

Новые технологии для повышения производительности морской сейсморазведки 3D

Дени Мужно, Анатолий Череповский, Николай Титков, SERCEL

Краткое содержание

Морская сейсморазведка с буксируемыми косами уже длительное время характеризуется высокой производительностью благодаря большому количеству кос (от 8 до 12 в большинстве случаев) и двум или нескольким источникам (работающим поочередно). В прошлом году наибольшая по площади приемная установка (8,8 кв. км), при морских исследованиях у побережья Бразилии, состояла из 12 кос длиной по 8 км при расстоянии между косами в 100 м. На сегодняшний день производительность сейсморазведочного судна определяется, в основном, внешними факторами, такими как волнение на море, течения, подвижные и неподвижные препятствия, конфигурация площади съемки (длина линий прохода судна). Соответственно, новые технологии разрабатывались с целью сокращения потерь времени, вызванных этими факторами. Новый аппаратно-методический комплекс (твёрдотельные буксируемые косы, контроль положения кос как по вертикали, так и по горизонтали, акустические сети, навигация и бининг в реальном времени) позволяет повысить производительность и снизить зависимость от перечисленных выше факторов. Теперь морские сейсморазведочные проекты можно выполнять значительно быстрее благодаря резкому сокращению дострелов (infill). Кроме того, новые технологии обеспечивают более высокое качество данных (более низкий уровень помех, расширение диапазона регистрируемых частот, более высокая плотность наблюдений, улучшение повторяемости), что повышает вероятность успешного сейсмомониторинга (4D).

Твёрдотельные буксируемые косы

Твёрдотельные буксируемые косы стали вытеснять обычные флюидонаполненные косы более 5 лет назад, когда ужесточились требования к качеству регистрируемых данных и экологической безопасности заборного геофизического оборудования. Некоторые компании-производители просто заменили флюид (изопар) на гель, но наиболее удачным решением оказалось использование полимерного наполнителя с расположением несущего троса в центре косы (Рис.1). Именно такая полностью твёрдотельная коса Sentinel позволила компании SERCEL занять доминирующее положение на рынке и поставить заказчикам 2900 км таких кос к концу 2010 года, что в 2,2 раза превышает продажи флюидонаполненных кос Fluid Seal (1300 км).



Рис. 1. Многослойное строение твёрдотельной буксируемой косы Sentinel. Гибкий несущий трос расположен в центре косы, в отличие от флюидонаполненных кос.

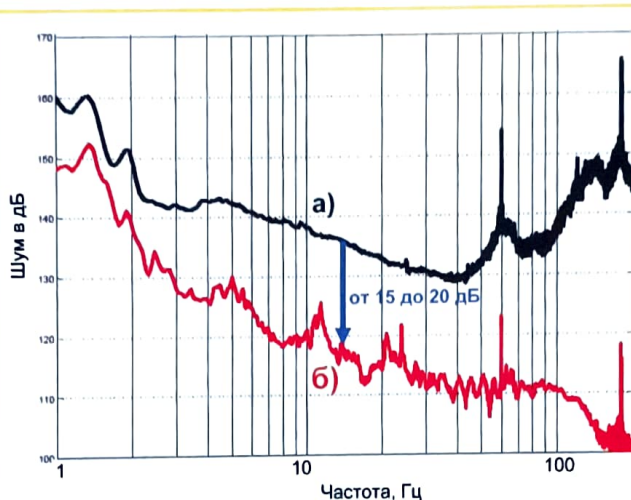


Рис. 2. Реакция геленаполненной (а) и твёрдотельной (б) кос на продольные ускорения в диапазоне частот от 1 до 200 Гц.

Полностью твёрдотельные косы имеют целый ряд хорошо известных преимуществ [2]. В первую очередь, это более низкий уровень шума благодаря отсутствию волн-помех, возникающих при движении флюида внутри секций косы. Твёрдотельные косы можно использовать в неблагоприятных погодных условиях, то есть при более сильном волнении на море, чем это возможно с флюидонаполненными косами. Они менее чувствительны к вибрации, создаваемой регуляторами глубины («птичками») и механическим буксирующим оборудованием [1]. При специальном сравнительном тестировании 150-метровых твёрдотельных и геленаполненных кос с 12 каналами было установлено, что твёрдотельные косы на 15-20 дБ менее чувствительны к вибрации (продольным ускорениям), чем геленаполненные косы, во всем диапазоне частот от 1 до 200 Гц (Рис.2). Это является результатом того, что гидрофоны

СЕЙСМОРАЗВЕДКА
НА МОРЕ И НА СУШЕ
МОРСКАЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКА



Рис.3. Запатентованный гибкий гидрофон, состоящий из 4 элементов во флюидонаполненных капсулах.

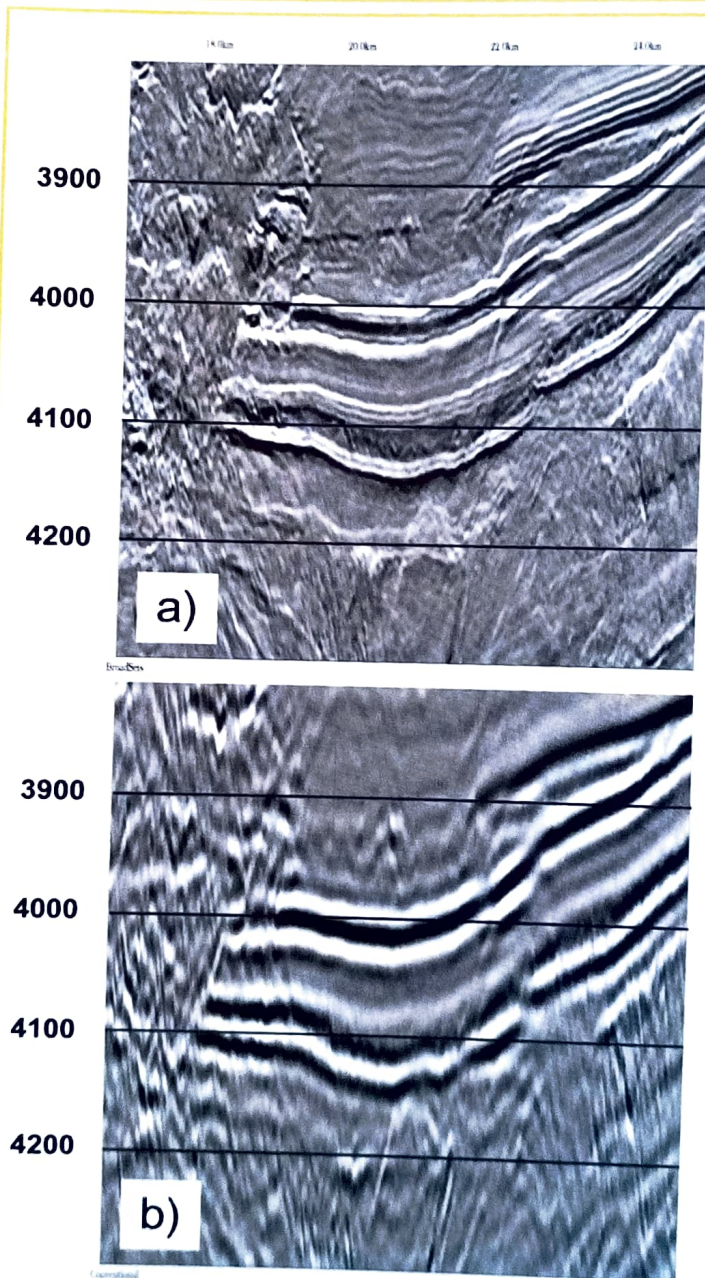


Рис.4. Временные разрезы из Мексиканского залива: а) с применением метода "BroadSeis"; б) с применением обычных методов морских исследований. При применении метода "BroadSeis" можно насчитать до 12 четких осей синфазности в 100-мс интервале записи.

твёрдотельной косы изолированы от несущего троса в отличие от гидрофонов флюидонаполненных и геленаполненных кос.

Отличные характеристики твёрдотельной косы Sentinel компании SERCEL - это отнюдь не случайность, а результат более чем 15 лет опытно-конструкторских работ. Были найдены те материалы и химические соединения, которые позволили обеспечить необходимые характеристики и разработаны специальные технологии. Высокий уровень автоматизации производства позволяет снизить стоимость твёрдотельной косы Sentinel и повысить её надёжность. Это наиболее прочная в отрасли буксируемая коса, имеющая диаметр чуть меньше 6 см. Её максимальная длина может достигать 15 км благодаря прочному несущему тросу, в состав которого входит арамидное волокно - более прочное, чем сталь, но гибкое.

Ключевой элемент для снижения шума обтекания (гидродинамического шума) и помех от вибрации косы - это запатентованный гидрофон. Он состоит из 4 чувствительных элементов, каждый из которых помещен во флюидонаполненную капсулу (Рис.3). Такая 4-элементная конструкция гидрофона подавляет помехи, вызываемые турбулентным течением морской воды. Эти чувствительные элементы достаточно гибкие для того, чтобы наматывать косу на барабан небольшого диаметра, и одновременно достаточно жесткие, чтобы избежать влияния вибрации несущего троса. Гидрофоны защищены полиуретановой трубкой толщиной 1,5 мм и эта трубка изнутри термически припаяна к внешней оболочке косы для обеспечения дополнительной защиты от проколов.

Известно, что твёрдотельные косы можно буксировать на меньших глубинах, что позволяет улучшить высокочастотный состав

записи. В то же время, чем больше глубина буксировки косы, тем лучше низкочастотный состав записи. Исходя из этого, компания CGGVeritas предложила уникальный метод, получивший название "BroadSeis". Для расширения спектра записи до 5-6 октав (в диапазоне от 2,5 до 150 Гц) с помощью метода "BroadSeis" не требуется дополнительного оборудования. Этот метод включает:

1) Буксировку косы с переменной глубиной для получения срезов в частотно-амплитудных характеристиках записи на разных частотах. Максимальная глубина буксировки достигает 50-60 м;

2) Запатентованные процедуры подавления волн-спутников и построения изображений среды с сохранением амплитуд.

В результате применения данного метода можно получить более компактный импульс, увеличенную глубину исследований и лучшую амплитудную инверсию. На Рис. 4 показан пример из Мексиканского залива, где максимальная глубина буксировки косы достигала 60 м. Источник был погружен на постоянную глубину 4,5 м. Разрешенность записи резко возросла на больших временах регистрации (порядка 4с двойного времени пробега) благодаря повышению верхней частоты спектра с 50 до 155 Гц (Рис. 5). Не менее важно и то, что спектр сигнала расширился в области низких частот до 2,5 Гц.

Контроль положения буксируемых кос

Управление положением буксируемых кос по горизонтали (с использованием навесных «птичек») стало возможным всего несколько лет назад. Эта возможность существенно повышает производительность морских работ. Это связано с тем, что зачастую наблюдается существенный снос буксируемых кос под действием морских течений, а «птички» помогают добиться параллельной буксировки кос и, как следствие, сократить объемы дострела. Кроме того, управление положением кос по горизонтали позволяет уменьшить радиус разворота судна при заходе на следующую полосу и буксировать косы ближе к неподвижным препятствиям. Наконец, применение «птичек» повышает повторяемость контрольных (периодических) съемок, то есть позволяет удерживать косы на той же самой траектории, что и при выполнении опорной съемки, даже если морские течения изменились.

Многофункциональный модуль Nautilus (Рис. 6) был специально разработан компанией SERCEL для совместного использования с твердотельной косой Sentinel и совмещает в себе три устройства, которые у конкурентов, как правило, выпускаются и функционируют отдельно:

- контроль глубины погружения буксируемых кос;
- контроль положения буксируемых кос по горизонтали;

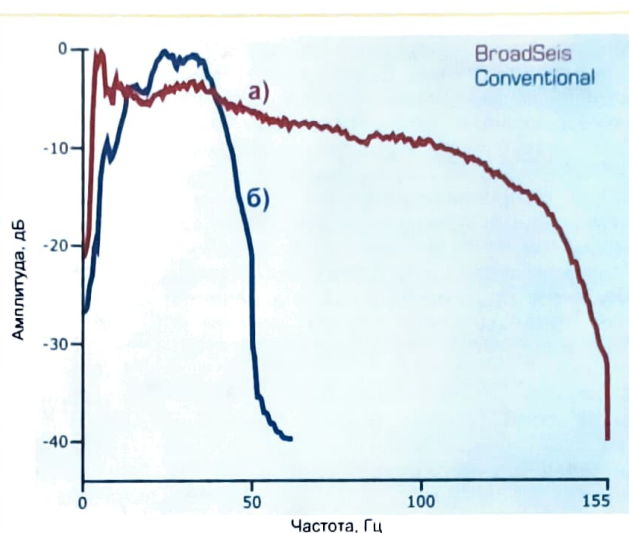


Рис. 5. Сравнение амплитудно-частотных спектров, полученных в Мексиканском заливе: а) при применении метода "BroadSeis"; б) при обычных морских исследованиях.

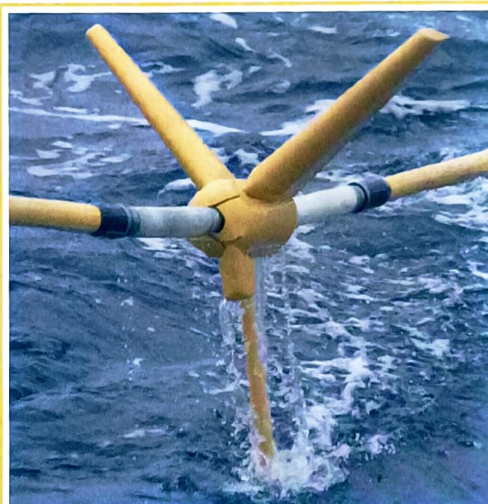


Рис. 6. Модуль Nautilus, выполняющий три функции: контроль глубины буксируемых кос; контроль их положения по латерали; акустическое позиционирование. Два верхних крыла подвижны, а нижнее крыло используется как руль.

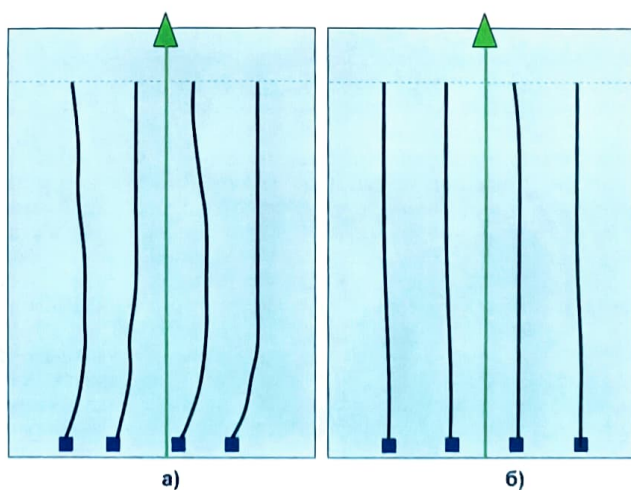


Рис. 7. Форма буксируемых кос при сильном морском течении: а) без модулей Nautilus; б) с модулями Nautilus через 20 минут после начала их работы

СЕЙСМОРАЗВЕДКА НА МОРЕ И НА СУШЕ МОРСКАЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКА

- акустические приёмопередатчики.

Модули Nautilus передают данные в программное обеспечение SeaPro Nav, предназначенное для определения местоположения в реальном времени. Это программное обеспечение применяется и для исследований с несколькими судами (подстрелы крупных препятствий, широкоазимутальные съемки) и интегрировано с программой SeaPro Bin для бининга в реальном времени. В случае работ с несколькими судами и проблем с радиосвязью между ними, система SEAL428 обеспечивает точную привязку сейсмических записей по GPS, что является важнейшим преимуществом.

Благодаря полной интеграции с твердотельной косой Sentinel, модулю Nautilus не нужен собственный аккумулятор – питание осуществляется через разъём на косе Sentinel. В типовом варианте модули Nautilus прикрепляются к этой твердотельной косе через каждые 300 м, а длительность установки и подключения одного модуля не превышает одной минуты. Приводящее усилие (steering force),

развиваемое модулем Nautilus, в 2-3 раза превышает возможности конкурирующих «птичек» и только модуль Nautilus позволяет реализовать описанный выше метод BroadSeis.

В мировой практике используются уже более 2500 таких «птичек», в том числе на 6 крупнейших сейсмозвездочных судах. Модуль Nautilus был применен при рекордных морских работах с управляемыми буксируемыми косами (12 штук по 8100 м). В море работало 360 модулей Nautilus, что позволило сократить объем дострелов (infill) с 25% до 8% благодаря более выдержанной форме буксирных кос. В результате проект был завершён на 3 недели раньше намеченного срока. На Рис. 7 показан пример эффективности модулей Nautilus в условиях сильных морских течений: косы принимают почти идеальную форму (изображение справа) через 20 минут после начала работы модулей Nautilus.

Дальнейшего повышения качества морских сейсмических данных можно добиться за счет повышения плотности наблюдений (меньше расстояние между буксируемыми косами), увеличения длины годографа (до 9 км при съёмках 3Д и 12 км при съёмках 2Д) и широкой азимутальности (до 20 буксирных кос на одном судне, многоазимутальные и широкоазимутальные съёмки с несколькими судами). Для выполнения таких съёмок требуются не только регистрирующие системы, способные управлять большим количеством каналов (до 1000 каналов в одной косе; до 10000 каналов в приёмной расстановке), но и обладающие избыточностью по питанию и телеметрии. Поскольку площадь приёмной расстановки всё время растёт, требуется более точное определение координат пунктов приёма, причем в реальном времени. Его обеспечивают акустические сети с транспондерами через каждые 300 м на каждой буксируемой косе. Чтобы обеспечить позиционирование в реальном времени для каждого пункта возбуждения (часто интервал составляет 10 с) с точностью, более высокой, чем размер бина, несколько тысяч элементов забортного оборудования должны быть тесно интегрированы. Такая

интеграция достигнута компанией SERCEL на основе хорошо себя зарекомендовавшей регистрирующей системы SEAL, используемой двумя третями морских партий по всему миру.

Пневмоисточники

Что касается источников сейсмических волн, то на данный момент в морской сейсмозвездке пневмопушки являются наиболее распространенным и высокопроизводительным типом источника. Пневмоисточники компании SERCEL представляют оптимальным выбором для проведения работ в любых условиях – как на открытой воде, так и в переходной зоне, а также в скважинах. Они полностью совместимы со всей стандартной периферийной аппаратурой – контроллерами (Big Shot, Long Shot и т.д.), лебедками, воздушными компрессорами, системами подвеса, амбилюяками (пневмо-электрическими магистральями).

Учитывая устойчивую тенден-

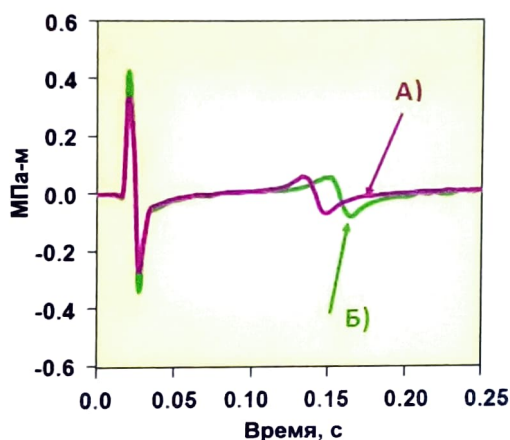


Рис.8. Сравнение сигнатур при рабочих давлениях 2000 (а) и 3000 (б) фунтов на кв. дюйм.

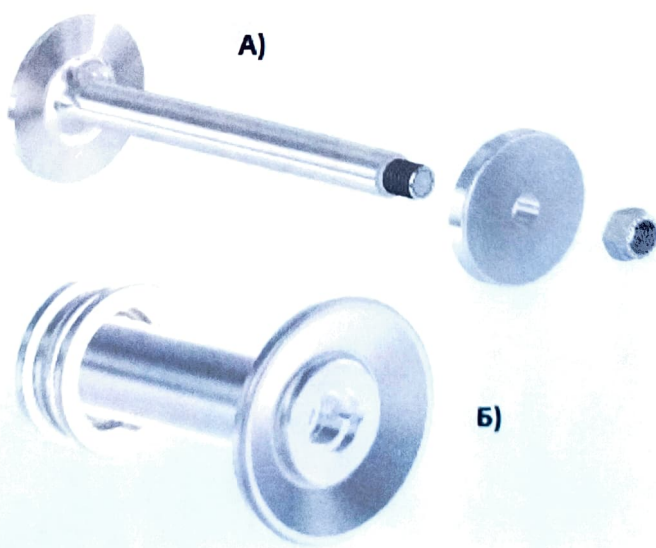


Рис.9. Цельный затвор пневмопушки G GUN II (Б) по сравнению с разборным затвором других производителей (А).

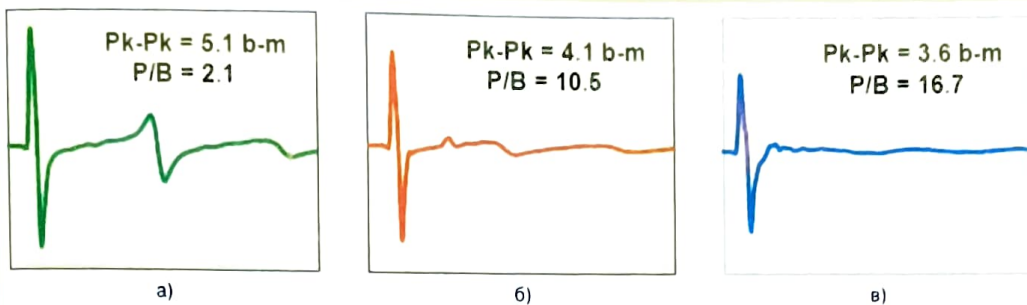


Рис. 10. Пример подавления пульсации воздушного пузыря тремя пневмопушками объемом 150 куб. дюймов каждая, при глубине 6 м и давлении 2000 psi: а) стандартная однокамерная пушка G GUN II, б) двоянная пушка GI GUN с камерами одинакового размера по 75 куб. дюймов; в) пушка GI GUN с камерами 45 и 105 куб. дюймов

цию к увеличению производительности морских работ, к источникам сейсмических волн предъявляются такие требования, как надежность, безотказность в работе и легкость в обслуживании. Одной из отличительных особенностей пневмопушек компании SERCEL является их вариативность: объем каждой пушки можно менять за счет использования специальных пластиковых вставок при неизменном внешнем корпусе, что позволяет значительно уменьшить затраты на обслуживание и ремонт.

Компания SERCEL выпускает два основных типа пневмоисточников.

- однокамерные пневмопушки G GUN II (объем от 12 до 520 куб. дюймов);
- двухкамерные пневмопушки GI GUN (объем от 15 до 250 куб. дюймов).

Запатентованная конструкция пневмопушек компании SERCEL позволяет им работать при давлении компрессора до 3000 psi (фунтов на кв. дюйм). Как видно на рис.8, при таком рабочем давлении существенно повышается двойная амплитуда (peak-to-peak) - до 27%, а низкочастотная составляющая спектра повышается более чем на 6 дБ.

Простые в обращении, пневмопушки G GUN II отличаются повышенной надежностью и позволяют производить до 500 000 выстрелов без дополнительного обслуживания, а меньший вес, по сравнению с пневмопушками аналогичных объемов других производителей, обеспечивает простоту в эксплуатации.

«Шаттл» (затвор) данной пневмопушки представляет собой единое целое, тогда как у других производителей его элементы крепятся при помощи резьбы (Рис.9). Отсутствие резьбовых соединений значительно увеличивает срок службы пневмопушки G GUN II и надежность её работы.

Специально для пневмопушек G GUN II был спроектирован и запатентован параллельный кластер. При его использовании две пневмопушки ведут себя как один источник (двойного объема), со значительным улучшением характеристик на низких частотах. Также его использование повышает износостойкость и безотказность как самих пневмопушек, так и периферийного оборудования (датчиков, кабелей, воздушной линии).

Пневмопушки семейства GI GUN – двухкамерные пневмопушки, в которой одна из камер является «генератором», а вторая «инжектором». Особенностью данной пневмопушки является дополнительный впрыск воздуха в уже созданный пузырь, чем достигается практически 100% подавление пульсации пузыря, а значит, улучшается качество сигналы. На рис.10 показан пример возбуждения

сигнала тремя пневмопушками объемом 150 куб. дюймов каждая. Тестирование проводилось при давлении 2000 пси (138 Бар), на глубине 6 м. В левой части рисунка показана сигнатура для стандартной однокамерной пневмопушки G GUN II, посередине – для двоянной пневмопушки GI GUN с камерами одинакового размера по 75 куб. дюймов («гармонический режим») и в правой части рисунка – для пушки GI GUN с камерами 45 и 105 куб. дюймов («оптимизированный режим»). Как видно из рисунка, в случае работы пушкой GI GUN в гармоническом режиме, за счет подавления пульсации воздушного пузыря, соотношение сигнал/шум (peak-to-bubble) повышается в 5 раз по сравнению с обычной однокамерной пневмопушкой. А при работе в «оптимизированном режиме» (камеры 45/105 куб. дюймов) оно улучшается еще более чем в полтора раза, обеспечивая практически линейную сигнатуру после первого пика.

Внутренний объем камеры GI GUN также может меняться за счет пластиковых вставок, что обеспечивает максимальную адаптацию к различным видам работ при наличии минимального количества пушек.

Заключение

Заказчикам морских сейсморазведочных работ требуются сейсмические данные всё более высокого качества, повышенная производительность и лучшая повторяемость съёмки. Эти цели можно достичь благодаря новым технологиям и аппаратно-методическим комплексам, обеспечивающим точное акустическое позиционирование, эффективный контроль глубины буксировки кос и их положения по горизонтали – например, с помощью модулей Nautilus. Существенное расширение спектра сигнала как в сторону низких, так и в сторону высоких частот, обеспечивается такими методическими приемами, как буксировка кос с переменной глубиной (метод "BroadSeis").

Качество изображения среды можно улучшить путем повышения плотности наблюдений, то есть за счет уменьшения расстояния между буксируемыми косами и расстояний до неподвижных и подвижных препятствий. Это возможно тогда, когда положение каждой секции буксируемых кос надежно контролируется.

Литература:

1. Dowle, R. and Maples, M., 2006. Solid streamer noise reduction principles. – SEG Expanded abstracts, vol 25.
2. Moldoveanu, Nick, 2006. Recent and future developments in marine acquisition technology: an unbiased opinion. – CSEG Recorder, Special edition.