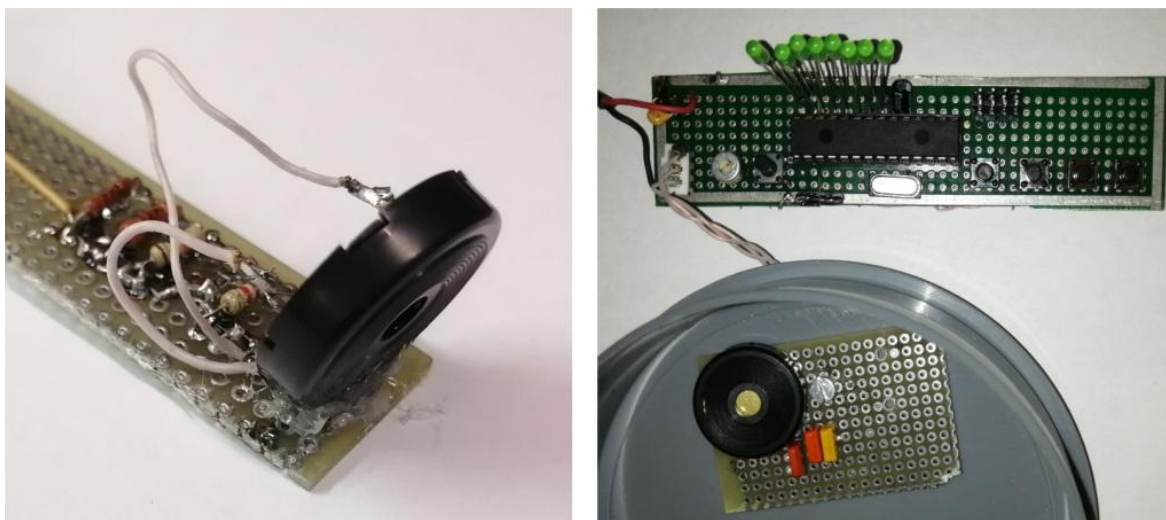


Рис. 2. Приёмник и передатчик сигнала

Принятые допущения:

- Отсутствие жидкости в трубе;
- Малая длина трубы;
- Не были найдены оптимальные частоты для передачи сигнала.

2. Результаты экспериментов

Было проведено две серии измерений, в каждой из которых приёмник отдалялся от передатчика с шагом 20 см до достижения конца экспериментальной установки. Был измерен уровень сигнала в каждой точке, и рассчитано затухание сигнала относительно начальной точки по формуле (1).

$$a = 10 \cdot \lg\left(\frac{P_0}{P_x}\right), \quad (1)$$

где P_0 – мощность сигнала в начале линии; P_x – мощность сигнала на расстоянии x от передатчика.

Всего было произведено 20 измерений в прямой трубе и 22 измерения в изогнутой трубе. Результаты приведены в таблице 1 и на рис. 3.

Таблица 1. Затухание сигнала в экспериментальных установках

Расстояние между приёмником и передатчиком, м	Затухание сигнала, дБ	
	Прямая труба	Изогнутая труба
0,0	0,00	0,00
0,2	0,19	-4,16
0,4	-1,13	1,57
0,6	1,38	1,45
0,8	-0,22	-0,01
1,0	1,98	1,20
1,2	3,84	-1,28
1,4	3,74	-0,11
1,6	3,47	1,32
1,8	6,84	1,41
2,0	7,31	4,67
2,2	7,31	5,51
2,4	8,61	7,93
2,6	8,11	5,20
2,8	7,73	8,21
3,0	10,24	11,12
3,2	10,39	11,62
3,4	6,55	13,64
3,6	13,85	8,78
3,8	8,51	12,31
4,0	-	16,54
4,2	-	20,20

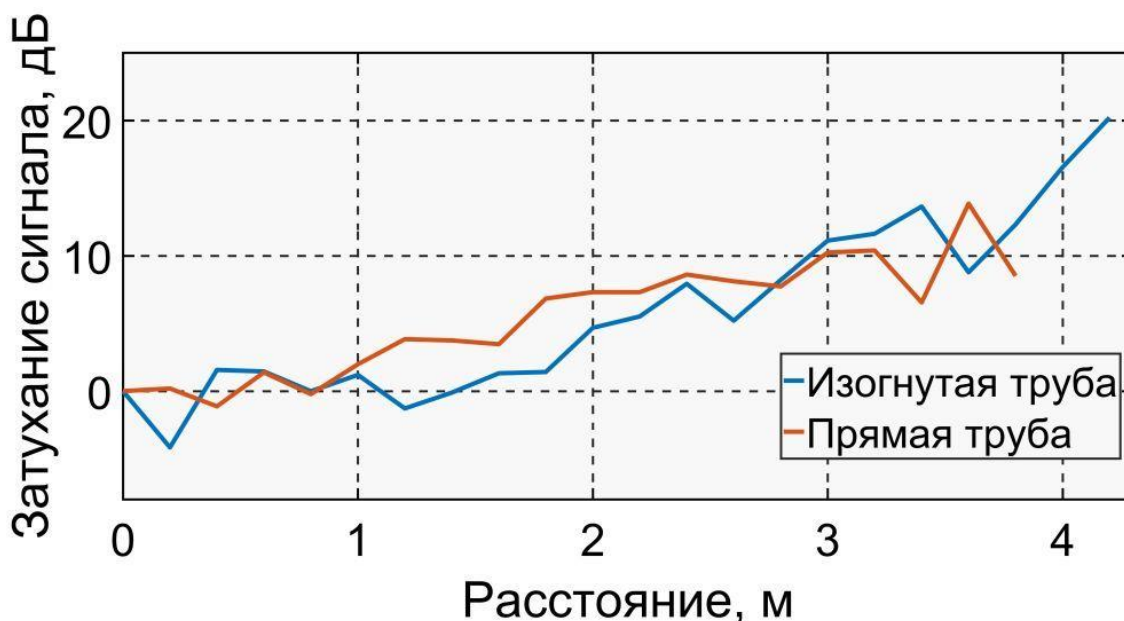


Рис. 3. Затухание в экспериментальной установке

Используем регрессионный анализ для создания модели затухания сигнала во внутритрубном пространстве. В результате линейного регрессионного анализа были получены модели (2) и (3) для прямой и изогнутой трубы соответственно. Графики моделей показаны на рис. 4.

$$a = -1,2202 + 3,6958 \cdot x, \quad (2)$$

$$a = -3,7780 + 4,5505 \cdot x, \quad (3)$$

где x — расстояние между начальной точкой и приёмником.

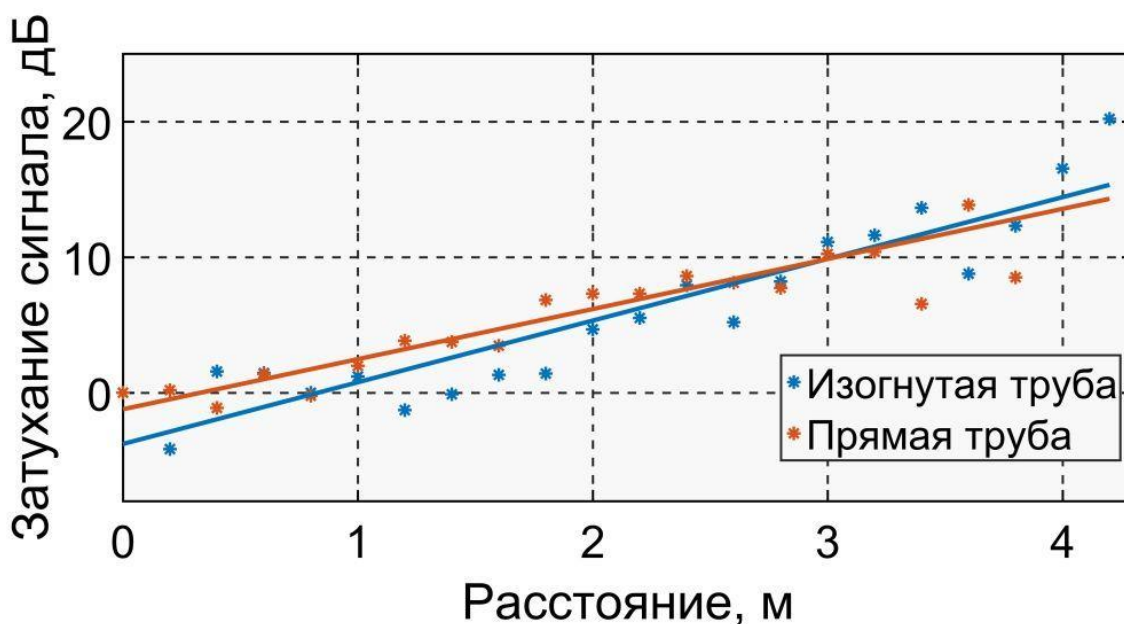


Рис. 4. Регрессионные модели затухания в трубе

3. Обсуждение полученных результатов

Регрессионные модели затухания в трубе можно использовать для анализа уровня сигнала в трубах большей длины. При этом стоит отметить, что при наличии перегибов, угол наклона линии изменился незначительно (рис. 4). Результаты моделирования на расстояние до 50 метров приведены в таблице 2.

Таблица 2. Моделирование затухания сигналов

Расстояние между приёмником и передатчиком, м	Затухание сигнала, дБ	
	Прямая труба	Изогнутая труба
20	72,70	87,23
30	109,65	132,74
40	146,61	178,24
50	183,57	223,75

Стоит отметить, что наличие перегибов в трубе увеличило затухание сигнала на 22 %. На основании этого можно сделать предположение, что затухание ультразвукового сигнала в наклонно-направленных скважинах незначительно отличается от затухания в вертикальных скважинах. Однако, руководствуясь моделью затухания в трубе, можно сделать вывод о том, что применение данного технического решения не удовлетворяет требованиям к каналу связи. Для передачи сигнала на несколько километров необходимо, в первую очередь, добиться низкого затухания сигнала на малых расстояниях. На текущий момент наша задача – достигнуть затухания 5 дБ на расстоянии 4 м. Для этого, в первую очередь, необходимо заменить пьезоизлучатель ЗП-25.

В статье [15] представлена теоретическая модель распространения акустического сигнала частотой 4 кГц в волноводе 100 мм (4), основанная на методах геометрической акустики и принципе Гюйгенса–Френеля. По данной формуле вычисляется результирующая амплитуда отраженных сигналов.

$$A_{рез} = \oint_{S_{np}} \oint_{S_{изл}} \sum_i A_{над} \cdot (K_{отр})^k \cdot K_{прор} \cdot \sin(\omega t + \varphi) dS_{np} dS_{изл}, \quad (4)$$

где $A_{пад}$ – амплитуда падающей волны; $K_{отр}$ – коэффициент отражения; k – количество отражений; $K_{прох}$ – коэффициент прохождения; $S_{пр}$ – площадь приёмника; $S_{изл}$ – площадь излучателя.

Основным достоинством формулы (4) является зависимость от множества факторов. В ней учитываются все возможные комбинации отражений сигнала, площадь приёмника и передатчика, плотность среды заполняющей волновод и стенки волновода. Теоретическая зависимость амплитуды сигнала от расстояния в результате имеет ярко выраженную нелинейную составляющую, тогда как экспериментальные результаты авторов статьи [15] на расстоянии 10 метров можно описать линейной регрессионной зависимостью. Объясняется несоответствие более высокими потерями на стенке бумажного волновода. В нашем случае мы столкнулись с аналогичной ситуацией, что говорит о необходимости значительного усовершенствования экспериментальной установки в дальнейшем. Нами была использована пластиковая труба с металлизированным покрытием. Плотность пластика значительно ниже плотности железа, что понижает коэффициент прохождения ($K_{прох}$) в формуле (4).

Во второй главе диссертации [16] рассмотрено распространение ультразвукового сигнала в идеальных условиях, когда стенки волновода абсолютно жёсткие, поперечное сечение представляет собой круг, а длина волновода бесконечна. При этом среда передаёт звук без потерь. Сумма ряда гармонических колебаний в комплексной форме, произведённая методом квадратур, принимает вид:

$$P(t) = V_i \cdot \cos(\omega t) \cdot \sum_i \frac{\sin(k \cdot r_i)}{r_i} \cdot \cos a_{ni} + j \cdot V_i \cdot \sin(\omega t) \cdot \sum_i \frac{\cos(k \cdot r_i)}{r_i} \cdot \cos a_{ni}, \quad (5)$$

где V_i – векторное распределение амплитуды колебательной скорости по поверхности излучателя; k – волновое число; r_i – расстояние от i точки на поверхности излучателя до произвольной точки в полупространстве волновода; a_n – угол падения на стенку волновода.

На графике зависимости нормированной амплитуды сигнала (U/U_{max}) от длины волновода прослеживается монотонное уменьшение амплитуды при увеличении расстояния от излучателя. На расстоянии от одного до трёх метров уровень затухания увеличивается от 3 дБ до 20 дБ, после чего скорость уменьшения амплитуды значительно уменьшается. В нашей регрессионной модели, изображённой на рис. 4, затухание на 3 метрах достигает 10 дБ, что значительно меньше теоретической модели, представленной в статье [16]. Однако, в статье [15] экспериментально полученный уровень затухания также значительно меньше теоретических значений. Также в модели, рассчитанной по формуле (5), как и в модели, рассчитанной по формуле (4), наблюдаются резкие флуктуации сигнала, которые отсутствуют в наших результатах и результатах из статьи [15].

Заключение

Поиск новых способов передачи телеметрической информации является важной составляющей увеличения эффективности бурения и эксплуатации скважин. На текущий момент нет технического решения, которое бы обеспечивало высокую скорость передачи данных. Мы предполагаем, что использование ультразвукового сигнала позволит достичь скорости передачи информации 2 кбит/с. Данное исследование направлено на исследование распространения ультразвукового сигнала во внутритрубном пространстве. Для решения задачи были проведены экспериментальные исследования на примере волновода круглого сечения с жесткими стенками.

Для проведения измерений были разработаны приёмник и передатчик на базе пьезоизлучателя ЗП-25. Были построены регрессионные модели затухания сигнала в прямой и изогнутой трубах, имитирующих вертикальную и наклонно-направленную скважину. По результатам моделирования установлено, что затухание сигнала линейно зависит от расстояния между приёмником и передатчиком. Данная зависимость не соответствует теоретическим моделям, представленным в литературе. Выдвинуто предположение, что это связано с

низкой плотностью трубы, используемой в экспериментальной установке. Также обнаружено, что наличие изгиба трубы незначительно влияет на уровень затухания сигнала. Для уменьшения уровня затухания принято решение заменить пьезоизлучатель ЗП-25. Результаты исследования могут быть использованы для разработки передатчиков информации от забоя к устью скважин, например, при бурении разведочных скважин или в установках штангового глубинного насоса.

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта № 22-29-00024.

Литература

1. Mirmanov A.B., Stukach O.V. The System Problems in the Microwave Measurement-While-Drilling Telemetry for Controlled Drilling and Modeling in Matlab Simulink. *2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*. <https://doi.org/10.1109/MEACS.2014.6986885>
2. Jibo L., Weining N., Sanguo L. Development of the Downhole Data Memory Releasing Device. *3rd International Conference on Mechatronics, Robotics and Automation*. 2015. <https://doi.org/10.2991/icmra-15.2015.106>
3. Shaydurov G.Y., Potylitsyn V.S., Stukach O.V., Maikov O.A., Romanov V.V. Automation of oil and gas exploration by active seismic electric method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. V.537. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/5/052012>
4. Stukach O.V., Mirmanov A.B., Goponenko A.S. Microwave equipment for MWD front-end radiolink in the Borehole pipes. *12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE)*. 2014. P.427-430. <https://doi.org/10.1109/APEIE.2014.7040933>
5. Yang L., Yuntao S. A High-Speed Data Transmission Design Using Single-Core Cable. *Third International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems*. 2010. P.513-516. <https://doi.org/10.1109/ICINIS.2010.124>

6. Liu K., Li X., Wang T., Zhang Y., Li L. New Electromagnetic Transmitter for EM-MWD System Based on Embedded RTOS: uc-OS III. *IEEE 4th International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP)*. 2019. P.299-303. <https://doi.org/10.1109/SIPROCESS.2019.8868881>
7. Wei Z., Yibing S., Yanjun L. Design of acoustic wireless remote transmission system for logging-while-drilling data. *IEEE 11th International Conference on Electronic Measurement & Instruments*. 2013. P.53-57. <https://doi.org/10.1109/ICEMI.2013.6743037>
8. Han W.K., Kumar L.S., Guan Y.L., Sun S. Design of coded digital telemetry system for acoustic downhole channel with drilling noise. *9th International Conference on Information, Communications & Signal Processing*. 2013. P.1-5. <https://doi.org/10.1109/ICICS.2013.6782969>
9. Tennent R.W., Fitzgerald W.J. Passband complex fractionally-spaced equalization of MSK signals over the mud pulse telemetry channel. *First IEEE Signal Processing Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications*. 1997. P.5-8. <https://doi.org/10.1109/SPAWC.1997.630045>
10. Berro M.J., Reich M. Signal Transmission in Boreholes and its Processing in MATLAB. *The 17th annual conference of the International Association for Mathematical Geosciences, IAMG*. 2015.
11. Hutin R., Tennent R.W., Kashikar S.V. New Mud Pulse Telemetry Techniques for Deepwater Applications and Improved Real-Time Data Capabilities. *SPE/IADC Drilling Conference*. 2001. <https://doi.org/10.2118/67762-MS>
12. Su Y., Sheng L., Li L., Bian H., Shi R., Zhuang X., Chin W. Strategies in High-Data-Rate MWD Mud Pulse Telemetry. *J. Sustainable Energy Eng.* 2014. V.2. №3. <https://doi.org/10.7569/JSEE.2014.629515>
13. Zhang Y., Xiong K., Di X., Du G., Qiu Z. RaptorQ code based adaptive real-time transmission scheme for M/LWD system. *5th IET International Conference on Wireless, Mobile and Multimedia Networks (ICWMMN 2013)*. 2013. P.141-144. <https://doi.org/10.1049/cp.2013.2395>

14. Cheng S., Hu Y. A novel signal processing algorithm for measurement while drilling (MWD) system. *40th Chinese Control Conference (CCC)*. 2021. P.3105-3109. <https://doi.org/10.23919/CCC52363.2021.9550142>
15. Солдатов А.И., Чиглинцева Ю.В. Теоретическое и экспериментальное исследование акустического тракта скважинного глубиномера. *Известия Томского политехнического университета*. 2009. Т.315. №4. С.85-89.
16. Солдатов А.И. *Ультразвуковая аппаратура с волноводным акустическим трактом*. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). Томск. 2011. 291 с. <https://earchive.tpu.ru/handle/11683/6658>

Для цитирования:

Стукач О.В., Ершов И.А., Быков С.В., Трубин С.В. Регрессионная модель затухания ультразвукового сигнала в скважине. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2023. №3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.3.9>