

Пути совершенствования скважинной сейсмической аппаратуры

■ Шехтман Г. А., ООО «Геофизические системы данных», г. Москва

Введение

Более полувека прошло с момента появления вертикального сейсмического профилирования (ВСП), заменившего сейсмокаротаж и взявшего на себя решение его задач. Скважинная сейсмическая аппаратура для метода ВСП должна была существенно отличаться от аппаратуры для сейсмокаротажа.

Общим требованием для них оставалась лишь высокая термо- и баропрочность зондов при работах на больших глубинах. Однако переход от регистрации первых вступлений к регистрации волн в последующей записи сразу же в качестве неперемного условия поставил получение качественных записей, причем не только при регистрации вертикальных компонент. Дело в том, что одновременно с ВСП появился корреляционный сейсмический каротаж, задачей которого было определение скоростей распространения поперечных волн, причем при условии трехкомпонентной регистрации колебаний.

Обязательным условием получения качественных записей внутри среды является надежный контакт скважинных приборов со стенкой скважины. Именно с обеспечения такого контакта начался переход от сейсмокаротажа на продольных волнах, при котором определяли лишь время прихода прямой продольной волны, к ВСП, при котором объектом изучения является всё волновое поле, формирующееся внутри среды. Скважинные сейсмические приборы, снабженные различными прижимными устройствами, начали конструировать гораздо раньше. И как только их стали применять, появилась возможность регистрировать внутри среды неискаженные импульсы прямой волны и

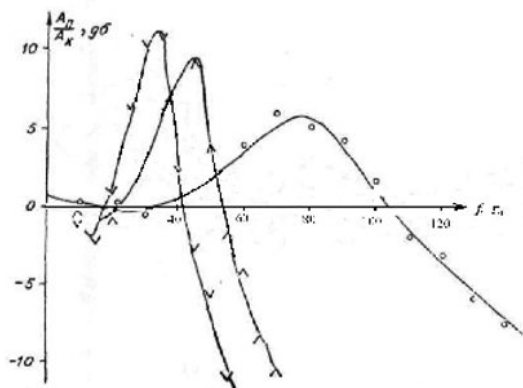
отраженных волн. Разработка трехкомпонентных скважинных приборов с прижимными устройствами позволила регистрировать в скважине поперечные волны [Жадин, 1960].

Условия неискаженной регистрации сейсмических колебаний в скважине

Наилучшие условия для приема упругих колебаний обеспечиваются при жестком контакте сейсмоприемника со стенкой скважины, так как при этом частота собственных колебаний на контакте находится далеко за пределами регистрируемого диапазона, в области высоких частот [Шехтман, Каплунов, 1974; Hardage, 2000].

Обеспечение силы прижима, на порядок превышающей вес снаряда, достигаемое путем использования достаточно жестких управляемых прижимных устройств, позволяет в современной скважинной аппаратуре добиться практически неискаженного приема упругих колебаний, направление смещения которых близко к направлению оси скважинного прибора. Однако в случае значительных углов подхода волн к скважинному прибору, а также при регистрации обменных и поперечных волн, условия их неискаженного приема существенно ужесточаются. Даже когда прижимное усилие на контакте прибора со стенкой скважины достаточно велико для предотвращения паразитных продольных колебаний снаряда, а также для ослабления натяжения кабеля, на котором висит зонд, остается опасность возникновения вращательных колебаний прибора, обусловленных наличием у него, кроме продольных его перемещений, еще одной степени свободы.

Искажения сигналов, регистрируемых горизонтальными сейсмоприемниками



▲ Рис. 1. Частотные характеристики скважинного сейсмоприемника СЭС-3, снятые по одному из горизонтальных сейсмоприемников в стационарном режиме. На графиках показано: V – один прижимной рычаг; Λ – два прижимных рычага, развернутые под углом; o – сила прижима увеличена в пять раз. Из статьи [Воронин, Жадин, 1964].

зонда, происходят из-за возникновения вращательных колебаний относительно линии касания корпуса прибора со стенкой скважины. Вращательные колебания прибора на контакте со стенкой скважины удавалось устранить посредством жесткого крепления к прибору двух вертикальных опор, позволяющих достичь контакта со стенкой скважины как минимум в трех рассредоточенных по окружности точках (конец прижимного рычага и еще две точки на ребрах опор) [Воронин, Жадин, 1964]. Применение двух прижимных рычагов, развернутых под углом, привело к увеличению частоты собственных колебаний скважинного сейсмоприемника в горизонтальной плоскости в полтора раза, а увеличение прижимного усилия в пять раз увеличило частоту собственных колебаний втрое (на рис. 1 приведены соответствующие фрагменты рисунка из данной статьи). Качественно близкие результаты, касающиеся природы паразитных вращательных колебаний скважинного прибора и способов их подавления, были получены позже за рубежом [Gaiser et al., 1988]. На

рис. 2 приведены убедительные результаты, подтверждающие полезность использования вертикальных опор (или аналогичных по действию жестких пластин) для подавления квазисинусоидальных помех, вызванных вращательными колебаниями корпуса скважинного прибора.



▲ Рис. 2. Сейсмограммы ВСП, полученные на вертикальной компоненте (а), на горизонтальной компоненте с одним прижимным рычагом (б) и на горизонтальной компоненте с прижимным рычагом и пластиной, жестко прикрепленной к корпусу прибора для подавления паразитных вращательных колебаний (в) (монтаж, составленный из статьи [Gaiser et al., 1988]).

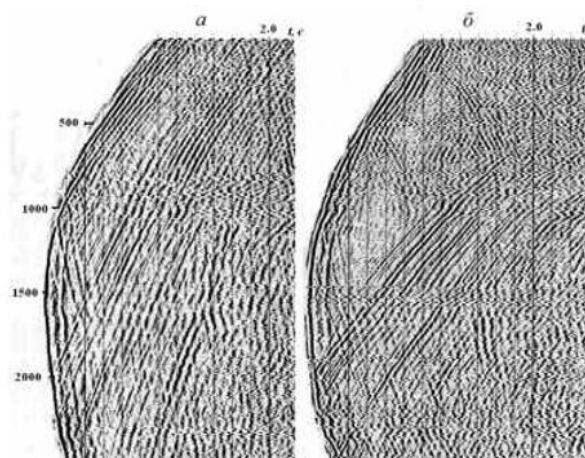
Применение жестких управляемых прижимов вместо ранее применявшихся рычагов пружинного и рессорного типа позволило избавиться от паразитных колебаний скважинных приборов в вертикальном направлении, поскольку сила прижима, на порядок превышающая вес скважинного прибора, обеспечивала требуемую величину кулоновского трения, предотвращавшего относительные перемещения скважинного прибора и стенки скважины. Кроме того, при этом практически подавлялись такие помехи технического характера, как гидрволны [Шехтман, Каплунов, 1974]. Однако сейсмические записи на горизонтальных компонентах зонда нередко оказывались зашумленными из-за паразитных вращательных колебаний. Введение



▲ Рис. 3. Прижимной блок скважинного сейсмического прибора с двумя управляемыми электромеханическими прижимами, развернутыми под углом.

дополнительного, так же жесткого прижимного рычага, развернутого под углом, оказалось достаточно эффективным [Шехтман и др., 1984].

Прижимной блок скважинного сейсмического прибора с управляемым электромеханическим прижимом и двумя прижимными рычагами, развернутыми под углом, показан на рис. 3. В прижимном блоке, показанном на этом рисунке, реализовано и другое усовершенствование, предназначенное для повышения его надежности при работе в условиях высоких давлений [Шехтман, Курасов, 1991]. Суть его состоит в том, что крутящий момент от электропривода передается прижимному рычагу посредством не штока, а вала, оба конца которого расположены в герметизированном от внешнего давления корпусе. При этом средняя часть вала соединена с рычагами при помощи разрезной гайки. В данном устройстве исключено перемещение уплотнительных колец в процессе управления прижимными рычагами, что наблюдалось ранее и, к сожалению, имеет место и по сей день. В результате



▲ Рис. 4. Сейсмограммы ВСП, полученные на вертикальной (а) и горизонтальной (б) компонентах скважинным прибором с двумя рычагами, развернутыми под углом.

надежность устройства в условиях высоких давлений повышается.

На рис. 4 приведены сейсмограммы ВСП, полученные скважинным прибором, содержащим два прижимных рычага, развернутых под углом. Можно видеть, что на записях горизонтального сейсмоприемника практически отсутствуют квазисинусоидальные технические помехи, обусловленные паразитными колебаниями прибора в горизонтальной плоскости.

Работы в направлении усовершенствования конструкции скважинных приборов в части улучшения контакта со стенками скважины продолжают. Одним из направлений таких исследований является устранение противоречий между миниатюризацией скважинных приборов и ухудшающимися при этом условиями их контакта со средой. Дело в том, что качество этого контакта зависит непосредственно от площади контакта: при малом диаметре скважинного прибора площадь его контакта со стенкой скважины невелика. Это приводит к тому, что резонансная частота паразитных колебаний на контакте прибор-стенка скважины, величина которой

пропорциональна квадратному корню площади этого контакта, может попасть в рабочий диапазон сейсмических частот [Beydoun, 1984]. Ситуация при этом является противоречивой, т.к. диаметр прибора и его массу стремятся сделать минимальными именно для того, чтобы собственная частота колебаний прибора находилась вне рабочей полосы частот. В одном из недавно предложенных технических решений это противоречие устраняется путем жесткого крепления к скважинным приборам башмаков, наружный диаметр которых близок к внутреннему диаметру скважины [Шехтман и др., 2010]. Дополнительное крепление к таким башмакам ребер жесткости, предотвращающих паразитные вращательные колебания скважинного прибора, оказывается более эффективным, чем их крепление непосредственно к корпусу прибора. Гораздо более простым и не менее надежным решением видится жесткое крепление к скважинным приборам тонких, но достаточно жестких, пластин с возможностью их изгибания под действием прижимного усилия [Шехтман, Касимов, 2012]. Такие пластины, ширина которых соизмерима с диаметром скважины, вполне компенсируют ухудшение контакта скважинных

приборов со стенками скважины при миниатюризации аппаратуры.

Выбор датчиков и типы трехкомпонентных установок

При выборе датчиков для аппаратуры ВСП первостепенное значение имеет их пороговая чувствительность, которая определяется совокупностью помех, существующих в данных конкретных условиях. Помехи эти могут зависеть от совокупных шумов аппаратуры (нижний предел), а также от качества прижимов приборов зонда к стенке скважины, конструкции скважины и ее технического состояния.

В качестве датчиков в аппаратуре ВСП используют электродинамические сейсмоприемники (геофоны, или велосиметры) и акселерометры. Использование микро-электро-механических систем (МЭМС), позволяющих осуществлять автоматический пересчет регистрируемых компонент к вертикали, весьма перспективно в методе ВСП в связи с тем, что во всем мире в нем полностью перешли на трехкомпонентную регистрацию.

Сведения о параметрах некоторых геофонов и акселерометров, широко применяемых в аппаратуре ВСП, приведены ниже в таблице [Виноградов, Чигрин, 2006]:

▼ Табл. 1.

Тип датчика	Обозначение	Напряжение шума в полосе 10 -250 Гц, нВ	Коэффициент преобразования (В/м/с или В/м/с ²)	Пороговая чувствительность на частоте 31.5 Гц, 10 ⁻¹² м
Геофон	GS-20DX (200°C)	32.5	25	6.5
- " -	GMT-12.5	50.1	22	11.4
- " -	OMNI-2400	90	43.3	10/4
- " -	SMC-1850	86.6	40	10.8
- " -	GS-20DM	33.6	19.7	8.5
Акселерометр	DSU-3(MEMS)	-	-	230
- " -	M86	540	1	13.7

Из таблицы видно, что чувствительность геофонов выше, чем акселерометров. Наибольшая чувствительность отмечена у геофонов GS-20DX и GS-20DM. Пороговая чувствительность акселерометра M86 гораздо выше, чем DSU-3, но из-за больших габаритов (диаметр 65 мм, длина 73 мм) его нельзя использовать в скважинных приборах малого диаметра.

Датчики, обладающие минимальной пороговой чувствительностью, в наибольшей степени подходят для аппаратуры ВСП, поскольку они позволяют отрабатывать скважину при меньшей мощности источника колебаний. При работе малоканальными зондами, когда число воздействий с фиксированного ПВ велико, это дает возможность обеспечить более высокую стабильность возбуждаемого сигнала, а также сохранность окружающей среды. Существенно, что, по расчетам авторов приведенной выше таблицы, электронная схема скважинного прибора и механическая часть его конструкции вносят примерно одинаковый вклад в формирование его итоговой пороговой чувствительности.

В скважинных приборах применяют два типа установок: XYZ и симметричную (она, так же, как и установка XYZ, содержат тройку взаимно перпендикулярных датчиков, но расположены они симметрично относительно оси скважинного прибора под углом 54.74° к ней).

На начальных этапах развития метода ВСП для симметричных установок (за рубежом они получили название «установки Гальперина») перед работами в скважине подбирали датчики, способные устойчиво работать в наклонном положении. Однако это не гарантировало их работоспособность при проведении ВСП в наклонных скважинах. Низкочастотные датчики, отличающиеся большей чувствительностью, в наклон-

ном положении могли залипать, т.к. их рабочее положение допускало наклоны не более 10 градусов. В настоящее время выпускаемые промышленностью «все-направленные» датчики допускают их использование практически в любой трехкомпонентной установке. Еще одно достоинство симметричных расстановок состоит в том, что расположение датчиков в наклонном положении позволяет уменьшить диаметр скважинного прибора. В наземной сейсморазведке «установки Гальперина» высоко оценивают за то, что каждая из трех наклонных компонент имеет одинаковую характеристику [Heath, 2007].

Преобразование трехкомпонентной записи, полученной симметричной установкой, в более привычную локальную систему координат xuz сводится к использованию при расчетах матрицы вращения, элементы которой являются направляющими косинусами соответствующих осей координат установки xuz в системе координат симметричной установки. В матричной форме такое преобразование имеет следующий вид:

$$\begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A(t) \\ B(t) \\ C(t) \end{pmatrix}$$

где $A(t)$, $B(t)$ и $C(t)$ – компоненты исходной записи, полученной симметричной установкой.

В новой системе координат ось z расположена вдоль оси прибора (нижняя строка матрицы составлена из направляющих косинусов этой оси в симметричной системе координат); ось y выбрана ортогонально оси A симметричной системы координат (поэтому проекция вектора A на ось y равна нулю, а направляющие косинусы оси y с осями B и C равны по величине и противоположны

по знаку); ось x расположена в плоскости, проходящей через ось скважинного прибора (ось z) и ось A симметричной установки.

В том случае, когда скважинный прибор находится в наклонном положении (если, к примеру, скважина искривлена), и азимут x -компоненты известен по данным гироскопических или инклинометрических наблюдений, то знание углов наклона α , β и γ осей x , y и z , соответственно, к вертикали позволяет учесть эти углы и пересчитать записи компонент $x(t)$, $y(t)$ и $z(t)$ в компоненты $X(t)$, $Y(t)$ и $Z(t)$ системы координат XYZ с вертикальной осью Z . Тем самым удастся сразу же более уверенно разделить волны по соответствующим компонентам. К примеру, поперечные волны типа SH после учета наклона скважинного прибора уже не будут регистрироваться на вертикальной компоненте системы XYZ . Углы наклона α , β и γ с вертикалью могут быть измерены МЭМС-акселерометрами, чувствительными в области нулевой частоты к земной гравитации. В матричной форме преобразование записей из системы координат xyz в систему координат XYZ имеет следующий вид [Li, Ronen, 2005]:

$$\begin{pmatrix} X(t) \\ Y(t) \\ Z(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \alpha & -\frac{\cos \alpha \cos \beta}{\sin \alpha} & -\frac{\cos \alpha \cos \gamma}{\sin \alpha} \\ 0 & \frac{\cos \gamma}{\sin \alpha} & -\frac{\cos \beta}{\sin \alpha} \\ \cos \alpha & \cos \beta & \cos \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix}$$

Ориентирующие устройства

Работы по созданию трехкомпонентной скважинной аппаратуры с ориентированными по азимуту сейсмоприемниками ведутся давно.

Первый в мире скважинный прибор с принудительной гироскопической ориентацией, сыгравший большую роль в становлении многоволнового ВСП, был разработан во ВНИИГеофизике [Виногра-

дов, 1967]. Регистрацию колебаний в этом приборе осуществляют трехкомпонентной установкой типа XYZ , которая имеет возможность поворачиваться внутри герметичного корпуса относительно его оси, что позволяет ориентировать установку в любом требуемом азимуте. Для работы в необсаженных скважинах тогда же на макетном уровне разрабатывали устройства, использующие магнитное поле Земли. Гироскопический или магнитный блок ориентации со следящим приводом позволяет на каждой точке наблюдений определять азимут ориентировки датчиков в пространстве и принудительную дистанционную ориентацию каждого датчика в заданном направлении.

К концу 80-х годов совместными усилиями ИГиГ СО АН СССР, трестом «Сибнефтегеофизика» и СибКБ НПО «Нефтегеофизика» был разработан многоточечный трехкомпонентный зонд с цифровой системой преобразования и передачи сейсмической информации по кабелю [Лебедев, Болотов и др., 1987]. Отличительной особенностью этой аппаратуры является магистрально-модульный принцип ее построения и программный способ управления работой отдельных блоков зонда ВСП с помощью встроенного микропроцессора. Это позволило унифицировать систему связей в зонде, обеспечить гибкость перестройки аппаратуры при изменении ее функций и модернизации отдельных узлов, а также автоматизировать управление работой скважинных приборов и повысить надежность аппаратуры путем диагностирования ее текущего состояния и исключения ошибок оператора. Аппаратура состоит из наземной и скважинной частей, соединенных между собой трехжильным кабелем. Каждый из приборов зонда состоит из блока преоб-

разований, электромеханического прижима и блока ориентации с входящим в него трехкомпонентным блоком сейсмоприемников. Наземная часть аппаратуры состоит из блока управления и блока питания. Блок управления обеспечивает формирование команд управления скважинными приборами, индикацию текущего состояния их узлов, прием и передачу цифровой информации по кабелю, а также преобразование цифровых данных, поступающих из скважинных приборов, в аналоговую форму. Погрешность ориентации скважинных приборов в данной аппаратуре не превышает $\pm 5^\circ$.

Функционально наиболее совершенным является, по мнению разработчиков, шестиприборный трехкомпонентный зонд МОСТ с принудительной гироскопической ориентацией [Лебедев, Суздальницкий и др., 1987]. Для определения азимута ориентировки датчиков в пространстве и принудительной дистанционной установки их в заданном направлении служит блок ориентации. Блок состоит из системы гиросtabilизации на основе свободного гироскопа и сельсинной системы дистанционной передачи угла, передающей на земную поверхность информацию о положении прибора и точке наблюдения, а также следящего исполнительного механизма, который по командам наземного блока ориентирует трехкомпонентную установку в заданном азимуте.

На базе аппаратуры МОСТ теми же разработчиками были предложены: многоприборный ориентированный трехкомпонентный скважинный зонд с цифровой системой управления и передачи данных; скважинный трехкомпонентный зонд с магнитной ориентацией (СТО-М) и трехкомпонентный зонд с взаимной ориентацией скважинных

приборов и передач информации посредством время-импульсной модуляции (ВИМ).

В скважинном приборе СТО-М с ориентацией сейсмоприемников по магнитному полю Земли система ориентации выполнена на основе феррозондового дифференциального датчика, который служит нуль-органом магнитного поля Земли, и для исключения влияния вертикальной составляющей поля находится в маятниковом подвесе. В приборе использована импульсная следящая система с электродвигателем, который устанавливает ось датчика в направлении запад-восток. Блок сейсмоприемников перед работой на скважине может быть установлен на заданный угол относительно оси феррозондового датчика и во время отработки скважины сохраняет заданный азимут. Чувствительность следящей системы ориентации не превышает $\pm 1^\circ$, а погрешность ориентации не превышает 5° . Аппаратура снабжена схемой проверки идентичности сейсмических каналов на собственный процесс [Иванов, Шехтман, 1980].

Ряд недостатков, присущих устройствам с принудительной ориентацией (главный из них – сложность конструкции), заставлял отказаться от ориентирования установки непосредственно в скважине и ограничиться только определением ее фактического положения, а сами ориентированные записи получать на дневной поверхности с применением специального электронного ориентатора [Гальперин, 1977]. Приборы без принудительной ориентации проще по конструкции, чем приборы с принудительной ориентацией. При этом записи, полученные трехкомпонентной установкой, можно путем простых линейных преобразований перевести в записи, которые идентичны записям, получен-

ным при использовании принудительной ориентации.

Способы передачи сигналов на поверхность и технические характеристики современных зондов ВСП

В аппаратуре ВСП применяются системы связи с преобразованием спектра частот сигналов и без преобразования.

Системой связи без преобразования спектра частот называют систему с проводным разделением каналов, в которой сигналы от сейсмоприемников поступают в линию связи (геофизический кабель) без модуляции (без изменения спектра), а системой связи с преобразованием спектра частот – систему с модуляцией.

На начальных этапах развития метода ВСП, когда трехкомпонентные зонды ВСП были преимущественно одноточечными, семижильного кабеля вполне хватало для неискаженной передачи сейсмических сигналов на земную поверхность.

и частотный диапазоны, а также линейность преобразования сигналов.

Первый в России цифровой трехкомпонентный зонд ВСП создавался в 1983-1996 г.г. в НИИМоргеофизике (аппаратура «Вектор-1»). Эта аппаратура была положена в основу разработанного в 1997-2008 г.г. в ООО «Ингеосейс» 24-канального цифрового 6-точечного зонда «Вектор-2».

В каждом приборе этого зонда, снабженном электромеханическим прижимом (усилие прижима в 8-10 раз превышает вес прибора), размещается трехкомпонентная симметричная установка с четвертым контрольным вертикальным прибором, причем все 4 электродинамические сейсмоприемника – типа СВ2-10ЦТ. Технические характеристики аппаратуры «Вертикаль» таковы [Мирзоян, 2010]:

Динамический диапазон регистрации, дБ, не менее	150
Рабочий диапазон частот (АЧХ) сквозного тракта, Гц	5-250
Уровень шумов, приведенных ко входу аналого-цифрового тракта, мкВ, не более	0.1
Шаг квантования, мс	1
Количество разрядов преобразования	24
Скорость передачи по кабелю, кбит	260
Неидентичность аналого-цифрового тракта, %	0.15
Диапазон рабочих температур °С	-10 + 120
Гидростатическое давление, МПа	110
Масса одного сейсмического модуля в сборе, кг, не более	15
Диаметр исследуемых скважин, мм	108-350

Из разработок зондов ВСП с преобразованием спектра частот наибольший интерес со временем стала представлять многоканальная система с разделением каналов во времени и время-импульсной модуляцией (ВИМ). Эта система, не утратившая актуальности и в настоящее время, позволила создать зонд с высокой надежностью и малыми габаритами приборов, причем с передачей информации по одно- и трехжильному бронированному кабелю [Карус и др., 1976]. Она обеспечивает необходимые для скважинной сейсморазведки динамический

и других отечественных цифровых трехкомпонентных зондов, разработанных в 90-е годы, стоит указать трехточечный зонд АМК-ВСП, разработанный совместно организациями ОАО НПП «ВНИИГИС», ЗАО НПФ «ГИТАС» и ЗАО НПФ «СейсмоСет Сервис» (г. Октябрьский, Республика Башкортостан). В дальнейшем этими же организациями была разработана аппаратура АМЦ-ВСП-3-48, получившая наибольшее распространение в России и ближнем зарубежье.

Сравнительные испытания отечественных зондов ВСП, разработанных в 90-

х годах, позволили определить их достоинства и недостатки, а также наметить пути их дальнейшего совершенствования [Воцалевский и др., 1998]. На момент этих испытаний было установлено, что по термостойкости отечественные зонды явно уступают зарубежным [Гальперин, 1994], однако в среднем меньшие значения таких важных механических параметров, как длина и масса прибора, способствуют более устойчивому по отношению к помехам приему колебаний. Сравнение зондов проводилось по

скорость не удовлетворяла требованиям уровневого ВСП с многократными наблюдениями на фиксированных глубинах приема. Общий вывод, касавшийся четырех представленных к испытаниям трехкомпонентных зондов ВСП, состоял в том, что необходимо очень осторожно оценивать возможности их использования при решении тонких динамических задач метода ВСП.

Технические характеристики выпускаемой в настоящее время аппаратуры АМЦ-ВСП таковы [Ленский и др., 2012]:

Число приемных модулей в зонде	не более 30
Конструкция узла сейсμοприемников	трехкомпонентная ортогональная
Тип применяемых сейсμοприемников	OMNI-15 Гц (всенаправленные)
Максимальная длина трассы для каждого канала в одном цикле измерений	16 000 выборок
Шаг дискретизации сигналов, мс:	
вариант 1	0.5, 1, 2, 4
вариант 2	0.25, 0.5, 1, 2
вариант 3	0.125, 0.25, 0.5, 1
Динамический диапазон преобразования	150 дБ
Инструментальный шум, мкВ, не более	0.1 мкВ
Число каналов регистрации наземных сигналов	8
Электропитание	220 В, 50 Гц
Габаритные размеры, вес применяемого модуля	1250 мм, 50 мм, 10 кг
Усилие на конце рычага прижимного устройства, килограмм-сила, не менее	85
Максимальное гидростатическое давление, МПа	100
Максимальная температура эксплуатации	120°C

эксплуатационным качествам, частотным характеристикам, направленности, помехоустойчивости и чувствительности. Испытания показали, что наиболее отработанной и продвинутой конструкцией отличался зонд АМК-ВСП, обладавший рядом несомненных достоинств (малая масса, высокая чувствительность каналов, большой динамический диапазон цифровых преобразователей сигнала, помехоустойчивость). Было рекомендовано доработать зонд, главным образом в части борьбы с паразитными вращательными колебаниями и ускорения передачи данных по линии связи, поскольку на момент испытаний эта

Аппаратура АМЦ-ВСП работает с любым типом геофизического бронированного кабеля, включая одножильный. В ней возможен дополнительный контроль глубины с помощью встроенного модуля гамма-каротажа. Она может работать с различными системами синхронизации возбуждения сейсмических колебаний типа CCB, SDS-S, SGD-S, Pelton и др. Имеющееся в ее составе технологическое программное обеспечение позволяет, кроме осуществления функций управления и контроля взаимодействия узлов аппаратуры, проводить работы любыми модификациями метода ВСП с фиксированными и подвижными

источниками колебаний. Эта аппаратура в настоящее время лидирует на российском рынке (к 2010 году выпущено 50 комплектов).

На начальных этапах развития многоканальных систем передачи сигналов от зондов ВСП на поверхность, когда цифровые технологии были развиты недостаточно, ВИМ рассматривалась многими как альтернатива прямой передаче сигналов по кабелю, а также непосредственной оцифровке сигналов в зонде. С переходом к цифровым зондам ВСП открылась уникальная возможность исключения искажений сигналов при прохождении их по геофизическому кабелю. Еще одна причина потенциально более высокой помехоустойчивости цифровых зондов состоит в том, что в них единственным элементом аналогового тракта является усилитель. Создание же высокостабильного усилителя, по мне-

нию разработчиков, трудностей не представляет [Чигрин, 2010].

Однако зонды ВСП с использованием ВИМ как способа передачи сигнала по кабелю все еще занимают на рынке свою нишу [Багмут и др., 2008; Багмут и др., 2011]. Абсолютное преимущество зондов с ВИМ над цифровыми состоит в их большей термостойкости и в этом - одна из основных причин их востребованности. Пока не создана цифровая элементная база высокой термостойкости, выносить приговор зондам ВИМ еще рано. Тем более, что примеров получения качественных результатов этими зондами, причем в глубоких «горячих» скважинах, предостаточно.

Об уровне современной скважинной сейсмической аппаратуры, выпускаемой за рубежом, можно судить по техническим характеристикам разработанных фирмой Серсель систем GeoWaves™,

▼ Табл. 2.

Характеристики	Тип зонда		
	GeoWaves™	SlimWave™	MaxiWave™
Максимальное число приборов (уровней) в зонде	32	12	100
Тип геофона	SMC1850 15 или 30 Гц	Omni 2400 15 Гц или SMC 1850 30 Гц	SMC1850 15 или 30 Гц
Монтаж датчика	Фиксированный или шарнирно подвешенный SMC1850 15 10Гц	Фиксированный	Фиксированный
Развертывание на скважине	Стандартное	Стандартное	Специальный барабан
Мгновенный динамический диапазон, дБ	123	122	122
Минимальный диаметр (без башмаков), мм	79	43	89
Максимальный диаметр скважины, мм	408	244	279
Длина прибора, мм	1262	1110	440
Вес прибора, кг	21	6.5	8
Отношение силы прижима к весу прибора	>10	>10	>4
Температура рабочая, °C	170	135	135
Температура пиковая, °C	180	150	150 (175 – в разработке)
Макс. рабочее давление, мПа	150	100	120

SlimWave™ и MaxiWave™. При разработке этих цифровых систем, использующих передачу информации в реальном времени, учитывали требования стоимости, эффективности, экономии времени, надежности, многоканальности, высокого качества сигнала и широкого диапазона частот. Во всех этих системах использован 24-разрядный сигма-преобразователь при шаге дискретизации, равном 0.25, 0.5, 1, 2 и 4 мс, а корпуса приборов зондов ВСП изготовлены из титана. О характеристиках каждого из зондов можно судить по приведенной выше таблице (взята из рекламных проспектов фирмы Серсель - Табл.2)

С целью микросейсмического мониторинга действующих скважин в фирме Серсель разработан комплект скважинных приборов на трубах НКТ (STPG), а также комплект приборов, размещаемых за обсадной колонной (STPG).

Комплект (зонд) STPG устанавливают в эксплуатируемых скважинах для оптимизации процесса закачки/добычи на уровне коллектора. Предполагается его использование для мониторинга гидро-разрыва пласта (ГРП) в исследуемой скважине. Колонна НКТ с вмонтированными в нее трехкомпонентными сейсмоприемниками позволяет проводить исследования в сильно искривленных скважинах. Аналогичное техническое решение используется в многоуровневой системе наблюдений, разработанной Паулссоном и др. [Paulsson et al., 2004].

Комплект (зонд) SCPG устанавливают за обсадной колонной перед цементированием затрубного пространства во вновь пробуренных скважинах с целью постоянного микросейсмического мониторинга нагнетания, эксплуатации и напряжения в течение всего срока эксплуатации коллектора.

Пути повышения качества записей ВСП

К настоящему времени работы ВСП проводят во всем мире исключительно трехкомпонентными зондами. Метод ВСП уже давно превратился в многоволновой метод, в котором наряду с продольными волнами используют обменные и поперечные волны. Однако на пути к полноценному использованию тех возможностей, которые обещает неискаженная регистрация волн внутри среды, стоит низкое качество полевых записей, которое, к сожалению, всё больше становится правилом, чем исключением [Шехтман и др., 2008]. Тем самым многие возможности последующей обработки, нацеленной на изучение тонких кинематических и динамических характеристик сейсмических волн, остаются нереализованными.

В настоящее время в методе ВСП отсутствуют пакеты программ, позволяющие объективно и своевременно оценить качество получаемых записей. Операторы, оценивающие качество записей в процессе проведения работ на скважине, принимают в учет лишь записи, зарегистрированные вертикальными приборами зонда (z-компонента). Но даже и после завершения работ оценка качества записей, полученных различными компонентами зонда, далека от совершенства. Опирается такая оценка, как правило, на формальную возможность регистрировать в методе ВСП область отсутствия сигнала до вступлений полезных волн и волновое поле, регистрируемое в последующей части записи непосредственно после этих вступлений. Процесс подобной оценки качества записей ВСП, осуществляемой автоматически, причем с использованием для количественной оценки лишь одного параметра – интенсивности записи, не учитывает тот непреложный факт, что сразу же после вступлений могут наблюдаться не полезные волны, а

помехи технического характера (технические помехи), обусловленные различными причинами. Поэтому отношение интенсивности записи, регистрируемой после вступлений прямой волны, к интенсивности шумов, регистрируемых до вступлений, может вовсе не соответствовать количественной оценке отношения сигнал/помеха. Имеются примеры того, как на этапе приемки материалов с оценкой «отлично» принимались записи горизонтальных компонент зонда, которые следовало бы оценить как брак. Получилось это именно оттого, что для автоматической оценки качества записей использовали только что описанный критерий. Поэтому предпринимаются усилия, направленные на восполнение пробела, касающегося оценки качества записей ВСП [Шехтман, Нарский, 2011]. Конкретная задача при этом состоит в разработке алгоритмов оценки качества записей, опирающихся на кинематические и динамические параметры технических помех, регистрируемых в скважине.

Научно обоснованные способы конструирования скважинных приборов, позволяющие избежать появления паразитных колебаний при работах ВСП, известны с давних пор [Aronstam, Yasuda, 1987], так же как давно известны упомянутые выше способы подавления паразитных вращательных колебаний.

В настоящее время наиболее слабым звеном при оценке качества записей ВСП, особенно записей на горизонтальных компонентах скважинных приборов, является количественная оценка. С точки зрения качественной оценки записей больших проблем не возникает, если такая оценка осуществляется компетентными специалистами. Создание независимой экспертизы и развитие супервайзерства в методе ВСП способны были бы развернуть разработчиков аппаратуры и ее пользователей к более внимательно-

му отношению к обеспечению высокого качества записей при помощи технических средств [Шехтман, 2011].

Литература

Багмут В.А., Багмут А.В., Рюмин В.А. О чувствительности, динамическом диапазоне и глубине применения скважинной аппаратуры ПМ ВСП // Технологии сейсморазведки. 2008. № 1. С. 99-107.

Багмут В.А., Рюмин В.А., Багмут А.В. О реальных и мнимых преимуществах цифровых зондов для вертикального сейсмического профилирования // Технологии сейсморазведки. 2011. № 4. С. 118-122.

Виноградов Ф.В. Некоторые результаты опробования скважинного трехкомпонентного сейсмоприемника с автоматической ориентировкой // Поперечные и обменные волны в сейсморазведке. 1967. С. 141-145.

Виноградов Е.А., Чигрин А.Д. Порог чувствительности аппаратуры ВСП // Технологии сейсморазведки. 2006. № 3. С. 90-95.

Воронин Ю.А., Жадин В.В. О частотных искажениях сейсмического сигнала при регистрации трехкомпонентным скважинным сейсмоприемником // Геология и геофизика. 1964. № 3. С. 154-156.

Воцалевский З.С., Лабковский Б.З., Шехтман Г.А., Тараненко В.В. Сравнительные испытания зондов ВСП // Геофизический вестник. 1998. № 7. С. 10-18.

Гальперин Е.И. Поляризационный метод сейсмических наблюдений // М.: Недра, 1977. 279 с.

Гальперин Е.И. Вертикальное сейсмическое профилирование: опыт и результаты // М.: Наука, 1994. 320 с.

Жадин В.В. Трехкомпонентные измерения амплитуд и скоростей распространения продольных и поперечных волн в глубокой скважине // Геология и геофизика. 1960. № 10. С. 129-136.

Иванов М.П., Шехтман Г.А. Устройство для проверки идентичности сейсмических каналов // Разведочная геофизика. – М., Недра. Вып. 91. 1980. С. 51-56.

Карус Е.В., Руденко Г.Е., Худзинский Л.Л. Трехкомпонентный четырехточечный скважинный зонд и некоторые результаты его опробования // Геология и разведка.

1978. № 3. С. 147-154.

Куповых П.Н., Гогоненков Г.Н., Рябков В.В., Благов В.В. Скважинный сейсмический прибор. Авторское свидетельство СССР № 254803, кл. G01 V 1/16, 1967.

Лебедев К.А. Многоволновые сейсмические исследования в глубоких скважинах // Многоволновые сейсмические исследования, 1987, Новосибирск, наука, 87-92.

Лебедев К.А., Болотов Ю.А., Авербух В.А., Воевода В.В. Цифровой трехкомпонентный зонд с гироскопической ориентацией // Многоволновые сейсмические исследования. 1987. Новосибирск, Наука. С. 97-103.

Лебедев К.А., Суздальницкий Ф.М., Максимов В.И., Меньтюков А.А., Сафиуллин Г.Г. Скважинная трехкомпонентная аппаратура // Многоволновые сейсмические исследования. 1987. Новосибирск, Наука. С. 103-108.

Ленский В.А., Мамлеев Т.С., Даниленко В.Н. Скважинная сейсморазведка // М.: ВНИИГеосистем, 2012. 312 с.

Мирзоян Ю.Д. Исследование и развитие поляризационного метода вертикального сейсмического профилирования на акваториях: Дис. ... докт. тех. наук. Краснодар, Кубанский гос. ун-т, 2010, 102 с.

Чигрин А.Д. К вопросу о динамическом диапазоне и использовании времени импульсной модуляции в методе ВСП // Технологии сейсморазведки. 2010. № 4. С. 91-95.

Шехтман Г.А. Супервайзерство в методе ВСП: пределы возможного // Приборы и системы разведочной геофизики. 2011. № 1, С.18-22.

Шехтман Г.А., Каплунов А.И. О влиянии силы прижима скважинных приборов на характер регистрируемых сигналов при вертикальном сейсмическом профилировании (ВСП) // Прикладная геофизика, 1974, вып. 73. С. 95-101.

Шехтман Г.А., Касимов А.Н., Редекон В.А. Скважинный сейсмический прибор. Патент РФ № 2444030 от 21.12.2010.

Шехтман Г.А., Касимов А.Н. Скважинный сейсмический прибор. Патент РФ № 2503978 от 16.08.2012.

Шехтман Г.А., Коробов В.И., Курасов М.И. Скважинный сейсмический прибор.

Авторское свидетельство СССР № 1073725, кл. G01 V 1/40, 1984.

Шехтман Г.А., Кузнецов В.М., Редекон В.А. Низкое качество полевых записей – причина нереализованных возможностей многоволнового ВСП // Тезисы доклада на научно-практической конференции «Гальперинские чтения – 2008».

Шехтман Г.А., Курасов М.И., Корнилин Б.П. Скважинный сейсмический прибор. Авторское свидетельство СССР № 1448902, кл. G01 V 1/40, 1986.

Шехтман Г.А., Курасов М.И. Прижимное устройство для скважинного сейсмического прибора. Авторское свидетельство СССР № 1702334, 1991.

Шехтман Г.А., Нарский Н.В. Факторы, влияющие на качество данных вертикального сейсмического профилирования // Технологии сейсморазведки. 2011. № 2. С. 59-69.

Aronstam P.S. and Yasuda K. A new generation of borehole receivers // Presented at the 49th EAGE Annual Meeting. – Belgrad, 1987.

Beydoun W.B., 1984, Seismic tool-formation coupling in boreholes, in Toksöz, M.N., and Stewart, R.R., Eds., Vertical seismic profiling, Part B: Advanced concepts: Geophysical Press, 177-188.

Gaiser J.E., Fulp T.J., Petermann S.G., and Karner G.M. Vertical seismic profile sonde coupling. – Geophysics, 1988, vol. 53, NO. 2, P. 206-214.

Hardage B.A. Vertical seismic profiling: principles. Third updated and revised edition. – PERGAMON, 2000, P. 552.

Hardage B.A., DeAngelo M.V., Murray P.E., Sava D. Multicomponent seismic technology. – Society of Exploration Geophysicist, 2011, P. 318.

Heath B. Time to re-evaluate our approach to 3C land seismic acquisition // First Break, 2, 2007, 51-59.

Li J. and Ronen S. Estimating and correcting of tilted multicomponent receivers. – EAGE 67th Conference & Exhibition, Madrid, Spain, 2005.

Paulsson B., Karrenbach M., Milligan P., Goetz A., and Hardin A. High resolution 3D seismic imaging using 3C data from large downhole seismic arrays // First Break, 2004, 10, P. 73-83.