

Анализ транспортных свойств гидроакустических каналов связи

С.С.Шаврин, д.т.н., проф. МТУСИ /sss@mtuci.ru,
О.Ю.Мусатова, ст. преподаватель МТУСИ

УДК 621.391.26, DOI: 10.22184/2070-8963.2025.129.5.36.41

Рассматривается влияние воды как среды передачи на транспортные свойства гидроакустических каналов связи в контексте потенциальных возможностей повышения их пропускной способности. Проведен анализ влияния основной группы деструктивных факторов распространения гидроакустического сигнала на такие характеристики канала, как энергетический бюджет, нестационарность передаточной характеристики и эффективность ее предкоррекции, эффективность использования концентрации передаваемой энергии направляющими системами, проявление эффекта Доплера и выбор типа сигнально-кодовой конструкции.

Введение

Физический механизм переноса энергии звуковой волной принципиально отличается от переноса энергии электромагнитным полем, также как и эффекты от их воздействия на передачу сигналов в гидроакустических системах. Физический перенос энергии электромагнитным полем – это поперечное к направлению распространения колебание двух векторов электрического (E) и магнитного (B) полей, образующих вектор Умова – Пойнтинга, составляющее непрерывный поток электромагнитной энергии, который может быть описан только законами электродинамики.

Физическая сущность переноса энергии звуковой волной – это продольное колебание материальных частиц относительно средних своих положений, определяемое механическим колебательным процессом, параметры которого описываются законом механики [1].

Средой распространения сигнала в гидроакустических системах является вода, свойства которой,

зависимые от большого количества внешних факторов, накладывают свои ограничения на характеристики передачи.

Настоящая статья имеет целью анализ влияния воды как среды передачи на транспортные свойства гидроакустических каналов связи и потенциальные возможности повышения их пропускной способности на мелководье.

Энергетический бюджет гидроакустического канала

В отличие от большинства других видов сред передачи сигнала, например радиоканалов, доминирующим фактором ограничения энергетики гидроакустических каналов связи является предельно допустимое значение плотности потока мощности акустического сигнала, превышение которого приводит к кавитационным явлениям, нарушающим процесс передачи.

Значение средней энергии звуковой волны в единице объема в «бегущей» упругой звуковой волне

пропорциональна плотности среды ρ , квадрату амплитуды колебаний A^2 и квадрату частоты f^2 . Акустические воздействия на воду, связанные с распространением сигнала, сопровождаются адиабатическими сжатиями и разрежениями и вызывают объемные изменения в структуре жидких сред. В некоторых условиях, зависящих от энергии и частоты воздействия, имеет место образование кавитации, которая способствует концентрации низкой плотности энергии в высокую и вызывает переход воды в метастабильное состояние [1], характеризующееся образованием и захлопыванием полостей и жидкости под воздействием звука. Полости образуются в результате разрыва жидкости во время полупериодов сжатия.

Акустической кавитацией называется нарушение сплошного характера жидкости или развитие существующих в ней микропузырьков в результате локального снижения давления при прохождении акустической волны большой интенсивности [2].

Существует нелинейная зависимость в виде предельных кривых Эше между частотой акустической волны и пороговым давлением, при котором возникает кавитация. Пороговым давлением называется значение амплитуды акустического давления, вызывающего расширение зародыша микропузырька до критического размера, после которого он начинает расти взрывообразно. Чем ниже частота акустической волны, тем ниже пороговое давление. Например, для частоты 1 кГц пороговое давление не превышает 105 Па при нормальном статическом давлении и температуре ($P_\infty \approx 0,1$ МПа, $T \approx 20$ °C) [3]. Появление кавитации ограничивает дальнейшее распространение акустической волны, излучаемой в жидкости, что влечет за собой снижение нагрузки на излучатель.

Использование направляющих систем

Явление кавитации практически нивелирует эффективность использования концентрации передаваемой энергии направляющими системами (антеннами, линзами, отражателями и др.) как критического средства повышения энергетики и, как следствие, пропускной способности и дальности гидроакустических каналов.

При возникновении кавитации в фазе захлопывания сферической полости давление в ней резко возрастает как при взрыве, что приводит к излучению импульса сжатия.

Давление при захлопывании особенно велико при содержании газа в жидкости выше 50%. От насыщения

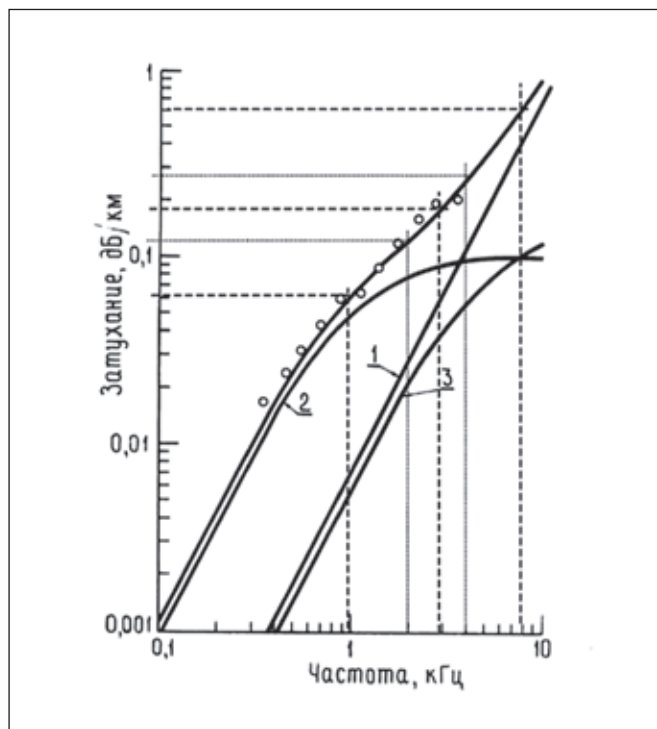


Рис.1. Результаты экспериментов в Северной Атлантике при температуре воды $T = 4$ °C и кислотности $pH = 8,0$ [4]

возникает образование и всплывание газовых пузырьков и вырождение паровой кавитации в газовую [4]. Если образовавшиеся паровые пузырьки колеблются вблизи границы с твердым телом, около них возникают интенсивные микропотоки, способные это твердое тело разрушить.

Использование направляющих систем в системах гидроакустической связи может быть эффективно для экономии энергии передатчика, однако пропускная способность тем не менее ограничена кавитационными явлениями.

Предкоррекция частотных характеристик канала

Влияние воды как среды передачи на гидроакустические сигналы разных частот проявляется в двух разнородных тенденциях.

Во-первых, имеет место резкая зависимость затухания акустических сигналов от частоты вследствие вязкого поглощения колебательной энергии молекулами воды, что иллюстрируется результатами экспериментальных исследований, представленных на рис.1 и 2 для разных условий и регионов [4].

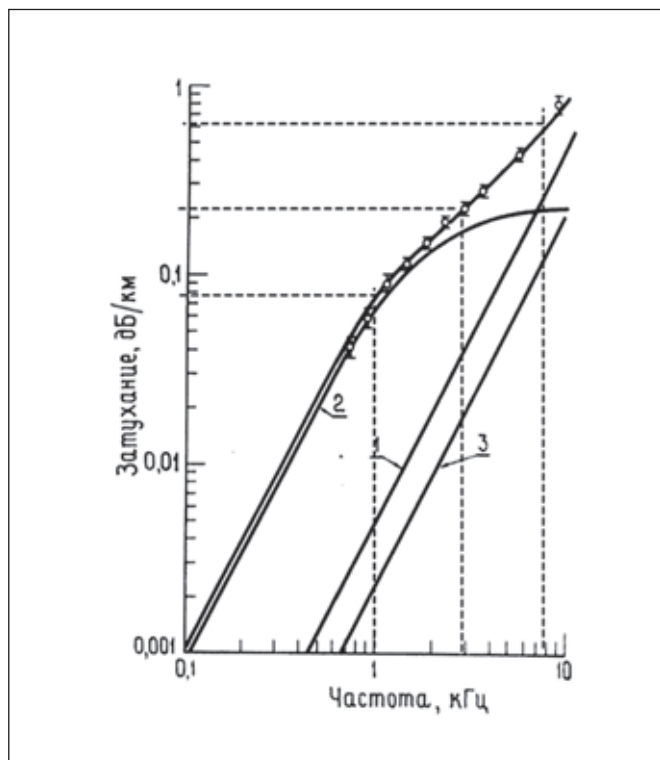


Рис.2. Результаты экспериментов в Красном море при температуре воды $T = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ и кислотности $\text{pH} = 8,2$ [4]

На этих рисунках цифрами обозначены графики коэффициента затухания, обусловленные релаксацией соответственно: 1 — MgSO_4 , 2 — B(OH)_3 и 3 — MgCO_3 . Кружочками обозначены результаты экспериментальных измерений при использовании тональных сигналов.

Обычно для описания частотной характеристики затухания используется уравнение Торпа [4]:

$$\alpha(f) = \frac{40f^2}{4100 + f^2} + \frac{0,1f^2}{1 + f^2} + \frac{0,03f^2}{36 + f^2}.$$

Во вторых, с ростом частоты повышается интенсивность и вероятность возникновения кавитационных явлений. Значение порога возникновения кавитации в используемом для связи диапазоне частот имеет слабо возрастающую зависимость от частоты, иллюстрируемую результатами экспериментальных исследований, представленными на рис.3.

При этом количество зародышей микропузырьков, способствующих возникновению кавитации, с ростом частоты возрастает в соответствии с рис.4 [7].

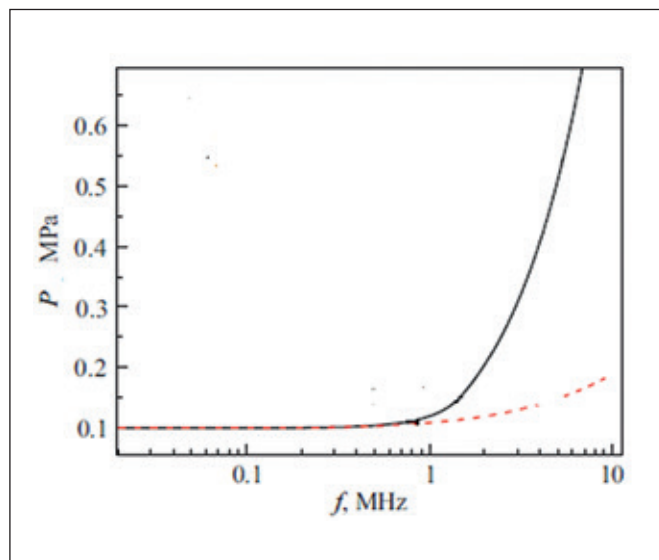


Рис.3. Пороговое отрицательное давление для начала кавитации P в зависимости от частоты ультразвука f : 1 — данные из [5]; 2 — данные из [6]

Это явление будет в значительной степени снижать эффективность предкоррекции как средства выравнивания отношения сигнал/шум в пределах спектра передачи канала.

Эффект Доплера

Вследствие влияния среды распространения на передачу сигналов воздействие эффекта Доплера в гидроакустике имеет несколько существенных отличий от радиоканалов.

Как известно, эффект Доплера заключается в изменении спектра передаваемого по каналу сигнала при взаимном движении источника и приемника. Выражается этот эффект в относительном сдвиге частоты сигнала пропорционально скорости движения, и, самое главное, значению самой частоты. Количественно изменение значения частоты описывается выражением:

$$F_{\text{пр}} = F_{\text{ист}} \frac{c \pm V_{\text{пр}}}{c \mp V_{\text{ист}}},$$

где $F_{\text{пр}}$ — значение частоты сигнала, наблюдаемое приемником,
 $F_{\text{ист}}$ — значение частоты сигнала, генерируемое источником,
 $V_{\text{пр}}$ — скорость приемника относительно среды распространения сигнала

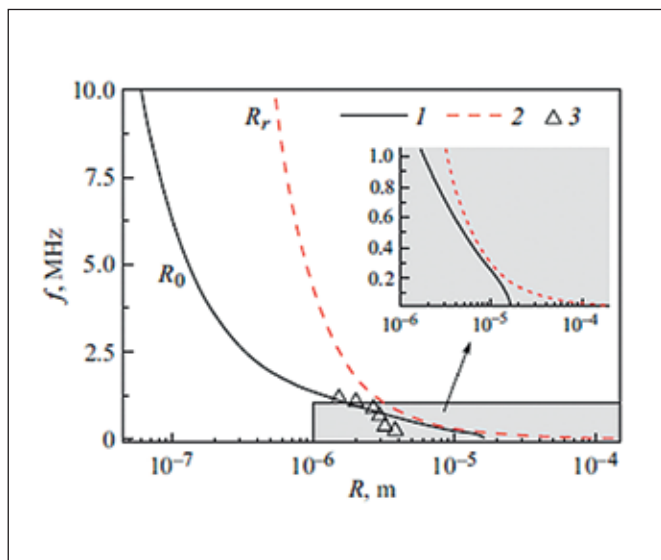


Рис.4. Зависимость между радиусами зародышей, которые могут участвовать в процессе начала кавитации, и частотой ультразвука

(проекция на направление взаимного движения),

$V_{\text{ист}}$ – скорость источника относительно среды распространения сигнала (проекция на направление взаимного движения), C – скорость распространения сигнала в среде.

Скорость распространения акустического сигнала в морской воде изменяется от 1440 до 1520 м/с [4], что значительно меньше скорости распространения радиосигнала. По этой причине воздействие эффекта Доплера в гидроакустическом канале будет проявляться даже на весьма малых скоростях движения источника и приемника сигналов. Максимальный перепад скорости распространения акустического сигнала, вызванный колебаниями плотности в толще воды, составляет примерно 5%, что будет определять нестабильный характер проявления эффекта Доплера.

В радиоканалах в качестве основного и часто единственного фактора влияния эффекта Доплера рассматривалось так называемое доплеровское смещение спектра сигнала, то есть его смещение по шкале частот относительно положения спектра сигнала источника [8].

Для компенсации влияния доплеровского смещения спектра на процесс приема сигнала обычно используются два метода:

- фазовая автоподстройка частоты задающего генератора приемника по частоте принимаемого сигнала;
- управляемое гетеродинирование принимаемого сигнала, обычно реализуемое его умножением на комплексную экспоненту разности частот генератора приемника и частоты принимаемого сигнала.

Развитие средств гидроакустической техники выявило еще одно проявление эффекта Доплера: деформацию спектра передаваемого сигнала, выражающуюся в его уширении или сужении, и также пропорционально его ширине [8]. Деформация спектра сигнала, передаваемого от источника к приемнику при условии их взаимного перемещения, определяется разной степенью воздействия эффекта Доплера на отдельные спектральные составляющие пропорционально значению частоты.

Представленные положения иллюстрируют два важных факта.

Во-первых, деструкция спектра зависит только от значения ширины полосы спектра передаваемого сигнала и значений скорости его источника и приемника и не зависит от конкретного диапазона частот, в котором эффект Доплера проявляется.

Во-вторых, проблема деформации спектра не решается методом его простого переноса (гетеродинированием).

Более того, проблема компенсации доплеровской деформации спектра усугубляется изменением шкалы времени принятого сигнала по отношению к переданному в соответствии с релятивистской теорией таким образом, что отрезок сигнала, переданный за время T , в точке приема изменит длительность обратно пропорционально изменению ширины полосы.

Таким образом, степень проявления эффекта Доплера будет пропорциональна скорости передачи сигнала по гидроакустическому каналу.

Сигнально-кодовые конструкции

Ограниченность энергетики в совокупности с повышенным уровнем шумового фона, особенно в приповерхностных слоях, в значительной степени снижает эффективность и перспективы использования спектрально эффективных многоуровневых методов модуляции как средства повышения пропускной способности гидроакустических каналов за счет экономии спектра. Резкая зависимость затухания акустических сигналов в гидроакустических каналах от частоты в совокупности с рассмотренными кавитационными ограничениями будет затруднять

достижения потенциальной пропускной способности в широкополосных каналах при использовании широкополосных сигнально-кодовых конструкций вследствие неэффективности традиционной меры предкоррекции частотной характеристики затухания на передающей стороне в связи с разной допустимой мощностью передачи на краях частотного диапазона.

Эффект Доплера будет влиять на передачу сигналов в тем большей степени, чем шире полоса передаваемого сигнала и скорость передачи.

Представляется более целесообразным использование многочастотных модемов с реализацией максимальной пропускной способности в каждой полосе в соответствии с имеющимися возможностями. Так, в [9] приводятся результаты использования модуляции OFDM с низкоплотным исправляющим алгоритмом LDPC в гидроакустической системе. Оптимизация частотного разбиения с целью обеспечения максимально возможной пропускной способности будет в этом случае определяться конкретным приложением; эта задача выходит за пределы настоящей работы.

Нестационарность

При заданных энергетике, частотном ресурсе и шумовом фоне доминирующим фактором, определяющим вероятность ошибки передачи гидроакустического сигнала на мелководье, оказывается нестационарность передаточной характеристики [4, 10, 11], вызванная интерференцией сигнала, распространяющегося по прямому пути, с сигналом (сигналами), отраженным (ми) от водной поверхности при непрерывно меняющихся амплитудных и временных соотношениях между ними. Вопросы компенсации влияния нестационарности гидроакустического канала на передачу сигнала подробно рассмотрены в [10, 11, 12].

Выводы

С учетом результатов проведенного анализа представляется допустимым сформулировать следующие рекомендации по разработке модемов систем гидроакустической связи на мелководье.

1. При расчете энергетического бюджета канала мощность передатчика должна определяться исходя из предельно допустимого значения плотности потока мощности акустического сигнала, превышение которого приводит к кавитационным явлениям, нарушающим процесс передачи.
2. Использование направляющих систем в системах гидроакустической связи может быть эффективно только для экономии энергии передатчика; оно не даст возможности преодоления кавитационного ограничения.
3. Коррекция амплитудно-частотной характеристики тракта введением предискажений на передаче не обеспечит положительного эффекта на высоких уровнях передачи вследствие усугубления кавитационной ситуации.
4. Степень проявления эффекта Доплера в виде деформации спектра сигнала будет пропорциональна скорости передачи по гидроакустическому каналу.
5. При выборе вида сигнально-кодовой конструкции представляется целесообразным использование многочастотных модемов с реализацией максимальной пропускной способности в каждой полосе в соответствии с имеющимися возможностями.
6. Нестационарность передаточной характеристики остается доминирующим фактором, определяющим вероятность ошибки передачи гидроакустического сигнала на мелководье.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Фокин Г.А.** и др. Акустические и вихревые поля в водосодержащих системах. Пенза: ПГУАС, 2013. 260 с.
2. **Смирнов И.В., Михайлова Н.В., Якупов Б.А., Волков Г.А.** Анализ пороговых параметров начала акустической кавитации жидкости в зависимости от частоты ультразвукового поля, гидростатического давления и температуры // Журнал технической физики. 2021. Т. 91. Вып. 11.
3. **Промтов М.А.** Кавитация. Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2006.
4. **Макаров А.И., Дворников В.Д., Конопелько В.К.** Передача информации в гидроакустическом канале // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2004. № 2.
5. **Thanh Nguyen T., Asakura Y., Koda S., Yasuda K.** Dependence of cavitation, chemical effect, and mechanical effect thresholds on ultrasonic frequency [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/316529297_Dependence_of_Cavitation_Chemical_Effect_and_Mechanical_Effect_Thresholds_on_Ultrasonic_Frequency (дата обращения 25.06.2025).
6. **Spöner J.** Dependence of the cavitation threshold on the ultrasonic frequency // Czechoslovak Journal of Physics 1990. Vol. 40. PP. 1123–1132.
7. **Brotchie A., Grieser F., Ashokkumar M.** Effect of Power and Frequency on Bubble-Size Distributions in Acoustic Cavitation Phys. Rev. Lett. 2009. Vol. 102. No. 8. P. 084302.

8. **Шаврин С.С., Липатов А.А., Мусатова О.Ю.** Динамика деформации сигнала, вызванной эффектом Доплера, в низкоорбитальных спутниковых системах // Электросвязь. 2022. № 11. С. 34–40.
9. **Унру П.П., Стаценко Л.Г., Родионов А.Ю.** Адаптивный подход к помехоустойчивому кодированию с малой плотностью проверок на четность в гидроакустических системах связи // Вестник инженерной школы ДВФУ. 2022. № 2 (51). С. 69–80.
10. **Малахов И.М., Шаврин С.С.** Анализ импульсных характеристик Watermark Benchmark для моделирования подводных акустических каналов связи // Электросвязь. 2025. № 3. С. 50–55.
11. **Dushin S.V., Shavrin S.S., Kurov I.Y., Aleshin V.S., Farkhadov M.P.** Multicarrier modulation schemes efficiency investigation in swallow water hydroacoustic communication application // 2020 International Conference on Engineering and Telecommunication (En&T), Proceedings. 2020. 9431262.
12. **Dushin S.V., Malakhov I.M., Kurov I.Y., Shavrin S.S.** Adaptive Equalization Algorithms Efficiency Investigations in Hydroacoustic Communication Applications with FBMC Modulation // 2021 Systems of signals generating and processing in the field of on board communications. IEEE Conference No 51389. DSPA.

ПАК "Боцман Клик" включен в Репозиторий ИТ-решений для финансовой отрасли

Программно-аппаратный комплекс "Боцман Клик", разработанный компанией SMART technologies SOFT, включен в Репозиторий ИТ-решений для финансовой отрасли (Репозиторий АФТ). Это решение успешно прошло испытания в ряде крупных компаний и подтвердило свою эффективность в задачах анализа транзакций и борьбы с мошенничеством в реальном времени.

ПАК "Боцман Клик" (регистрационный номер АФТ1067) – это коробочный продукт, предназначенный для автоматизации управления высоконагруженными базами данных, построения аналитических витрин и мониторинга в критически важных ИТ-системах. ПАК "Боцман Клик" включен в реестр отечественного ПО (запись от 13.11.2023 № 19999). Он основан на платформе контейнеризации "Боцман", входящей в экосистему продуктов Группы "Астра", которая включает инструменты управления ресурсами, применения политик информационной безопасности, а также поддержки задач ИИ и ML на уровне инфраструктуры.

Одним из ключевых направлений применения комплекса стало обнаружение мошеннических транзакций. В условиях резкого роста числа цифровых платежей и онлайн-операций эффективность антифрод-систем становится критически важной для банков, платежных систем, маркетплейсов и телеком-операторов. ПАК "Боцман Клик" ориентирован на решение этой задачи в реальном времени – с минимальными задержками и высокой точностью.

Архитектурная основа комплекса – высокопроизводительная колоночная СУБД ClickHouse разработки Яндекса, которая обеспечивает скорость обработки миллионов строк за миллисекунды и идеально подходит для анализа временных рядов. Интеллектуальный слой управления и автоматизации, реализованный в ПАК "Боцман Клик", оптимизирует развертывание, настройку, масштабирование и обеспечение безопасности СУБД ClickHouse, требующих значительных усилий при самостоятельном внедрении. Функциональность комплекса также включает потоковую обработку информации через Kafka и RabbitMQ, интеграцию с системами мониторинга и аналитики.

Для проверки эффективности решения команда SMART technologies SOFT провела тестирование ПАК "Боцман Клик" в условиях, максимально приближенных к промышленной эксплуатации. В ходе тестов был задействован кластер из 10 серверов YADRO с 512 ГБ ОЗУ и SSD-хранилищем, в качестве аналитической СУБД использовалась ClickHouse с настроенными индексами, а управление осуществлялось через платформу "Боцман". В тестовом контуре обрабатывались более 500 млн транзакций, сгенерированных по типовым сценариям финансовой деятельности.

Результаты оказались впечатляющими. Среднее время обработки одного запроса составило 50 мс, а 98% транзакций анализировались менее чем за 100 мс. Пропускная способность достигла 5 млн транзакций в секунду. Внедрение ансамблевых моделей машинного обучения, включая градиентный бустинг и ней-

росети, позволило повысить точность детекции подозрительных операций на 32% и снизить количество ложных срабатываний на 45%.

С экономической точки зрения ПАК "Боцман Клик" также показал себя эффективно: автоматизация процессов управления базой данных позволила сократить операционные расходы на 30% по сравнению с классическим подходом к эксплуатации ClickHouse. Инфраструктура легко масштабируется под нагрузку без сложных перенастроек, а интеграция с SIEM-системами дает возможность централизованного мониторинга угроз.

"Современные банковские системы требуют высокой скорости и стабильности – даже миллисекундные задержки могут привести к потере клиентов или финансов. Мы доказали, что ПАК "Боцман Клик" справляется с этими вызовами", – отметил Олег Кот, член совета директоров SMART technologies.

"Включение ПАК в Репозиторий ИТ-решений – важный шаг в развитии отечественной технологической экосистемы. Такие решения позволяют финансовым организациям внедрять инновации быстрее и безопаснее", – подчеркнул Олег Моргун, руководитель управления развития технологий Ассоциации ФинТех (АФТ).

Решение SMART technologies SOFT демонстрирует, как современные технологии могут быть адаптированы под задачи цифровой трансформации и сыграть ключевую роль в построении устойчивой, гибкой и безопасной ИТ-инфраструктуры для финансового сектора и смежных отраслей.

По информации компании SMART technologies