

# Влияние замков на затухание сигнала акустической телеметрии в бурильной колонне

О.В. Стукач<sup>1,2</sup>, И.А. Ершов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

**Аннотация** – Передача телеметрической информации от забоя к устью скважины в процессе бурения является актуальной задачей, у которой есть множество инженерных решений. Бурение палеозойских залежей приводит к необходимости развития исследований в данном направлении. Представлен ряд результатов по изучению влияния замков бурильной колонны на затухание ультразвукового сигнала. Измерения проводились на экспериментальной установке, представляющей собой трубу длиной до шести метров, внутри которой свободно перемещался передатчик сигнала. Использован ультразвуковой передатчик и приёмник на частоте 60 кГц на базе пьезоэлементов TR60-10H0Z-01. Получена модель затухания ультразвукового сигнала в трубе без воды. Регрессионным анализом были получены модели затухания в трубе с вмещающей средой (водой). Показано, что наличие одного бурильного замка снижает уровень сигнала в 0,18 раз, а общий вид модели не изменяется. Моделирование затухания в зависимости от расстояния до приёмника при использовании труб длиной 8,3 м с учётом замков показало, что снижение амплитуды сигнала до уровня шума произойдёт примерно на 400 м.

**Ключевые слова** – скважинная телеметрия, акустическая связь, ультразвуковой канал, акустические волны, измерения в процессе бурения, акустические измерения, бурильная колонна, канал забой-устье, отклик канала, затухание в среде.

## ВВЕДЕНИЕ

Углеводородные ресурсы залегают на больших глубинах, до 3–5 км. Для их добычи требуются сложные буровые работы. Бурильная колонна состоит из нескольких труб, соединённых замками (Рис. 1). Риски в бурении скважин зачастую сопряжены с отсутствием мгновенной информации о пласте и среде вокруг долота во время буровых работ. Для получения буровой телеметрии устанавливаются различные датчики, которые собирают информацию о характеристиках пласта и параметрах бурения скважин. Наиболее сложным аспектом является передача полученных данных на дневную поверхность [1].

Электромагнитная передача телеметрии через слой земли используется только на небольших глубинах из-

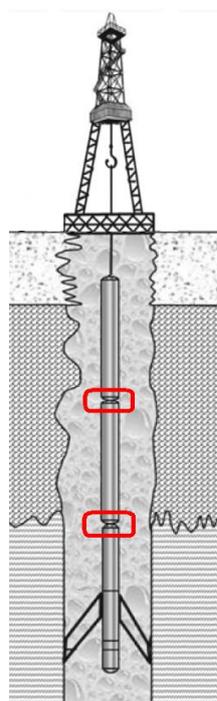


Рис. 1. Предмет исследования

за сильного поглощения волн в слоях земли. Гидроимпульсная телеметрия с модуляцией информационных импульсов, создаваемых закрытием и открытием специального клапана, обладает низкой скоростью передачи информации по буровому раствору, и в большинстве случаев она достигает всего нескольких битов в секунду. В акустической передаче телеметрии данные модулируются и передаются через корпус бурильной колонны как по каналу связи с помощью акустических волн. Но качество акустической связи явно недостаточно для практики из-за переходов между трубами и соединениями на стыках, где отражаются падающие волны. В результате полоса пропускания значительно сокращается. Ограниченная полоса частот и фоновый акустический шум при бурении являются основными недостатками этой технологии. Тем не менее, акустическая телеметрия является перспективным подходом, поскольку она не создаёт помех при бурении и может обеспечивать скорость передачи данных в сотни раз выше, чем гидроимпульсная [2].

Для улучшения акустических каналов колонны труб была создана система шумоподавления, которая уменьшает фоновый шум от бурового станка и долота. Был проведен большой объём исследований с использованием акустических приёмников [3–4]. Но остаётся проблема конструкции бурильной колонны, которая обеспечивает прямое и обратное отражение передаваемого сигнала из-за стыков труб и замков. Это приводит к гребнеобразной частотной характеристике канала [1]. Известно, что пропускная способность канала связи линейно зависит от полосы пропускания,

поэтому поиск подходов к расширению полосы частот акустической связи важен для практики [5].

## I. СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование характеристик акустических волноводных каналов становятся важными для разработки приложений связи и обработки сигналов в различных областях, начиная от городских систем водоснабжения и заканчивая сетями нефте- и газопроводов. Эффективность добычи углеводородов и безопасность эксплуатации скважин напрямую зависят от систем мониторинга, передачи, приёма и обработки телеметрической информации от забоя к устью. В настоящее время не существует универсального решения проблемы передачи телеметрической информации с приемлемой для практики скоростью и помехозащищённостью. Системы с гидроимпульсной телеметрией [6] имеют низкую скорость передачи, а использование электромагнитных каналов связи по земной толще или бурильной трубе является энергетически неэффективным [7].

Также при использовании электромагнитного канала связи необходимо решить вопрос с выбором стандартов и протоколов связи [8]. Рекомендации такого рода есть только для наземных каналов передачи с устья на устройство обработки, например, применение стандарта Bluetooth LE, у которого преимущество в надёжности достигается за счёт адаптивного изменения частоты [9].

Одним из возможных решений является использование комбинированных каналов связи, то есть сочетания каналов связи, различных по физике работы [10–11]. Например, гидравлический канал связи используется от забоя до глубины 3 км, а от 3 км до устья используется электромагнитный канал [12]. Моделирование показало, что комбинированный канал имеет лучшую помехоустойчивость по сравнению с обычным гидравлическим.

Характеристики канала акустических волноводов исследованы в работах [13–15]. Предложены модели широкополосных каналов для акустического канала водопроводной трубы, работающего в диапазоне частот 10–50 кГц [13]. В статье [14] рассмотрены результаты измерений частотной передаточной функции, импульсной характеристики и шума для жестких и эластичных труб, на основе которых можно рассчитать характеристики канала во временной области. Приводятся результаты экспериментов для простой водопроводной системы. Показано многомодовое распространение волны в канале трубопровода. Замечено, что акустические волны с частотами до 50 кГц могут распространяться по водопроводной трубе и дают минимальные потери 1–3 дБ/м при распространении из-за влияния трубы.

Подтверждена гипотеза о том, что труба работает как волновод с соответствующими модами

распространения звука. Обнаружено сильное затухание сигналов в полосе ниже 15 кГц. Показана возможность осуществления беспроводной связи в канале водопроводной трубы путём моделирования битовых ошибок (BER) для модуляции OFDM BPSK. Сделан важный вывод о том, что акустические волноводы, заполненные водой, следует рассматривать как эластичные трубы, и они существенно отличаются по характеристикам от незаполненных, которые можно рассматривать как жесткие трубы [15]. Дается прогноз на дальность связи более 50 м.

Продолжаются исследования особенностей распространения электромагнитных волн при диэлектрическом каротаже и скважинной радиолокации, что критически важно для понимания влияния диэлектрической проницаемости и электропроводности пласта [16–17]. Используется численное моделирование с применением трёхмерного метода конечных разностей во временной области (FDTD). Изучено затухание направленной волны вдоль металлической трубы и определён коэффициент потерь. Установлена линейная зависимость вносимых потерь от расстояния до приёмника. Результаты моделирования показали, что затухание направленной волны изменяется в зависимости от водонасыщенности пласта и частоты.

Предполагается, что использование ультразвукового сигнала позволит повысить эффективность передающей системы во вмещающей среде [18]. В качестве волновода предлагается использовать внутритрубное пространство, которое, при наполнении жидкостью значительно уменьшает затухание сигнала. Также немаловажным достоинством использования ультразвука является устойчивость к электромагнитным помехам. Предыдущие результаты показали перспективность данного направления [19].

Из-за узости и протяжённости труб характеристики передачи и ослабления сигналов могут сильно отличаться от результатов существующих исследований. Поэтому исследование волноводных эффектов, характеристик передачи в разных полосах частот также различаются. Таким образом, моделирование характеристик радиоканала в трубопроводах имеет решающее значение для проектирования систем передачи телеметрии [20].

Акустическая телеметрия является эффективным методом передачи скважинных данных при бурении. Расположение скважинных труб играет важную роль для повышения эффективности передачи пространственных волн, проходящих через бурильную колонну. Конечно-разностное моделирование в работе [21] позволило получить отклик канала, подобный гребенчатому фильтру из-за наличия соединительных замков в металлической бурильной колонне. В этой статье сравниваются характеристики канала для различных расположений труб. Измерения отклика канала производилось на экспериментальной установке

путем размещения восьми труб. Из полученных результатов сделан вывод о том, что определённое расположение обеспечивает наилучшие показатели максимальной передачи энергии акустической телеметрии.

Изгиб и деформация труб существенно влияют на дальность и скорость передачи данных, а также на частоту битовых ошибок, вызванные дисперсией канала, затуханием и эффектом многолучёвости [22]. Авторы предлагают многообещающий метод обработки сигналов с обращением во времени, который основан на вейвлет-преобразовании и заключается в сжатии битового вейвлета, что позволяет сконцентрировать энергию сигнала для улучшения качества связи. Изучена эффективность метода, применённого к каналу в виде трубы с использованием пьезоэлектрических преобразователей и каналу из стальной пластины с использованием электромагнитно-акустических преобразователей. Определена оптимальная длительность импульса одного бита путём сравнения отношения сигнал-шум для импульсов различной длительности. Результаты показывают, что импульсно-позиционная модуляция высокоэффективна для улучшения качества связи в сложных каналах с сильной дисперсией, затуханием и эффектами многолучёвости [23]. Экспериментальная модель продемонстрировала эффективность метода обработки сигналов с обращением во времени для ультразвуковой передачи данных по сложным металлическим каналам.

В статье [24] предложена модель сверхвысоко-частотного канала, а в работе [25] – акустического канала для длинных буровых колонн. Модель позволяет прогнозировать достижимые скорости передачи данных. Распространение акустической волны моделируется матрицей  $S$ -параметров для буровой колонны, представленной как серия чередующихся коротких и длинных резонаторов, обусловленных сегментами с постоянным акустическим сопротивлением. Модель проверялась путём сравнения с измерениями на реальной буровой колонне. Используя модель, можно предсказать свойства коллектора реальных буровых труб с переменными размерами. Установлено, что для эффективной связи на расстоянии более 1,5 км отклонения длины резьбовых соединений должны быть ограничены несколькими сантиметрами, в то время как длина трубы может сильно варьироваться в пределах метра.

Обзор рассмотренных источников ясно показывает возможность передачи телеметрии на большое расстояние по акустическому каналу связи, что требует дальнейших экспериментальных исследований, моделирования и оценки влияния помеховых отражений, в частности, трубных соединений.

## II. ЭКСПЕРИМЕНТ

Для исследования влияние трубных замков на затухание ультразвукового сигнала была изготовлена экспериментальная установка, показанная на Рис. 2. Установка состоит из трубы длиной 6 м, наполненной водой. Приёмник размещён на краю трубы, передатчик свободно перемещается по длине. Для имитации бурового замка использовался металлический кабель-канал диаметров 2,1 см. Он размещён на расстоянии 210 см от приёмника и скручен во внутренней части трубы в несколько оборотов для достижения длины 20 см [26–27].

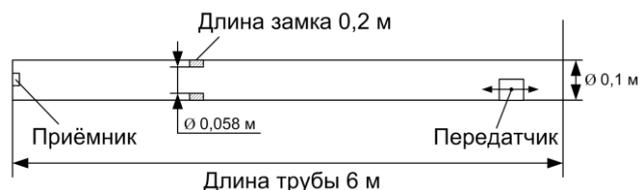


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

В [26] были описаны системы с использованием пьезоэлементов ma40s4 и ЗП-25. Основными изменениями в системе были замена пьезоэлементов на TR60-10H0Z-01 и частоты сигнала на 60 кГц. Помимо этого в схему был добавлен повышающий трансформатор для пьезоизлучателя с целью формирования оптимального по амплитуде сигнала. Данные изменения позволили значительно снизить затухание сигнала в трубе [27]. Для возможности работы в заполненном жидкостью волноводе устройства были помещены в герметичные корпуса. Передатчик формирует пакеты импульсов в соответствии с кодировкой «Манчестер-II». Один пакет импульсов представляет собой набор символов в шестнадцатеричной системе счисления: AA0800B2, где B2 – это контрольная сумма AA+08 [28].

Проведено две серии измерений – с буровым замком и без него. Труба была полностью заполнена водой. Передатчик отдалялся от приёмника с шагом 10 см, в каждой точке проводилось три измерения размаха сигнала ( $V_{pp}$ ). Средние значения измерений в каждой точке показаны на Рис. 3.

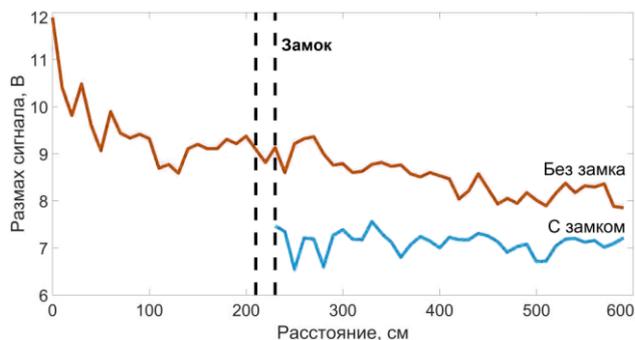


Рис. 3. Результаты измерений

Наличие замка значительно снижает уровень сигнала, примерно в 0,18 раз. Можно сформулировать гипотезу о том, что замок вносит постоянную составляющую в модель затухания, что связано с нелинейностью (Рис. 4). Моделирование проведено в работах [26–29].

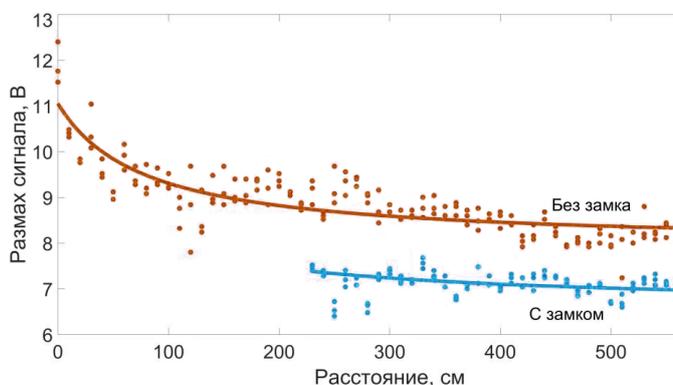


Рис. 4. Результаты измерений и соответствующие регрессионные модели

Проведём моделирование затухания сигнала на расстоянии 500 м (Табл. I). При этом примем длину бурильной трубы 8,3 м.

ТАБЛИЦА I  
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАТУХАНИЯ СИГНАЛА

Расстояние между приёмником и передатчиком, м	Затухание сигнала, дБ	Затухание сигнала с бурильными замками, дБ
0	0	0,00
100	2,85	23,85
200	2,86	44,86
300	2,87	65,83
400	2,87	86,87
500	2,87	107,87

По Табл. I делаем вывод о том, что при учёте замков в трубе длиной 400 метров уровень сигнала составит менее 1 мВ.

При использовании внутритрубного пространства в качестве волновода возникает две проблемы:

- Интерференция, которая повышает уровень шума;
- Снижение уровня сигнала в местах сужения внутреннего диаметра.

Первая проблема была решена в статье [3] путём использования дополнительного резонансного усилителя для снижения коэффициента усиления низкоуровневого сигнала. Дальнейшие исследования будут направлены на поиск способов снижения уровня затухания.

Для изучения влияния жидкости в волноводе на затухание ультразвукового сигнала были произведены измерения в трубе длиной 4 м с шагом 10 см с наполненной водой и пустой трубой (Рис. 5).

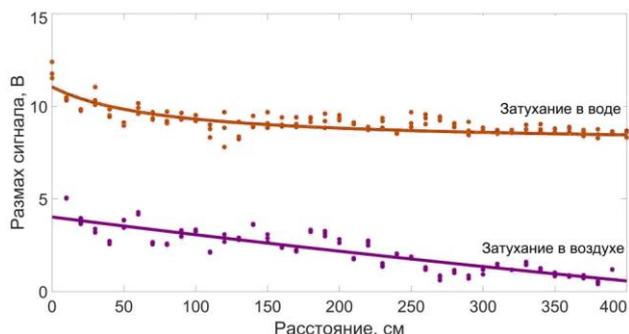


Рис. 5. Результаты измерений и соответствующие регрессионные модели

Разработанная система не предназначена для работы в газообразной среде, поскольку уровень сигнала достигает уровня шума до 5 м, что делает невозможным идентификацию полезного сигнала. Также по Рис. 5 можно сделать вывод о том, что модель затухания приближена к линейной, а скорость затухания значительно выше скорости затухания сигнала в воде.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка системы передачи телеметрической информации от забоя к устью скважины неотъемлемо связано с изучением затухания в трубах. Нами была разработана ультразвуковая система связи, волноводом которой является внутритрубное пространство. В процессе исследования были обнаружены две основные проблемы: возникновение интерференции и затухание сигнала в местах уменьшения диаметра трубы (бурильного замка). Измерения на экспериментальном стенде показали, что наличие одного замка в трубе снижает уровень сигнала в 0,18 раз. В связи с этим наличие замков каждые 8,3 метра снизят уровень сигнала до 1 мВ после 400 м трубы. Также было экспериментально доказано, что разработанная система связи предназначена для передачи сигнала по волноводу, заполненным жидкостью, поскольку в газообразной среде происходит резкое затухание сигнала.

### ЛИТЕРАТУРА

[1] Alenezi A.H. Experimental Results On the Drill String Design for Borehole Acoustic Communicatio (Экспериментальные результаты по проектированию бурильной колонны для акустической связи в скважине) // 2022 4th International Conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics (ICAID), Hail, Saudi Arabia. – 2022. – С. 1-6. – Doi: 10.1109/ICAID51067.2022.9799495.  
 [2] 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). – 16-18 October 2014. – Tomsk, Russia. – DOI: 10.1109/MEACS.2014.6986885. Elibrary ID: 24032033. (Мирманов А.Б., Стукач О.В. Системные проблемы в сверхвысокочастотных забойных телеметрических системах для управляемого бурения и

- их моделирование в среде Matlab Simulink // *Международная конференция по механике, автоматике и системам управления (MEACS)*. – 16-18 октября 2014 г., Томск, Россия).
- [3] Стукач О.В., Ершов И.А., Быков С.В., Гладышев С.А. Разработка ультразвукового приёмопередатчика для скважинной телеметрии // *Журнал радиоэлектроники*. – 2022. – N 11. – DOI: 10.30898/1684-1719.2022.11.3.
- [4] Ershov I., Stukach O., Seismic Field Tests of a Distributed Acoustic Sensor // *Systems Engineering and Infocommunications*. – 2025. – № 1. – С. 17-21. – Doi: 10.5281/zenodo.15110964. (Ершов И.А., Стукач О.В. Полевые испытания распределенного акустического датчика // *Системная инженерия и инфокоммуникации*. – 2025. – N 1(1). – С. 17-21. – DOI: 10.5281/zenodo.15110964).
- [5] Stukach O.V., Mirmanov A.B. Behavioral Modeling a Wireless Borehole Communication Channel for Increase of the Telemetry Transfer Accuracy // *2018 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics) Conference*. – Omsk, Russia. – 13-15 Nov. 2018. – DOI: 10.1109/Dynamics.2018.8601423. (Стукач О.В., Мирманов А.Б. Поведенческое моделирование беспроводного канала связи через бурильную трубу для повышения точности передачи телеметрической информации // *Конференция "Динамика систем, механизмов и машин"*. – Омск, 13-15 ноября 2018. – DOI: 10.1109/Dynamics.2018.8601423).
- [6] Nath S., Messier G.G., Belostotski L., Shor R. Wideband Modeling of the Mud-Pulse Communications Channel (Широкополосное моделирование гидроимпульсного канала связи) // *IEEE Communications Letters*. – 2021. – Т. 25. – № 1. – С. 18-22. – Doi: 10.1109/LCOMM.2020.3023967.
- [7] Мирманов А.Б., Стукач О.В., Байгуаныш С.Б. Проблемы в использовании канала связи с передачей данных в СВЧ диапазоне через бурильную трубу // *Современное состояние естественных и технических наук*. – Изд.: ООО "Издательство "Спутник+" (Москва). – 2014. – № 13. – С. 85-88. – Elibrary ID: 21237987.
- [8] Kutuzov D., Osovsky A., Stukach O., Starov D. Modeling of PoT Traffic Processing by Intra-Chip NoC Routers of 5G/6G Networks // *2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. – 13-15 May 2021, Kazan, Russia. – DOI: 10.1109/SIBCON50419.2021.9438874, Elibrary ID: 46825100. (Кутузов Д.В., Осовский А.В., Стукач О.В., Старов Д.В. Моделирование обработки трафика промышленного Интернета вещей внутричиповыми маршрутизаторами сетей 5-6 поколения // *Международная IEEE-Сибирская конференция по управлению и связи SIBCON-2021*).
- [9] Емец С.В., Краснов А.Н., Прахова М.Ю., Калашник Ю.В. Организация наземного канала связи для системы передачи данных в процессе бурения // *Нефтегазовое дело*. – 2021. – Т. 19. – № 6. – С. 34-45.
- [10] Kochumeev V.A., Mirmanov A.B. et al. Problems in design of the new microwave geophysical measuring system // *19th International Conference on Microwaves, Radar & Wireless Communications (MIKON)*. – 2012. – 21-23 May. – Т. 2. – С. 516-518. – DOI: 10.1109/MIKON.2012.6233570 (Кочумеев В.А., Мирманов А.Б. и др. Проблемы проектирования новой микроволновой геофизической измерительной системы // *19 международная конференция по СВЧ радарам и беспроводной связи (MIKON)*).
- [11] Молчанов А.А., Лукьянов Э.Е., Рапин В.А. Геофизические исследования горизонтальных нефтегазовых скважин. – С.-Пб: МАНЭБ. – 2001.
- [12] Шевченко М.А. Беспроводной комбинированный канал связи для телеметрии в процессе бурения сверхглубоких скважин // *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*. – 2013. – № 12. – С. 5-12.
- [13] Jing L., Li Y., Murch R.D. Wideband modeling of the acoustic water pipe channel (Широкополосное моделирование акустического канала водопроводной трубы) // *OCEANS 2016*. – Shanghai, China. – 2016. – С. 1-8. – Doi: 10.1109/OCEANSAP.2016.7485640.
- [14] Jing L., Li Z., Murch R.D. Experimental study of acoustic channel characteristics of rigid and elastic pipelines (Экспериментальное исследование акустических характеристик каналов жестких и эластичных трубопроводов) // *OCEANS 2017*. – Aberdeen, UK. – С. 1-5. – Doi: 10.1109/OCEANSE.2017.8084867.
- [15] Jing L., Li Z., Li Y., Murch R.D. Channel Characterization of Acoustic Waveguides Consisting of Straight Gas and Water Pipelines (Характеристика канала акустических волноводов, состоящих из прямых газовых и водопроводных трубопроводов) // *IEEE Access*. – 2018. – Т. 6. – С. 6807-6819. – Doi: 10.1109/ACCESS.2018.2793299.
- [16] Wang B., Huang Z., Xing L., Lao L., Wei Z., Ge X. Quantitative Analysis of Guided Wave in Dielectric Logging Through Numerical Simulation // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. – 2022. – Т. 19. – С. 1-5. – Статья № 8001905. – DOI: 10.1109/LGRS.2020.3025783.
- [17] Stukach O.V., Goponenko A.S., Mirmanov A.B., Kochumeev V.A. Equipment for Extract Behavioral Transmitter Models for the New Communication Telemetry System Design // *2014 International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP)*. – 12-15 May 2014. – Dubrovnik, Croatia. – С. 247-250. – Elibrary ID: 23957940. – <https://ieeexplore.ieee.org/document/6837677>. (Стукач О.В., Гопonenko А.С., Мирманов А.Б., Кочумеев В.А. Установка для получения поведенческой модели передатчика новой телеметрической системы связи // *Международная конференция по системам, обработке сигналов и изображений IWSSIP*).
- [18] Мирманов А.Б., Стукач О.В. Исследование вмещающей среды методом кластерного анализа для геофизической телекоммуникационной системы // *Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций имени М. Тынышпаева*. – № 4 (77). – 2012. – С. 36-41. – Elibrary ID: 29329358.
- [19] Zeng Z. et al. Study on positioning of trenchless drill bits based on the principle of acoustic resonance // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2023. – Т. 140. – С. 105231.
- [20] Mirmanov A.B., Stukach O.V. The Receiver-Transmitter for the Measurement Information Transfer by the Inhomogeneous Media // *The 7th International Forum on Strategic Technology IFOST2012*. – September 17-21, 2012. – Tomsk Polytechnic University. – Т. 1. – С. 552-554. – DOI: 10.1109/IFOST.2012.6357618. (Мирманов А.Б., Стукач О.В. Приёмопередатчик измерительной информации для неоднородных сред // *7 международный форум по стратегическим технологиям*).
- [21] Kumar L.S., Han W.K., Guan Y.L., Lee Y.H., Sun S. Optimization of acoustic communication for industrial drilling (Оптимизация акустической связи (для промышленного бурения)) // *2013 IEEE Conference on Information & Communication Technologies*. – Thuckalay, India. – 2013. – С. 1060-1063. – Doi: 10.1109/CICT.2013.6558255.
- [22] Huang X., Saniie J., Bakhtiari S., Heifetz A. Time Reversal Signal Processing for Ultrasonic Communication through Metal Channels // *2019 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*. – Glasgow, UK. – 2019. – С. 623-626. – Doi: 10.1109/ULTSYM.2019.8926138.
- [23] Yuemin W., Lihua S., Chuanjun S., Fengrui S. Theoretical and experimental research on controlling guided waves propagation direction in pipes // *IEEE 2011 10th International Conference on Electronic Measurement & Instruments*. – Chengdu, China. – 2011. – С. 28-32. – Doi: 10.1109/ICEMI.2011.6037671.
- [24] Stukach O., Mirmanov A., Ivanov Yu.Yu. Signal processing in the microwave front-end radiolink for logging-while-drilling through the borehole pipes // *2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*. – 14-16 March 2018. – Moscow, Russia. – DOI: 10.1109/MWENT.2018.8337304. (Стукач О.В., Мирманов А.Б., Иванов Ю.Ю. Обработка сигнала в сверхвысокочастотной системе связи через бурильные трубы для каротажа в процессе бурения // *Московский IEEE семинар по электронным и сетевым технологиям (MWENT)*, Москва, Россия).
- [25] Gutierrez-Esteviz M.A., Krueger U., Krueger K.A., Manolakis K., Jungnickel V. Acoustic channel model for adaptive downhole communication over deep drill strings (Модель акустического канала для адаптивной внутрискважинной связи по колоннам глубинного бурения) // *2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. – Vancouver, BC, Canada. – 2013. – С. 4883-4887. – Doi: 10.1109/ICASSP.2013.6638589.
- [26] Stukach O.V., Ershov I.A., Bykov S.V., Grigorev D.A., Trubin I.V. Influence of Fittings of Drill Pipe Ultrasonic Signal Dampening in a Well // *Actual Problems of Electronic Instrument Engineering*

- (APEIE). – Novosibirsk, Russia. – 2023. – С. 560-564. – DOI: 10.1109/APEIE59731.2023.10347587. (Стукач О.В., Ершов И.А., Быков С.В., Григорьев Д.А., Трубин И.В. Влияние замков бурильных труб на гашение ультразвукового сигнала в скважине // Международная научно-техническая конференция "Актуальные проблемы электронного приборостроения". – Новосибирск).
- [27] Стукач О.В., Ершов И.А., Быков С.В., Трубин И.В. Регрессионная модель затухания ультразвукового сигнала в скважине // *Журнал радиоэлектроники*. – 2023. – № 3. – DOI: 10.30898/1684-1719.2023.3.9.
- [28] Stukach O.V., Mirmanov A.B. Behavioral Modeling a Wireless Borehole Communication Channel for Increase of the Telemetry Transfer Accuracy // *2018 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics) Conference*. – Omsk, Russia. – 13-15 Nov. 2018. – DOI: 10.1109/Dynamics.2018.8601423. (Стукач О.В., Мирманов А.Б. Поведенческое моделирование беспроводного канала связи через бурильную трубу для повышения точности передачи телеметрической информации // Конференция "Динамика систем, механизмов и машин". Омск).
- [29] Мирманов А.Б., Стукач О.В., Гопоненко А.С. MatLab-моделирование передачи данных в забойной телеметрической системе с радиоканалом // *Динамика систем, механизмов и машин*. – 2014. – N 4. – С. 36-38. – Elibrary ID 22509151.

### Информация об авторах

Стукач Олег Владимирович, д.т.н., профессор кафедры Защиты информации Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Россия, профессор департамента Электронной инженерии Московского института электроники и математики им. А.Н.Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», г. Москва, Россия, e-mail: [tomsk@ieec.org](mailto:tomsk@ieec.org), ORCID: 0000-0001-6845-4285.

Ершов Иван Анатольевич, старший преподаватель кафедры Защиты информации Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Россия, e-mail: [ershov@corp.nstu.ru](mailto:ershov@corp.nstu.ru), ORCID: 0000-0003-1524-6508.

### Influence of Drill Pipe Fittings on Ultrasonic Telemetry Suppression

O.V. Stukach<sup>1,2</sup>, I.A. Ershov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

**Abstract** – The transfer of telemetry from the bottom to the wellhead during drilling is an urgent problem that has a lot of engineering features. Drilling of Paleozoic deposits leads to the need developing research in this field. A lot of outcomes on studying the effect of drill string fittings on ultrasonic signal attenuation are presented. The measurements were carried out on an experimental setup of a tube up to six meters long, inside which the signal transmitter moved freely. An ultrasonic transmitter and receiver at 60 kHz based on TR60-10H0Z-01 piezoelectric elements were used. A graph of the

**ultrasonic signal attenuation in a pipe without water is obtained. Regression approach was used to obtain models of attenuation in a pipe with water. It is shown that one drill fitting reduces the signal level by 0.18 times, and the general sight of the model does not change. Using pipes with a length of 8.3 m with fittings, simulation of attenuation vs distance to the receiver showed that a decrease in signal amplitude to noise level will occur about 400 m.**

**Keywords** – downhole telemetry, acoustic communication, ultrasonic channel, acoustic waves, measurements while drilling, acoustic measurements, drill string, downhole-mouth channel, channel response, attenuation in the medium.

### References

- [1] A.H. Alenezi, "Experimental Results On the Drill String Design for Borehole Acoustic Communicatio," *2022 4th International Conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics (ICAAD)*, Hail, Saudi Arabia, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICAAD51067.2022.9799495.
- [2] A.B. Mirmanov, O.V. Stukach, "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)* 16-18 October 2014, Tomsk, Russia. Print ISBN: 978-1-4799-6220-4. DOI: 10.1109/MEACS.2014.6986885. Elibrary ID: 24032033.
- [3] O.V. Stukach, I.A. Ershov, S.V. Bykov, S.A. Gladyshev, "Design of an ultrasonic transceiver for downhole telemetry", *Zhurnal Radioelektroniki* - Journal of Radio Electronics, 2022, no. 11, DOI: 10.30898/1684-1719.2022.11.3 (in Russian).
- [4] I. Ershov and O. Stukach, "Seismic Field Tests of a Distributed Acoustic Sensor", *Systems Engineering and Infocommunications*, No. 1, pp. 17-21, Mar. 2025, doi: 10.5281/zenodo.15110964. – <https://sys-engine.ru/index.php/SEL/article/view/1>.
- [5] O.V. Stukach, A.B. Mirmanov. "Behavioral Modeling a Wireless Borehole Communication Channel for Increase of the Telemetry Transfer Accuracy". *2018 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics) Conference*, Omsk, Russia. 13-15 Nov. 2018. DOI: 10.1109/Dynamics.2018.8601423.
- [6] S. Nath, G. G. Messier, L. Belostotski and R. Shor, "Wideband Modeling of the Mud-Pulse Communications Channel," *IEEE Communications Letters*, vol. 25, no. 1, pp. 18-22, Jan. 2021, doi: 10.1109/LCOMM.2020.3023967.
- [7] A.B. Mirmanov, O.V. Stukach, S.B. Baiguanysh, "The problems of application of the communication channel with microwave data transfer through the drilling pipe", *Sovremennoe sostoyanie estestvennykh i tekhnicheskikh nauk*, Moscow, Sputnik+ Ltd Publ., 2014, no. 13, pp. 85-88, Elibrary ID: 21237987 (in Russian).
- [8] D. Kutuzov, A. Osovsky, O. Stukach, D. Starov, "Modeling of IIoT Traffic Processing by Intra-Chip NoC Routers of 5G/6G Networks". *2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. 13-15 May 2021, Kazan, Russia, DOI: 10.1109/SIBCON50419.2021.9438874, Elibrary ID: 46825100.
- [9] S.V. Emets, Krasnov A.N., PrakhovaM.Yu., Kalashnik Yu.V. Organization of a Ground Communication Channel for the System Data Transmission while Drilling. *Neftegazovodelo – Petroleum Engineering*. 2021. V.19. №6. P.34–45 (in Russian).
- [10] V.A. Kochumeev, A.B. Mirmanov et al., "Problems in design of the new microwave geophysical measuring system", *19th International Conference on Microwaves, Radar & Wireless Communications (MIKON)*, 2012, 21-23 May, Vol. 2, P. 516-518, DOI: 10.1109/MIKON.2012.6233570.
- [11] A. Molchanov, Lukianov E., RapinV. Logging of horizontal oil and gas wells: text-book. *St.-Petersburg: International Academy of ecology, man and nature protection sciences*. 2001. 298 p. (in Russian).

- [12] M.A. Shevchenko Combined wireless communication channel for the telemetry while ultradeep drilling. *Automation and Informatization of the fuel and energy complex*, 2013, no. 12, Pp. 5–12 (in Russian).
- [13] L. Jing, Y. Li, and R.D. Murch, "Wideband modeling of the acoustic water pipe channel," *OCEANS 2016*, Shanghai, Shanghai, China, 2016, pp. 1-8, doi: 10.1109/OCEANSAP.2016.7485640.
- [14] L. Jing, Z. Li, and R. D. Murch, "Experimental study of acoustic channel characteristics of rigid and elastic pipelines," *OCEANS 2017*, Aberdeen, Aberdeen, UK, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/OCEANSE.2017.8084867.
- [15] L. Jing, Z. Li, Y. Li and R.D. Murch, "Channel Characterization of Acoustic Waveguides Consisting of Straight Gas and Water Pipelines," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 6807-6819, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2793299.
- [16] B. Wang, Z. Huang, L. Xing, L. Lao, Z. Wei and X. Ge, "Quantitative Analysis of Guided Wave in Dielectric Logging Through Numerical Simulation," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, vol. 19, pp. 1-5, Art no. 8001905, DOI: 10.1109/LGRS.2020.3025783.
- [17] O.V. Stukach, A.S. Goponenko, A.B. Mirmanov, V.A. Kochumeev. "Equipment for Extract Behavioral Transmitter Models for the New Communication Telemetry System Design", *2014 International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP)*, 12-15 May 2014, Dubrovnik, Croatia, p. 247-250, Elibrary ID: 23957940, <https://ieeexplore.ieee.org/document/6837677>.
- [18] A.B. Mirmanov, O.V. Stukach, "Investigations of the media by cluster fnlysis for the geophysical communication system", *Vestnik Kazakhskoi Akademii transporma i Kommunikacii imeni M. Tynyshpaeva*, no. 4 (77). - 2012. - C. 36-41. - ISSN 1609-1817. Elibrary ID: 29329358. (in Russian).
- [19] Zeng Z. et al. "Study on positioning of trenchless drill bits based on the principle of acoustic resonance", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, vol. 140, p. 105231.
- [20] A.B. Mirmanov, O.V. Stukach, "The Receiver-Transmitter for the Measurement Information Transfer by the Inhomogeneous Media", *The 7th International Forum on Strategic Technology IFOST2012*, September 17-21, 2012, Tomsk Polytechnic University, vol. 1, pp. 552-554, DOI: 10.1109/IFOST.2012.6357618.
- [21] L.S. Kumar, W.K. Han, Y.L. Guan, Y.H. Lee and S. Sun, "Optimization of acoustic communication for industrial drilling," *2013 IEEE Conference on Information & Communication Technologies*, Thuckalay, India, 2013, pp. 1060-1063, doi: 10.1109/CICT.2013.6558255.
- [22] X. Huang, J. Saniie, S. Bakhtiari and A. Heifetz, "Time Reversal Signal Processing for Ultrasonic Communication through Metal Channels," *2019 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, Glasgow, UK, 2019, pp. 623-626, doi: 10.1109/ULTSYM.2019.8926138.
- [23] W. Yuemin, S. Lihua, S. Chuanjun and S. Fengrui, "Theoretical and experimental research on controlling guided waves propagation direction in pipes," *IEEE 2011 10th International Conference on Electronic Measurement & Instruments*, Chengdu, China, 2011, pp. 28-32, doi: 10.1109/ICEMI.2011.6037671.
- [24] O. Stukach, A. Mirmanov, Yu. Ivanov, "Signal processing in the microwave front-end radiolink for logging-while-drilling through the borehole pipes", *2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*, 14-16 March 2018, Moscow, Russia, DOI: 10.1109/MWENT.2018.8337304.
- [25] M.A. Gutierrez-Estevez, U. Krueger, K.A. Krueger, K. Manolakis, and V. Jungnickel, "Acoustic channel model for adaptive downhole communication over deep drill strings," *2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Vancouver, BC, Canada, 2013, pp. 4883-4887, doi: 10.1109/ICASSP.2013.6638589.
- [26] O.V. Stukach, I.A. Ershov, S.V. Bykov, D.A. Grigorev, and I.V. Trubin, "Influence of Fittings of Drill Pipe Ultrasonic Signal Dampening in a Well," *Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE)*, Novosibirsk, Russian Federation, 2023, pp. 560-564. DOI: 10.1109/APEIE59731.2023.10347587.
- [27] Stukach O.V., Ershov I.A., Bykov S.V., Trubin I.V. The Regression Model of the Ultrasonic Signal Attenuation in a Well Design of an ultrasonic transceiver for downhole telemetry. *Zhurnalradioelektroniki [Journal of Radio Electronics]* [online], 2023, no. 3, DOI: 10.30898/1684-1719.2023.3.9 (in Russian).
- [28] Oleg V. Stukach, Arman B. Mirmanov. "Behavioral Modeling a Wireless Borehole Communication Channel for Increase of the Telemetry Transfer Accuracy". *2018 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*, Omsk, Russia, 13-15 Nov. 2018, DOI: 10.1109/Dynamics.2018.8601423.
- [29] Mirmanov A.B., Stukach O.V., Goponenko A.S. MatLab-modeling of the data transfer in the drilling telemetry system with radio channel // *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics 2014*; Omsk State Technical University Omsk; Russian Federation; 11-13 November 2014, no 4, pp. 36-38, Elibrary ID 22509151. (in Russian).