

$\Delta\omega$ . При ДПФ для уменьшения шага по частоте необходимо увеличивать длительность сигнала. В такой ситуации анализируемый участок сейсмотрассы может быть дополнен нулями. Однако значения ФЧХ в этом случае будут коррелированными. Коррелированность значений ФЧХ, как показано выше, приведет к изменению весовых коэффициентов в алгоритмах обработки, которые на практике найти сложно. Однако, учитывая, что сама процедура обработки не меняется, переход к алгоритмам с равновесной обработкой позволяет избежать возникших трудностей и получить оценки временного положения сигналов с достаточно высокой точностью.

Проведенный анализ способов развертывания ФЧХ показал, что каждый из них наряду с несомненными достоинствами, имеет и недостатки. В целом, предпочтение следует отдать методу Шафера, т. к. он прост в реализации, а возникающие погрешности при развертывании ФЧХ в анализируемой полосе частот можно контролировать путем анализа исходной записи.

Таким образом, фазочастотные методы обеспечивают достаточно высокую точность оценок временного положения сигналов даже при наличии корреляции в выборке ФЧХ сейсмической записи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванченков В.П., Кочегуров А.И. Определение временного положения сейсмических сигналов по оценкам их фазочастотных характеристик // Геология и геофизика. – 1988. – № 9. – С. 77–83.
2. Иванченков В.П., Вылегжанин О.Н., Орлов О.В., Кочегуров А.И. Методы фазочастотного анализа волновых полей и их применение в задачах обработки данных сейсморазведки // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 7. – С. 65–70.
3. Иванченков В.П., Кочегуров А.И. Фазочастотные алгоритмы оценки местоположения пространственно- временных сигналов в условиях априорной неопределенности // Известия высших учебных заведений. Физика. – 1995. – Т. 38. – № 9. – С. 100–104.
4. Поиск, обнаружение и измерение параметров сигналов в радионавигационных системах / Под ред. Ю.М. Казаринова. – М.: Советское радио, 1975. – 296 с.
5. Долгополов Д.В., Пасторов А.И. О разделении двух наложившихся импульсов // Применение ЭВМ в сейсмологической практике. Методические работы ЕССН. – М.: Наука, 1985. – С. 86–91.
6. Кочегуров А.И., Быстров В.Н. Определение временного положения сложных сигналов в среде с дисперсией и поглощением // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2002. – Т. 45. – № 3-4. – С. 50–54.
7. Гольдин С.В. Смещение нулей и экстремумов сейсмических сигналов под воздействием помех // Геология и геофизика. – 1964. – № 10. – С. 130–144.
8. Tribolet J.M. A new phase unwrapping algorithm // IEEE Transaction on acoustics, speech and signal processing. – 1977. – V. 25 (2). – P. 170–177.

Поступила 13.11.2009 г.

УДК 550.8.053:519.2

## КОРРЕКЦИЯ СКОРОСТНОГО ЗАКОНА ПО ДАННЫМ НЕПРОДОЛЬНОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ

Д.Ю. Степанов, М.С. Речкин

Томский политехнический университет  
E-mail: w00x@sibmail.com

*Предложен алгоритм коррекции скоростного закона по данным непродольного вертикального сейсмического профилирования. Рассмотрены модели ошибок в определении статических поправок, показано, что данный алгоритм позволяет минимизировать влияние погрешности определения статических поправок и тем самым повысить точность оценки интервальных скоростей.*

#### Ключевые слова:

*Вертикальное сейсмическое профилирование, интервальные скорости, статическая поправка.*

#### Key words:

*Vertical seismic profiling, interval velocities, static correction.*

При проведении сейсморазведочных работ методом вертикального сейсмического профилирования (ВСП) скорости продольных волн оценивают по времени первого вступления на наблюдаемом волновом поле с ближнего пункта возбуждения (ПВ) [1, 2]. Так как анализ проводится по одно-

кратному наблюдению, полученному с помощью перестановки приемников и многократного возбуждения, и наблюдаемое поле осложнено помехами, оценка интервальных скоростей обычно обладает значительными погрешностями. Последующие процедуры обработки полей ВСП (приведение

поля к вертикали, построение временных и глубинных разрезов и т. п.) предъявляют повышенные требования к используемому скоростному закону. Поэтому на практике интервальные скорости не применяют, а используют пластовые скорости, полученные путем усреднения интервальных скоростей или из усредненных времен по глубине. Тем самым повышается точность скоростного закона, но теряется разрешенность. Улучшение качества оценки без потери разрешенности можно добиться путем разработки алгоритма коррекции скоростей, учитывающего результаты наблюдений не только с ближнего ПВ (продольное ВСП), но и с удаленных ПВ (непродольное ВСП) [1].

Система наблюдений прямого ВСП состоит из каротируемой скважины, *пунктов приема* (ПП) и *пунктов возбуждения* (рис. 1). Пункты приема располагаются в скважине на глубинах  $h_1, h_2, \dots, h_N$ . Пункты взрыва выносят на расстояния  $L_i$  от каротируемой скважины и закладывают в неглубокую скважину (8–15 м). При удалении ПВ, не сопоставимым с глубиной забоя скважины, пункт возбуждения называют *ближним*, остальные – *удаленными*.

При первичной обработке материалов ВСП осуществляют ввод статической поправки, позволяющей получить сейсмограмму ВСП для одинаковых условий возбуждения [2]. Определение величины поправки осуществляется по записи контрольного канала и в ряде случаев не учитывает все изменения в системе наблюдений. Исходя из этого, наблюдаемое время прихода прямой продольной волны можно записать как:

$$t^u(h) = t(h) + \Delta t(h), \quad (1)$$

где  $t^u(h)$  – наблюдаемое время,  $t(h)$  – теоретическое время прихода волны,  $\Delta t(h)$  – величина, определяющая отклонение наблюдаемого времени от теоретического, в общем случае имеет случайный характер. Пусть величина  $\Delta t(h)$  представима в виде:

$$\Delta t(h) = \tau(h) + \delta(h),$$

где  $\tau(h)$  – ошибка ввода статической поправки,  $\delta(h)$  – случайная величина с нулевым математиче-

ским ожиданием, обусловленная ошибками измерений. Далее будем считать, что  $\tau(h)$  не зависит от глубины  $h$ .

Рассмотрим проведение ВСП с  $M$  пунктами возбуждения, удаленными от скважины на расстояния:  $L_1, L_2, \dots, L_M$ , и  $N$  пунктами приема. Пусть в результате получено  $M$  наблюдаемых времен первых вступлений прямых продольных волн, которые согласно (1) можно записать в виде:

$$t_k^u(h) = t_k(h) + \tau_k, \quad k=1, 2, \dots, M,$$

где  $t_k(h)$  – теоретическое время прихода на глубину  $h$  с  $k$ -го ПВ,  $\tau_k$  – ошибка в определении статической поправки для  $k$ -го ПВ.

Для анализа ошибок статических поправок будем использовать *матрицу невязок* наблюдаемых данных и принятой скоростной модели среды. Построение такой матрицы предлагается проводить по следующей схеме:

1. Решается обратная задача: рассчитываются скоростные законы  $\{V_{kM}^M\}$  для каждого пункта возбуждения по наблюдаемым временам первых вступлений [3].
2. Скоростной закон  $V_i$  принимается как базовый ( $i=1$ ).
3. Решается прямая задача, используя базовый закон: находятся теоретические времена  $t_k(h)$  для всех пунктов возбуждения.
4. В  $i$ -й столбец матрицы  $T$  записываются величины, определяемые выражением

$$\tau_{k,i} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [t_k^u(h_n) - t_k(h_n)], \quad i = 1, 2, \dots, M,$$

– средние невязки наблюдаемого и теоретического времени для  $k$ -ого ПВ.

5. Пункты 2–4 повторяются, в предположении истинности других скоростных законов.

Матрицу невязок  $T$  можно использовать для коррекции наблюдаемых времен и, соответственно, скоростных законов с разных ПВ. Для этого предлагается следующая последовательность действий:

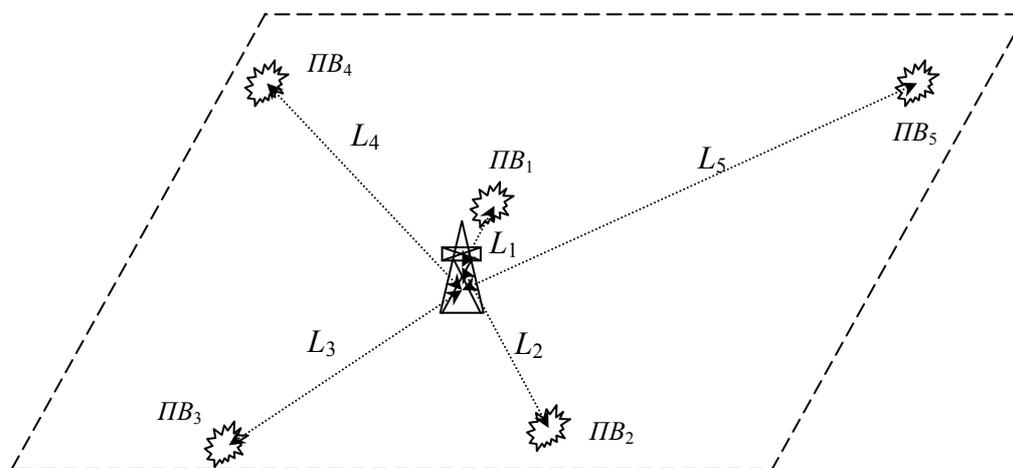


Рис. 1. Пример схемы расположения ПВ при проведении ВСП

1. Рассчитывается матрица невязок  $T$  по наблюдаемым временам.
2. Выбираются 2 столбца  $\lambda_{\min}$  и  $\lambda_{\max}$  матрицы  $T$  по следующим критериям

$$\lambda_{\min} = \arg \min_{\lambda \in [1, M]} \left\{ \frac{1}{M-1} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^M \tau_{i,k} \right\},$$

$$\lambda_{\max} = \arg \max_{\lambda \in [1, M]} \left\{ \frac{1}{M-1} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^M \tau_{i,k} \right\}.$$

3. Находятся скорректированные наблюдаемые времена:

$$t_k^{h(\min)}(h) = t_k^h(h) - \tau_{k, \lambda_{\min}},$$

$$t_k^{h(\max)}(h) = t_k^h(h) - \tau_{k, \lambda_{\max}},$$

и по скорректированным временам рассчитываются новые матрицы невязок:  $T_{\min}$  и  $T_{\max}$ .

4. Из выбранных столбцов  $\lambda_{\min}$  и  $\lambda_{\max}$  выбирается тот, использование которого при коррекции времен приводит к меньшей норме матрицы  $T$ . За норму  $\|T\|$  можно принять среднее значение модулей элементов матрицы.
5. Коррекция времен (пункты 2–4) происходит до выполнения одного из двух условий:
  - условие достижения требуемой нормы:  $\|T\| < \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  – порог;
  - условие неэффективности дальнейших итераций:  $\|T_j\| - \|T_{j-1}\| \geq 0$ , где  $T_j$  – матрица невязок, рассчитанная на  $j$ -ой итерации.

В результате выполнения вышеописанного алгоритма, оценки интервальных скоростей по скорректированным временам будут содержать только ошибку, обусловленную ошибками измерения времени первого вступления. Для анизотропной и горизонтально-слоистой среды следует ожидать, что данные оценки являются несмещенными. Поэтому коррекция скоростного закона может быть выполнена за счет усреднения по ансамблю:

$$V_k^{kop}(h) = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M V_k^{kop}(h),$$

где  $V_k^{kop}(h)$  – интервальная скорость, рассчитанная по скорректированному времени  $k$ -го ПВ.

Данный алгоритм использован и апробирован на модельных материалах. Параметры моделей выбирались из условий проведения работ ВСП на территории Западной Сибири, а в качестве скоростного закона выбраны интервальные скорости, полученные на реальных материалах одной из скважин Томской области (далее – модельная скорость). Система наблюдения задавалась вертикальной скважиной с глубиной забоя 3220 м, расстановкой сейсмоприемников равномерно по глубине с шагом 10 м и пятью пунктами возбуждения с удалениями от устья скважины на расстояния:  $L_1=150$  м,  $L_2=500$  м,  $L_3=1000$  м,  $L_5=1500$  м.

На первом этапе проводились исследования алгоритма оценки скоростного закона с целью определения влияния ошибок ввода статических поправок и удаления ПВ. Теоретические времена  $t_k^h(h)$  рассчитывались по модельным скоростям, а наблюдаемые времена  $t^h(h)$  согласно (1) [3]. На рис. 2, а, представлены графики погрешностей интервальных скоростей при различных ошибках в статических поправках и постоянном удалении ПВ  $L=500$  м. На рис. 2, б, представлены погрешности интервальных скоростей для различных удалений ПВ при одинаковой ошибке в статической поправке  $\tau=8$  мс. Как видно из результатов эксперимента ошибки в определении статической поправки приводят к нелинейному искажению интервальных скоростей. Наибольшие отклонения наблюдаются в верхней части разреза и усиливаются с уменьшением удаления ПВ, а с глубиной влияние статических поправок в среднем уменьшается.

На втором этапе исследований ставилась задача проверки работоспособности алгоритма коррекции наблюдаемых времен на различных моделях ошибок ввода статических поправок. Ошибка вво-

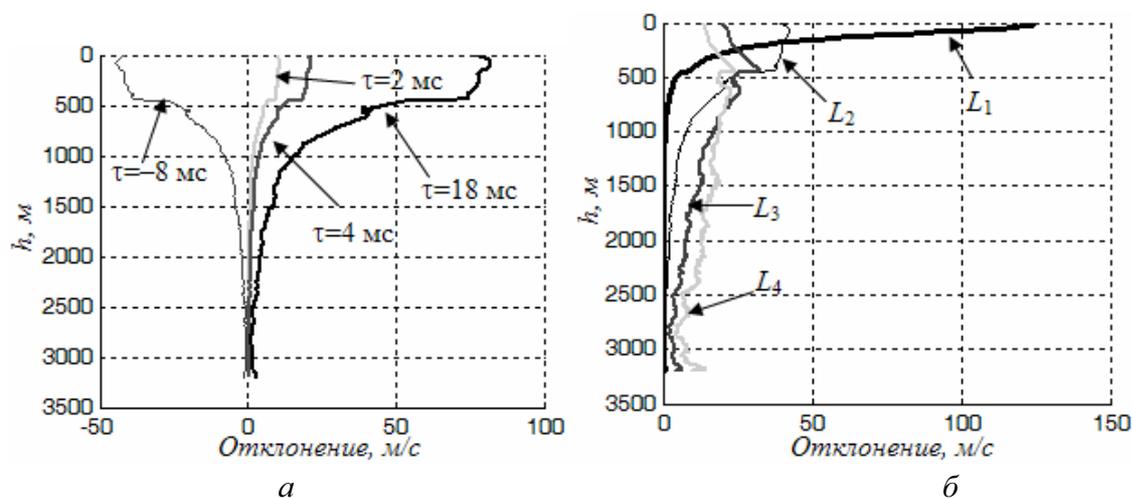


Рис. 2. Отклонение оценок интервальной скорости от модельной скорости в зависимости от: а) величины  $\tau$ ; б) удаления ПВ

да статической поправки определялась согласно табл. 1 для каждого ПВ и модели ошибки.

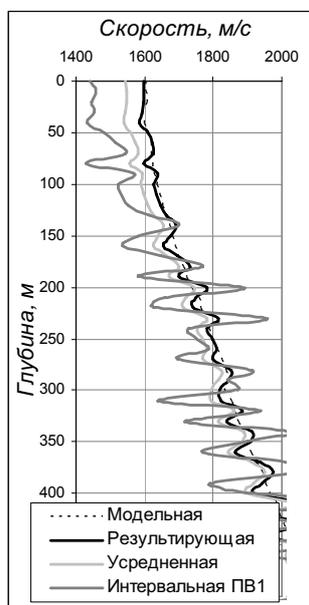
**Таблица 1.** Модели ошибок ввода статических поправок

№ модели ошибки	Ошибка в статических поправках для ПВ, мс / Среднее отклонение оценок скоростей, м/с				
	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_5$
1	4/130	0/0	0/0	0/0	0/0
2	0/0	4/72	4/37	4/31	4/25
3	4/130	-4/72	0/0	-4/31	4/25
4	-4/130	-4/72	0/0	-4/31	-4/25
5	0/0	-2/35	8/73	-2/15	-4/25
6	2/66	-2/35	4/37	-8/64	4/25

В результате использования алгоритма коррекции наблюдаемых времен для моделей № 1–5 удалось скорректировать времена с точностью алгоритма решения прямой задачи [3]. Таким образом, разработанный алгоритм позволяет скорректировать наблюдаемые времена при отсутствии ошибок хотя бы в одном из наблюдаемых времен. В шестой модели заложено условие наличия ошибок ввода статической поправки в разрезы всех ПВ. Для данной модели достичь вычислительной точности не удалось, однако для удаленных ПВ удалось уменьшить отклонения наблюдаемых времен от теоретических (табл. 2).

**Таблица 2.** Погрешности коррекции времен для модели № 6

Отклонения скорректированных времен, мс				
$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_5$
1,8	-2	2,4	-2,5	2,8



**Рис. 3.** Модельная и интервальные скорости

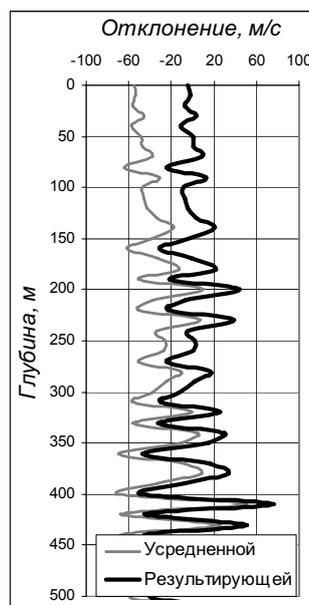
На третьем этапе исследовалась помехоустойчивость алгоритма коррекции скоростного закона. Случайная величина  $\delta(h)$  задавалась датчиком случайных чисел с равномерным законом распределе-

ния на интервале  $[-0,5; 0,5]$  мс. Принятая модель ошибок ввода статических поправок представлена в табл. 3.

**Таблица 3.** Модельные ошибки в оценке статических поправок

Ошибка в статических поправках для ПВ, мс / Среднеквадратическая ошибка оценок скоростей, м/с				
$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_5$
16/29	24/14	12/2	18/25	0/21

На рис. 3 показаны графики модельной скорости, усредненной оценки интервальных скоростей до коррекции и результирующего скоростного закона (усреднение после коррекции) в верхней части разреза. На рис. 4 приведены графики отклонений расчетных скоростей от модельной. Усреднение оценок скоростей без коррекции наблюдаемых времен приводит к получению смещенной оценки. Из рисунков видно, что после коррекции наблюдаемых времен с помощью представленного алгоритма результирующая скорость является несмещенной оценкой.



**Рис. 4.** Отклонение оценок скоростей от модельной скорости

Таким образом, постоянное отклонение наблюдаемых времен от теоретических влечет смещение оценки скоростного закона. Случайное отклонение времен влечет за собой случайную неоднородную ошибку оценивания скорости. Неоднородность данной ошибки обусловлена рекуррентным алгоритмом оценки скоростей [3]. Разработанный алгоритм коррекции наблюдаемых времен позволяет минимизировать влияние ошибки ввода статической поправки и, тем самым, получить несмещенные оценки интервальных скоростей, а алгоритм коррекции скоростного закона – уменьшить разброс скорости, обусловленный случайной величиной  $\delta(h)$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гальперин Е.И. Вертикальное сейсмическое профилирование. 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Недра, 1982. – 344 с.
2. Сейсморазведка. Справочник геофизика / Под ред. И.И. Гурвича, В.П. Номоконова. – М.: Недра, 1981. – 464 с.
3. Речкин М.С. Алгоритм оценки скоростного закона по данным ВСП // Молодежь и современные информационные технологии: Сбо. трудов VII Всеросс. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых – Томск, 25–27 февраля 2009. – Ч. 1. – Томск: Изд-во «СПб Графикс», 2009. – С. 179–180.

Поступила 29.10.2009

УДК 622.276.05-192:519.6

## АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДВИГАТЕЛЬНОЙ СЕКЦИИ ВИНТОВОГО ЗАБОЙНОГО ДВИГАТЕЛЯ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS

К.В. Сызранцева, В.А. Аришин

Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень  
E-mail: kv.syzr@gmail.com

*Проведен прочностной конечно-элементный анализ двигательной секции винтового забойного двигателя в программном комплексе ANSYS. Подробно описаны все этапы анализа. Приведены результаты оценки напряженно-деформированного состояния ротора и статора, а также картины распределений контактных давлений между ними, необходимые для оценки работоспособности двигателя. Показано изменение распределений контактных давлений для двигателей с изношенным статором, приводящее к нарушению условия герметичности рабочих камер.*

### Ключевые слова:

*Винтовой забойный двигатель, компьютерный анализ, метод конечных элементов, ANSYS, напряженно-деформированное состояние, контактные давления.*

### Key words:

*Screw downhole motor, computer analysis, finite element method, ANSYS, stress-strain state, contact pressures.*

Бурение скважин необходимо для изучения геологической структуры и свойств горных пород, а также для добычи жидких и газообразных полезных ископаемых. Процесс бурения заключается в постепенном углублении ствола скважины путем разрушения горных пород долотом с одновременным выносом жидкостью или газом выбуренной породы по затрубному пространству на поверхность.

Винтовые забойные двигатели (ВЗД) играют заметную роль в буровой технике и технологии последних десятилетий. С усложнением в последнее время буровых работ и работ по ремонту скважин (горизонтальное бурение, разбуривание дополнительных стволов в пробуренной скважине) и использованием технологий с применением гибкой трубы, роль винтовых забойных двигателей ввиду своих уникальных характеристик постоянно возрастает [1].

Уникальность характеристик ВЗД заключается в том, что при своей простоте конструкции и относительно небольших размерах они обладают высоким крутящим моментом на низких оборотах, а это необходимо для более качественного и экономически выгодного бурения. К тому же ВЗД имеют высокий КПД по сравнению с другими гидравлическими двигателями.

При всех своих достоинствах винтовые забойные двигатели обладают одним существенным недостатком – быстрым износом рабочих органов и, соответственно, недостаточно большим ресурсом работы.

Конструкция двигателя предусматривает несколько основных частей: двигательная секция, шпиндельная секция, переливной клапан, гибкий вал, переводники.

Двигательная секция состоит из ротора и статора, поперечные сечения которых изображены на рис. 1. Стальной статор имеет внутри привулканизированную резиновую обкладку с винтовыми зубьями, на стальном роторе нарезаны наружные зубья, причем число зубьев ротора на единицу меньше числа зубьев статора. Специальный профиль зубьев ротора и статора обеспечивает непрерывный контакт между собой, образуя на длине шага статора единичные рабочие камеры [2].

Ротор, совершая планетарное движение, поворачивается по часовой стрелке, в то время как геометрическая ось ротора перемещается относительно оси статора против часовой стрелки. За счет разности в числах зубьев ротора и статора переносное движение редуцируется в абсолютное с передаточным числом, равным числу зубьев ротора, что обеспечивает сниженную частоту вращения и высокий крутящий момент на выходе.