

УДК 550.34.037.2:622.243.24

**ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ  
СТВОЛА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН МЕТОДОМ  
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ТЕЛЕМЕТРИИ С ГРАВИТАЦИОННОЙ  
НАВИГАЦИЕЙ**

**PROCESSING AND INTERPRETATION OF RESEARCH RESULTS OF STEM  
HORIZONTAL WELLS DIFFERENTIAL TELEMETRY METHOD WITH  
GRAVITATIONAL NAVIGATION**

©Кузьмина И. В.

канд. техн. наук

Ухтинский государственный технический университет  
г. Ухта, Россия, Bukashka001@yandex.ru

©Kuzminova I.

Ph.D., Ukhta State Technical University  
Ukhta, Russia, Bukashka001@yandex.ru

*Аннотация.* Приведены визуальные факты негативного влияния на качество геофизических исследований потери измерительным зондом центровки в стволе скважины, ее геометрии и пространственной ориентации. Показан эскиз дифференциального измерительного преобразователя с гравитационной навигацией в стволе скважины для скважинной телеметрической системы. Изложена методика предварительной обработки и общий принцип интерпретации результатов геофизических исследований методом дифференциальной телеметрии наклонно направленных, горизонтальных и скважин со сложной геометрией и пространственной ориентацией ствола.

*Abstract.* Presented the visual facts of negative impact on the quality of Geophysical Research loss measuring probe centering in the stem well, its geometry and spatial orientation. It shows a sketch of the differential transmitter with gravitational navigation in the borehole to borehole telemetry system. The methods of pre-treatment and the general principle of interpretation of geophysical studies by differential telemetry directional, horizontal wells and complex geometry and spatial orientation of the stem.

*Ключевые слова:* измерительный зонд, дифференциальный измерительный преобразователь, геофизические методы дифференциальной телеметрии, гравитационная навигация, геометрия ствола скважины, градиент скалярного геофизического поля.

*Keywords:* measuring probe, differential measuring converter, geophysical methods of differential telemetry, gravitational navigation, well stem geometry, the gradient of the scalar geophysical field.

В середине 90-х годов прошлого столетия развитие топливно-энергетического комплекса и химической промышленности потребовало от нефтедобывающей промышленности принять меры по увеличению добычи углеводородов. Эта потребность способствовала появлению в системе разработки газонефтяных месторождений целого ряда новых высокоэффективных технологий. Особое место среди этих технологий занимает разработка месторождений углеводородов с помощью горизонтальных скважин. При правильной эксплуатации горизонтальные скважины позволяют увеличить скорость добычи и количество извлекаемых запасов углеводородов, уменьшить себестоимость добычи, число платформ и скважин на шельфе морей. Горизонтальные скважины характеризуются

большим дебитом, чем вертикальные скважины. Это объясняется тем, что третья часть горизонтальных скважин пробурена в продуктивных пластах, в которых большая проницаемость обеспечивается за счет наличия трещин, поскольку трещины по своей физической природе имеют вертикальную протяженность и поэтому горизонтальная скважина по площади соприкосновения может пересечь их гораздо больше, чем обычная — вертикальная скважина.

В настоящее время опыт промышленного освоения систем разработки и эксплуатации месторождений углеводородов показал, что к наиболее эффективной технологии по извлечению запасов углеводородов относится комбинация горизонтальных скважин с вертикальными и наклонно направленными скважинами.

Опыт, накопленный нефтепромысловой геофизикой почти за три десятилетия исследований стандартными геофизическими методами открытого ствола наклонно направленных и горизонтальных скважин и скважин, обсаженных колонной, свидетельствует о влиянии геометрии и пространственной ориентации ствола скважины на результаты геофизических исследований. На Рисунке 1 приведены примеры влияния пространственной ориентации измерительного зонда скважинного прибора САТ (скважинный акустический телевизор) в стволе вертикальной скважины и влияние геометрии ствола вертикальной скважины на качество акустических снимков. Аппаратура САТ позволяет визуально оценить изменение качества результатов геофизических исследований при изменении геометрии ствола скважины и пространственной ее ориентации [1, с. 36].

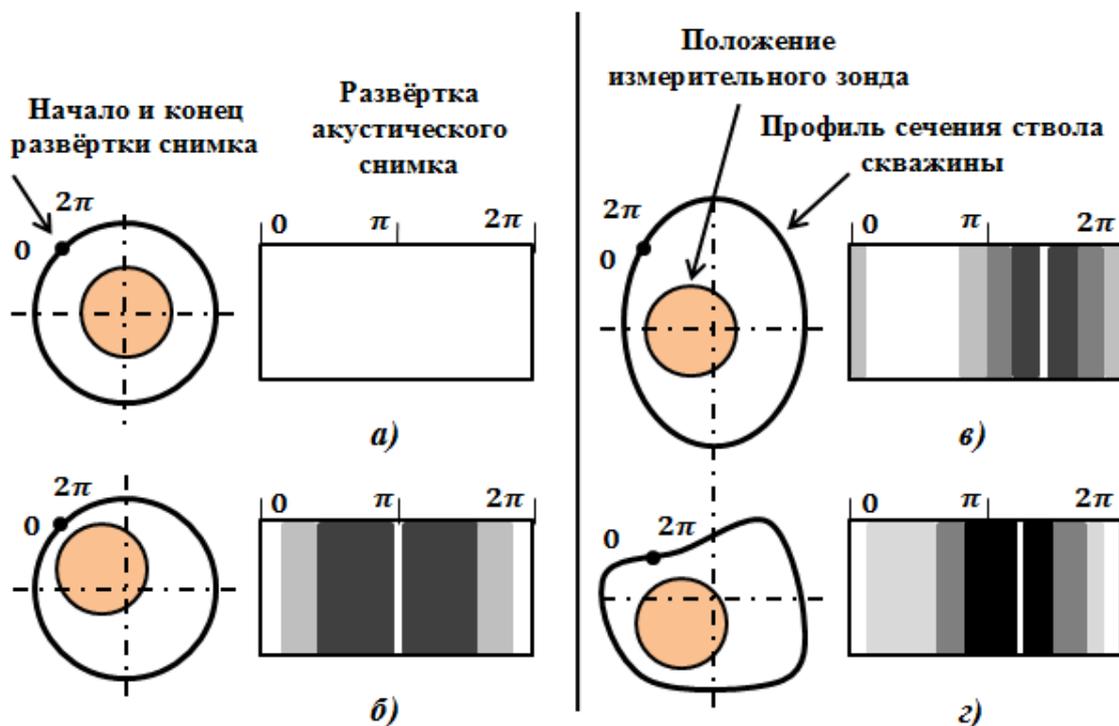
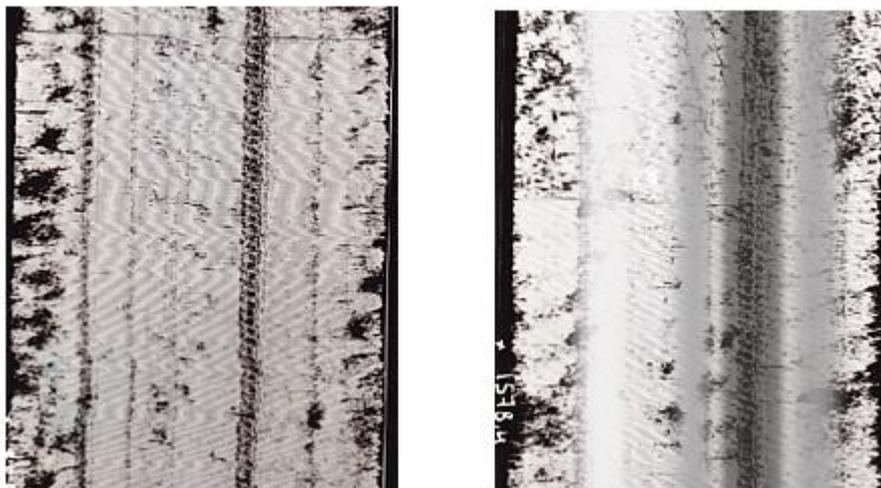


Рисунок 1. Иллюстрация влияния геометрии ствола скважин и пространственной ориентации измерительного зонда скважинного акустического телевизора (САТ) на качество акустических снимков.

Технология исследования открытого ствола скважин и скважин, обсаженных колонной предусматривает центровку измерительного зонда (скважинного прибора) относительно ее стенок. В этом случае фон акустического снимка будет равномерный по всей поверхности снимка, а контрастность фона будет пропорциональна диаметру скважины (Рисунок 1, а). В случае нарушения центровки измерительного зонда в стволе скважины изменяется общий фон акустического снимка (Рисунок 1, б), что приводит к значительному искажению контрастной информации (светло–серые тона) и частичной или полной потере информации

(темно–серые тона и контрастно–черные области). Если форма поперечного сечения скважины имеет правильную окружность, то при потере центровки измерительным зондом в стволе скважины, сохраняется симметрия фона контрастных областей. В случае нарушения правильной геометрии окружности — эллипс (Рисунок 1, в) или деформированная окружность сложной геометрии (Рисунок 1, г), симметрия контрастных областей нарушается и приобретает случайный характер. В скважинах сложной геометрической формы обеспечить центровку измерительного зонда крайне сложно, чаще — невозможно. Этим недостатком обладает подавляющее большинство стандартных телеметрических систем при исследованиях вертикальных скважин, которые в большинстве своем симметричны относительно своей оси.

На Рисунке 2 приведены акустические снимки интервалов обсадной колонны вертикальной скважины, полученные аппаратурой САТ. На Рисунке 2, а измерительный зонд скважинного прибора устойчиво центрирован на оси ствола скважины. На снимке наблюдаются акустические помехи, в виде фона извилистых широких полос по всей поверхности акустического снимка, источник акустических помех — металлические центраторы скважинного прибора. На Рисунке 2, б, появление светлых и темных полос различной контрастности свидетельствует о смещении измерительного зонда относительно оси ствола скважины. При качественном метрологическом обеспечении телеметрической системы САТ по акустическим снимкам можно определять степень разрушения стенки открытого ствола скважины (каверна) и уровень повреждения поверхности обсадной колонны.



а)

б)

Рисунок 2. Акустические снимки интервалов обсадной колонны в стволе вертикальной скважины, полученные скважинным акустическим телевизором (САТ):  
а) измерительный зонд устойчиво центрирован по оси ствола скважины;  
б) наблюдается смещение измерительного зонда относительно оси ствола скважины (возникают помехи в виде вертикальных полос различной контрастности).

В геофизике симметрия вертикальной скважины складывается из однородности и изотропности пространства в плоскости измерительного преобразователя. При этом делают различие однородности и изотропности ствола скважины (свойства флюида) и ее стенок, сложенных горными породами. В этих случаях под однородностью понимают равноправие всех точек области, а под изотропностью — равноправие всех направлений пространства. Этот постулат принят за основу при проектировании стандартной геофизической аппаратуры — каждый датчик или измерительный зонд физической величины регистрирует скалярные или векторные геофизические поля одновременно со всех направлений.

В наклонно направленных и горизонтальных скважинах симметрия нарушается и кроме этого, под действием гравитационных сил эффективность центровки измерительного зонда значительно падает. Эти неустраняемые естественные факторы в немалой степени снижают качество результатов исследований, что приводит к огромной потере объективности геофизической информации. Поэтому, для устранения этих негативных явлений необходимо стандартные телеметрические системы и существующие технологии исследования вертикальных скважин, которые до настоящего времени применяются в нефтепромысловой геофизике как классические, адаптировать к исследованиям наклонно направленных и горизонтальных скважин. Этот качественный переход к новым геофизическим комплексам позволит создавать модули с дифференциальными измерительными зондами и дифференциальными датчиками. Они изготавливаются в виде модулей–приставок к стандартной геофизической аппаратуре, комплектуются метрологическим обеспечением и методами интерпретации результатов исследований. На примере геофизического поля скалярной физической величины покажем адаптацию скважинной телеметрической системы к условиям асимметрии наклонно направленных скважин (нисходящий и восходящий ствол, свыше  $35^\circ$  и до  $135^\circ$ ) и горизонтальных скважин (горизонтальный и волнообразный ствол, от  $35^\circ$  до  $135^\circ$ ).

Для исследований асимметричных скважин автором предложен дифференциальный измерительный преобразователь (ДИП) с гравитационной навигацией в стволе наклонно направленных и горизонтальных скважин [2, с. 150]. Конструкция дифференциального измерительного преобразователя показана на Рисунке 3.

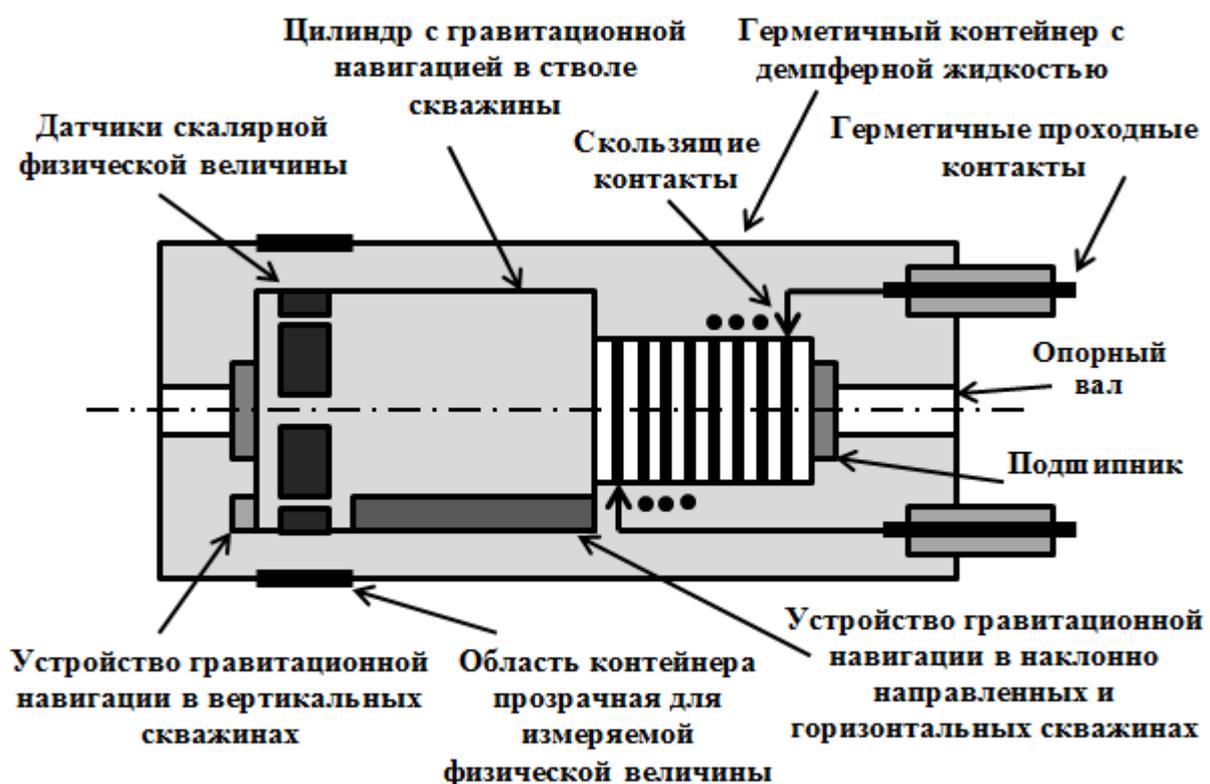


Рисунок 3. Конструкция дифференциального измерительного преобразователя с гравитационной навигацией в стволе наклонно направленных и горизонтальных скважин сложной геометрии и пространственной ориентации.

Контур с датчиками скалярных физических величин (как и векторных физических величин) образует ДИП. Устройство гравитационной навигации в вертикальных скважинах отслеживает угол наклона ствола скважины до  $35^\circ$ . При превышении этого значения подключается устройство гравитационной навигации в наклонно направленных и

горизонтальных скважинах. Оно ориентирует датчики ДИПа по принципу «нижняя–верхняя» стенка наклонно направленной или горизонтальной скважины. Необходимость в такой ориентации измерительного зонда в стволе скважины сложной геометрии связана с методами интерпретации результатов исследований.

Таким образом, скалярные геофизические поля скважины, а к ним, как известно, относятся: поле потенциала тяготения, поле плотности массы, поле электрического потенциала, поля диэлектрической и магнитной проницаемости, поле давлений, поле температур и др., регистрируются ДИПом в каждом секторе ствола скважины, независимо друг от друга. Если ДИП имеет  $N$  датчиков, то при этом регистрируется  $n$  кривых, которые характеризуют скалярное поле в каждом секторе ствола скважины (Рисунок 4). Такой подход к процессу измерения, при интерпретации результатов исследований, позволяет исключить негативные факторы, приведенные на рис. 1, б, в, г, так как в стволе вертикальной скважины при отсутствии каверн большого размера симметрия пространства в плоскости измерительных преобразователей сохраняется, и все кривые будут относительно тождественно равны между собой.

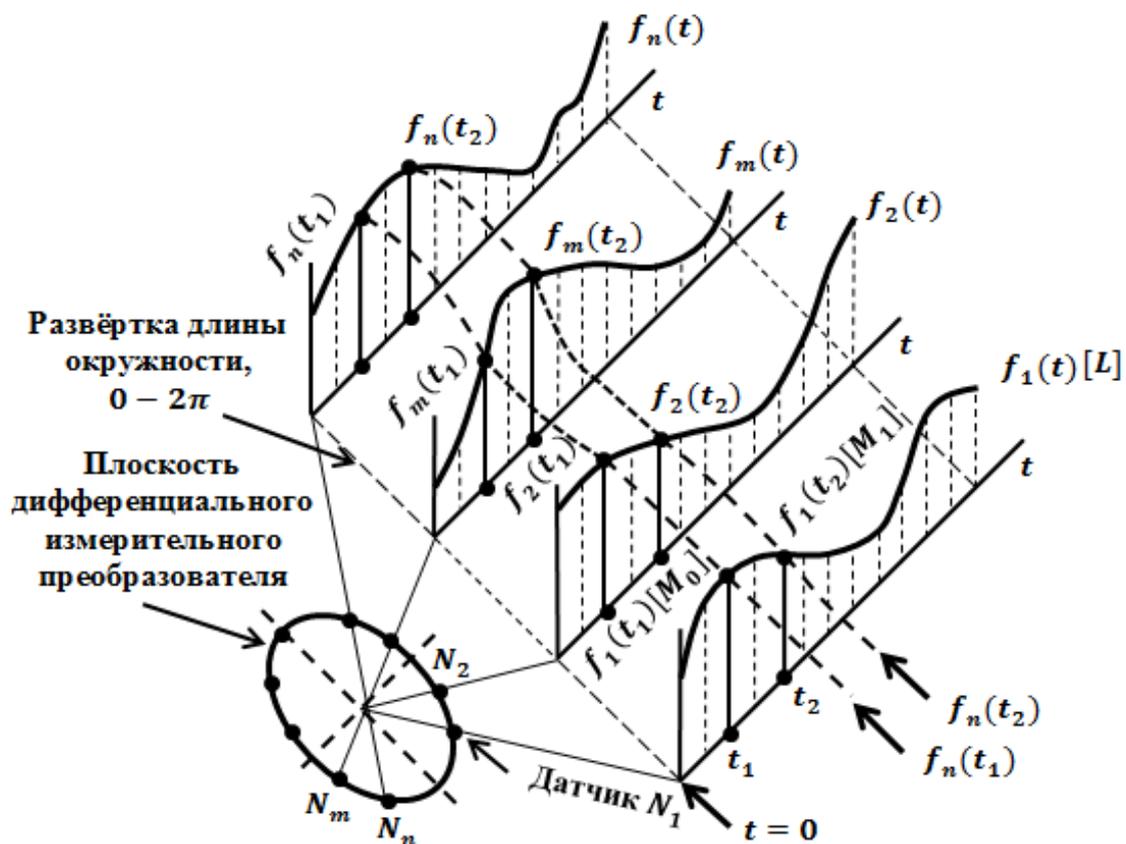


Рисунок 4. Множество кривых дифференциального измерительного преобразователя, характеризующее скалярное геофизическое поле ствола скважины сложной геометрии и пространственной ориентации.

Обработку и интерпретацию кривых (Рисунок 4), проводят в два этапа. На первом, подготовительном этапе обработки результатов исследований определяется значение градиента функции, направление ее изменения и формируется эталонный (симметричный) интервал ствола скважины. На втором, основном этапе, по полученным результатам, определяются погрешности скалярного геофизического поля, вызванные геометрией ствола скважины и ориентацией измерительного зонда относительно ее стенок, интерпретируются скалярные физические величины геофизических полей ствола скважины. Рассмотрим

первый, подготовительный этап, который предназначен для аналитической обработки кривых и подготовки данных к интерпретации.

I. Предварительную обработку результатов исследований проводят в декартовой прямоугольной системе координат, так как в декартовых координатах все уравнения выглядят значительно проще, чем в цилиндрических, сферических и т. п. Первой обрабатывается кривая функции  $f_1(t)$ , так как устройством гравитационной навигации датчик  $N_1$  всегда ориентирован к нижней стенке наклонно направленной или горизонтальной скважины. Это условие позволяет специальному электронному устройству, расположенному в измерительном канале датчика  $N_1$ , вырабатывать синхронизирующие импульсы, которые дают возможность опознавать номер любого другого датчика дифференциального измерительного преобразователя и отслеживать его положение в стволе скважины. Кроме того, значения скалярной функции  $f_1(t)$ , в отличие от других функций, в большинстве случаев имеют максимальные значения. Учитывая, что функция  $f_1(t)$  имеет непрерывные производные по параметру  $t$ , а замкнутый интервал  $t_1 \leq t \leq t_2$ , каким бы малым он не был, из точек функций  $f_1(t_1)$  и  $f_1(t_2)$  образует замкнутую дугу  $C$ , примем за новый параметр длину дуги  $f_1(t_2) - f_1(t_1) = C = s$ , тогда будет справедливо соотношение [3, с. 521]:

$$s \equiv \int_C ds \equiv \int_C \sqrt{d\vec{r} \cdot d\vec{r}} = \int_C \sqrt{ds^2 + dy^2 + dz^2} = \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} dt. (*)$$

В соотношении (\*) элемент дуги  $ds$  выбирается произвольно и определяет положительное направление на кривой и касательной к ней, функции  $f_1(t)$ .

Учитывая условие (\*), необходимо исследовать, как изменяется функция  $f_1(t)$  при переходе от одной точки ее кривой к другой точке. Для этого, значение функции  $f_1(t_1)$  в момент времени  $t_1$  обозначим точкой  $M_0$ , а значение функции  $f_1(t_2)$  в момент времени  $t_2$  обозначим точкой  $M_1$  (рис. 4), а саму функцию  $f_1(t)$  обозначим как кривую  $L$ .

Через точку  $M_0$  проведем касательную к кривой  $L$ . Положительное значение касательной определим в направлении от точки  $M_0$  к точке  $M_1$  и составим соотношение:

$$\frac{f_1(t_2) - f_1(t_1)}{\overline{M_0M_1}} = \frac{f_1(M_1) - f_1(M_0)}{s}, \quad (1)$$

где  $\overline{M_0M_1} = s$  — длина дуги кривой между точками  $M_0$  и  $M_1$ .

В этом случае, предел отношения функции к скалярному аргументу (1) будет равен:

$$\lim_{M_1 \rightarrow M_0} \frac{f_1(t_2) - f_1(t_1)}{\overline{M_0M_1}} = \frac{\partial f_1(t_1)}{\partial s} = \frac{\partial f_1(M_0)}{\partial s}. \quad (2)$$

Величина  $\frac{\partial f_1(M_0)}{\partial s}$ , в правой части соотношения (2), определенная для точки  $M_0$  и заданного направления на кривой, указывает скорость изменения функции  $f_1(t_1)$  в этой точке по заданному направлению, при этом производная  $\frac{\partial f_1(M_0)}{\partial s}$  не является функцией только точки, она является функцией и точки, и направления. Это очень важное аналитическое замечание, необходимое для интерпретации кривых.

Далее, принимая некоторую точку кривой  $L$  за полюс, вводим радиус-вектор  $\vec{r}(M)$ , который будет указывать положение каждой точки  $M$  на кривой  $L$ , чему будут соответствовать определенные числа  $s$ , выражающие величину дуг  $\overline{M_0M_1}$ ,  $\overline{M_1M_2}$ , ...,  $\overline{M_mM_n}$  кривой  $L$ . В этом случае радиус-вектор  $\vec{r}$  множества точек  $M$  кривой  $L$  будет выражать в общем виде вектор-функцию скалярного аргумента  $s$ , т. е.  $\vec{r} = \vec{r}(s)$ .

Из курса математического анализа известно, если приращение аргумента стремится к нулю,  $\Delta s \rightarrow 0$ , то предел отношения функции к аргументу равен единице:  $\lim_{\Delta s \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta \vec{r}(s)}{\Delta s} \right| = 1$  [4, с. 45]. Следовательно, будет справедливо равенство:

$$\lim_{\Delta s \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta \vec{r}(s)}{\Delta s} \right| = \left| \frac{d\vec{r}(s)}{ds} \right| = 1. \quad (3)$$

Величина  $\left| \frac{d\vec{r}(s)}{ds} \right|$  в равенстве (3) выражает значение единичного вектора  $\vec{s}^0$  касательной к кривой  $L$  в точке  $M_0$ , а эта линия есть прямая, которая с направляющими векторами  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$  и  $\vec{k}$  образует углы:

$$\frac{d\vec{r}(s)}{ds} \vec{i} = \cos \alpha; \quad \frac{d\vec{r}(s)}{ds} \vec{j} = \cos \beta; \quad \frac{d\vec{r}(s)}{ds} \vec{k} = \cos \gamma. \quad (4)$$

Для определения производной от функции  $f_1(M_0)$  в точке  $M_0$  по направлению единичного вектора  $\vec{s}^0$ , касательного в точке  $M_0$  к кривой  $L$ , с учетом соотношений (2) и (4) в декартовой прямоугольной системе координат составим уравнение в виде:

$$\frac{\partial f_1(M_0)}{\partial s} = \frac{\partial f_1(M_0)}{\partial x} \cos \alpha + \frac{\partial f_1(M_0)}{\partial y} \cos \beta + \frac{\partial f_1(M_0)}{\partial z} \cos \gamma. \quad (5)$$

Из уравнения (5) следуют важные выводы:

1) функция  $f(M_0)$ , дифференцируемая в точке  $M_0$ , имеет производную по любому направлению, выходящему из точки  $M_0$ ;

2) для всех линий  $L$  (функций  $f_1(t), f_2(t), \dots, f_m(t), f_n(t)$ ), выходящих из точки  $M_0$  и имеющих одну и ту же касательную, величина производной  $\frac{\partial f(M_0)}{\partial s}$  остается одной и той же, так как эта производная  $\frac{\partial f(M_0)}{\partial s}$  в точке  $M_0$  зависит только от направляющих углов  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  касательной;

3) в уравнение (5) входят два вектора:

$$\vec{s}^0 = \vec{i} \cos \alpha + \vec{j} \cos \beta + \vec{k} \cos \gamma; \quad (6.1)$$

$$\frac{\partial f(M_0)}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial f(M_0)}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial f(M_0)}{\partial z} \vec{k}. \quad (6.2)$$

Вектор (6.2) представляет собой градиент скалярной функции в точке  $M_0$ ,  $\text{grad } f(M_0)$  по направлению касательной [4, стр. 247]:

$$\frac{\partial f(M_0)}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial f(M_0)}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial f(M_0)}{\partial z} \vec{k} = \text{grad } f(M_0) \quad (7)$$

С учетом соотношений (6.1), (6.2) и (7) уравнение (5) можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial f_1(M_0)}{\partial s} = \left( \frac{\partial f_1(M_0)}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial f_1(M_0)}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial f_1(M_0)}{\partial z} \vec{k} \right) (\vec{i} \cos \alpha + \vec{j} \cos \beta + \vec{k} \cos \gamma) \quad (8)$$

или в свернутом виде:

$$\frac{\partial f_1(M_0)}{\partial s} = \text{grad } f_1(M_0) \vec{s}^0. \quad (9)$$

Учитывая, что из соотношения (9), можно получить соотношение:

$$\frac{\partial f_1(M_0)}{\partial s} = |\text{grad } f_1(M_0)| |\vec{s}^0| \cos(\text{grad } f_1(M_0), \vec{s}^0), \quad (10)$$

где  $\cos(\text{grad } f_1(M_0), \vec{s}^0)$  — угол между направлением изменения скалярной функции в точке  $M_0$  и единичным вектором  $\vec{s}^0$ ;

то приходим к следующим важным замечаниям необходимым для интерпретации:

– производная  $\frac{\partial f_1(M_0)}{\partial s}$  достигает наибольшего значения в направлении единичного вектора  $\vec{s}^0$ , совпадающего с направлением касательной к скалярной функции  $\text{grad } f_1(M_0)$  в точке  $M_0$ ;

– вектор направления изменения скалярной функции  $\text{grad } f_1(M_0)$  от выбора системы координат не зависит. Этот аргумент основан на факте, что проекция  $\text{grad } f_1(M_0)$  на любое направление  $\vec{s}^0$ , выходящее из точки  $M_0$ , равна  $\frac{\partial f_1(M_0)}{\partial s}$ , а  $\frac{\partial f_1(M_0)}{\partial s}$  определяется независимо от системы координат.

На основе этих замечаний, характеризующих функцию  $f_1(t)$ , временно замещаем ею все остальные функции, т. е. измерительным каналам остальных функций временно будет присвоено значение функции  $f_1(t)$ :

$$f_1(t) = f_2(t) = \dots = f_m(t) = f_n(t). \quad (11)$$

Такая операция позволит создать симметричный эталон интервала скважины в декартовой прямоугольной системе координат, и будет определять метрологию ДИПа в скважине сложной конфигурации. По методике, определяемой соотношениями (1)–(10) обрабатываем функции  $f_1(t)$ ,  $f_2(t)$ ,  $\dots$ ,  $f_m(t)$ ,  $f_n(t)$ , вводим обозначение  $\mathfrak{A}_1 = f_1(t)$ ,  $\mathfrak{A}_2 = f_2(t)$ ,  $\dots$ ,  $\mathfrak{A}_m = f_m(t)$ ,  $\mathfrak{A}_n = f_n$  и составляем два множества:

$$\mathfrak{A}_{(x,y,z)} = \{\mathfrak{A}_{k(x,y,z)}: \mathfrak{A}_1(x,y,z) \leq \mathfrak{A}_{k(x,y,z)} \leq \mathfrak{A}_n(x,y,z)\}; \quad (12.1)$$

$$\text{grad } \mathfrak{A}_{(x,y,z)} = \{\text{grad } \mathfrak{A}_{k(x,y,z)}: \text{grad } \mathfrak{A}_1(x,y,z) \leq \text{grad } \mathfrak{A}_{k(x,y,z)} \leq \text{grad } \mathfrak{A}_n(x,y,z)\}, \quad (12.2)$$

где  $\mathfrak{A}_{(x,y,z)}$  — множество измеренных значений в декартовой системе координат;

$\text{grad } \mathfrak{A}_{(x,y,z)}$  — множество, обработанных значений функций  $\mathfrak{A}_{(x,y,z)}$  в декартовой системе координат.

Далее значения элементов множества  $\mathfrak{A}_{(x,y,z)}$  приводим к криволинейной ортогональной системе координат, а именно: если  $M(x, y, z)$  декартовы прямоугольные координаты точки  $M$ , то  $M(q_1, q_2, q_3)$  криволинейные ортогональные координаты точки  $M$ . В этом случае для обеих координатных систем элемент длины  $ds$  будет определяться соотношением [5, с. 769]:

$$ds = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2} = \sqrt{H_1^2 dq_1^2 + H_2^2 dq_2^2 + H_3^2 dq_3^2}, \quad (13)$$

где  $H_1, H_2, H_3$  — метрические коэффициенты (коэффициенты Ламэ).

Учитывая, что декартова прямоугольная система координат и произвольная криволинейная ортогональная системы координат связаны соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} x &= x(q_1, q_2, q_3); \\ y &= y(q_1, q_2, q_3); \\ z &= z(q_1, q_2, q_3); \end{aligned} \right\} \begin{aligned} q_1 &= q_1(x, y, z); \\ q_2 &= q_2(x, y, z); \\ q_3 &= q_3(x, y, z), \end{aligned} \quad (14)$$

и что в декартовой прямоугольной системе координат метрические коэффициенты равны  $x = H_1 = 1$ ,  $y = H_2 = 1$ ,  $z = H_3 = 1$ , для вычисления метрических коэффициентов в любой криволинейной ортогональной системе координат из соотношения (13) и (14) получим формулу:

$$H_i = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial q_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial q_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial q_i}\right)^2}, \quad (\text{здесь } i = 1, 2, 3). \quad (15)$$

Сформировав, таким образом, аналитическую вычислительную систему, переходим к заключительному этапу обработки результатов исследований — к интерпретации скалярных величин геофизического поля в створе скважины сложной геометрии и пространственной ориентации.

II. Интерпретация результатов исследований сводится к следующим операциям.

1) Используя связь декартовых  $(x, y, z)$  и цилиндрических  $(\rho, \varphi, z)$  координат, которая определяется соотношением:

$$\left. \begin{aligned} x &= \rho \cos \varphi; \\ y &= \rho \sin \varphi; \\ z &= z, \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

приводим множества (12.1) и (12.2) к виду:

$$\mathfrak{A}_{(\rho, \varphi, z)} = \{\mathfrak{A}_k(\rho, \varphi, z): \mathfrak{A}_1(\rho, \varphi, z) \leq \mathfrak{A}_k(\rho, \varphi, z) \leq \mathfrak{A}_n(\rho, \varphi, z)\}; \quad (17.1)$$

$$\text{grad } \mathfrak{A}_{(\rho, \varphi, z)} = \{\text{grad } \mathfrak{A}_k(\rho, \varphi, z): \text{grad } \mathfrak{A}_1(\rho, \varphi, z) \leq \text{grad } \mathfrak{A}_k(\rho, \varphi, z) \leq \text{grad } \mathfrak{A}_n(\rho, \varphi, z)\}. \quad (17.2)$$

Учитывая, что в скважинах сложной геометрии и пространственной ориентации условие (11), естественной средой ствола скважины преобразуется в неравенство:

$$f_1(t) \neq f_2(t) \neq \dots \neq f_m(t) \neq f_n(t), \quad (18)$$

для множества (17.1), по формуле (15), вычисляем метрические коэффициенты. Из условия (18), следует, в асимметричном пространстве, равноправие точек и направлений нарушается, поэтому и метрические коэффициенты примут значения  $H_{[(i)]_1} \neq H_{[(i)]_2} \neq \dots \neq H_{[(i)]_m} \neq H_{[(i)]_n}$ , здесь  $(i = 1, 2, 3)$ . В этом случае и для частных значений метрических коэффициентов осей  $(q_1, q_2, q_3)$  криволинейной ортогональной системы координат будет сохраняться неравенство  $H_1 \neq H_2 \neq H_3$ . То есть, любая точка асимметричного пространства будет полностью характеризоваться неравенством трех метрических коэффициентов  $H_1, H_2, H_3$  геофизического поля скалярной физической функции в створе скважины сложной геометрии.

Вектор (7), представленный градиентом скалярной функции в точке  $M_0$  в декартовой прямоугольной системе координат,  $\text{grad } f(M_0)$ , в цилиндрических координатах, для функции  $\mathfrak{A}_1 = f_1(t)$ , будет иметь вид:

$$\text{grad } \mathfrak{A}_{1(\rho, \varphi, z)} = \frac{\partial \mathfrak{A}_{1(\rho, \varphi, z)}}{\partial \rho} \vec{e}_1 + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \mathfrak{A}_{1(\rho, \varphi, z)}}{\partial \varphi} \vec{e}_2 + \frac{\partial \mathfrak{A}_{1(\rho, \varphi, z)}}{\partial z} \vec{e}_3, \quad (19)$$

где  $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$  — единичные векторы цилиндрической системы координат.

Таким образом, соотношение (19) будет определять метрологию для ДИПа, за основу которой принят симметричный эталон интервала скважины в цилиндрических координатах.

2) Учитывая, что градиенту скалярной функции  $\text{grad } \mathcal{A}_1(\rho, \varphi, z)$  присвоен статус эталона в стволе исследуемой скважины, составляем систему неравенств:

$$\text{grad } \mathcal{A}_k(\rho, \varphi, z) \begin{cases} < \text{grad } \mathcal{A}_1(\rho, \varphi, z); \\ = \text{grad } \mathcal{A}_1(\rho, \varphi, z); \\ > \text{grad } \mathcal{A}_1(\rho, \varphi, z). \end{cases} \quad (\text{здесь } \mathcal{A}_k(\rho, \varphi, z) = \mathcal{A}_2(\rho, \varphi, z), \dots, \mathcal{A}_m(\rho, \varphi, z), \mathcal{A}_n(\rho, \varphi, z)). \quad (20)$$

В результате система неравенств (20) определяет полную характеристику геофизического поля скалярной физической величины области ствола скважины, ограниченной радиусом чувствительности дифференциального измерительного преобразователя скважинной телеметрической системы. В этом случае, относительно эталона (19), система неравенств (20) позволяет вычислить параметры геометрии ствола скважины и ориентацию измерительного зонда относительно стенок ствола скважины. Это дает возможность учесть их негативное влияние и исключить из вычислительного процесса при интерпретации результатов исследований методом дифференциальной телеметрии ствола скважин сложной геометрии и пространственной ориентации.

### Выводы

1. Отработанные десятилетиями стандартные технологии исследований вертикальных скважин, телеметрические системы и метрологическое обеспечение не вполне отвечают современным требованиям геофизических исследований наклонно направленных и горизонтальных скважин.

2. Используя стандартные телеметрические системы, адаптированные к системам дифференциальной телеметрии, при условии необходимого метрологического обеспечения, стандартные технологии исследования скважин могут быть выведены на принципиально новый уровень своего развития. Такой научно-инженерный подход к решению проблем нефтепромысловой геофизики позволит значительно повысить качество результатов геофизических исследований в скважинах со стволом сложной геометрии и пространственной ориентации.

3. Современные компьютерные системы, программные комплексы и информационные технологии позволяют перейти от стандартных методов интерпретации результатов геофизических исследований к более современным методам интерпретации, опираясь на теорию интегрального и дифференциального исчисления, векторный и тензорный анализ, и фундаментальные теории математической физики.

### Список литературы:

1. Временное методическое руководство по применению скважинного акустического телевизора и интерпретации получаемых данных. Уфа: ОАО «Научно-производственная фирма «Геофизика»», 2004. 51 с.

2. Кузьмина И. В. Принцип измерения и вычисление параметров, по данным дифференциальной телеметрии, характеризующих фактическую конфигурацию ствола наклонно направленных скважин с горизонтальным окончанием // Международная научно-практическая конференция «Перспективы модернизации современной науки» (10 ноября 2015 г., Москва): сборник статей. М.: РИО ЕФИР, 2015. 158 с.

3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров: Определения, теоремы, формулы. 5-е изд. М.: Наука, 1984. 832 с.

4. Пискунов Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисления. В 2-х т. Т. 1. М.: Интеграл-Пресс, 2005. 416 с.

5. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. 7-е изд. М.: Издательство МГУ; Наука, 2004. 798 с.

*References:*

1. Vremennoe metodicheskoe rukovdstvo po primeneniyu skvajinnogo akusticheskogo televizora y interpretajii poluchaemih dannih (Temporary methodological guidance on the application of downhole acoustic TV and interpretation of the data). Ufa: Geofizika, 2004. 51 p. (In Russian).

2. Kuzminova I. V. Prinjip izmereniya y vichislenie parametrov, po dannim differenjalnoy telemetrii, harakterizuyujih facticheskuyu konfigurajiyu stvola naklonno napravlennih skvajin s gorizontalnim okonchaniem (The principle of measurement and calculation parameters, according to the differential telemetry describing the actual configuration of the trunk slant wells with a horizontal). “Perspekyivi modernizajii sovremennoi nauki” (“Prospects for the modernization of modern science”): collection of papers of the international scientific–practical conference (10 November, 2015, Moscow). Moscow, EFIR, 2015, 158 p. (In Russian).

3. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike dlya nauchnih rabotnikov i injenerov: Opredeleniya, teremi, formuli (Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: definitions, theorems, formulas). 5th publ. Moscow, Nauka, 1984, 832 p. (In Russian).

4. Piskunov N. S. Differenjalnoe i intehralnoe ischisleniya (Differential and integral calculus). In 2th v. V. 1. Moscow, Integral–Press, 2005, 461 p. (In Russian).

5. Tikhonov A. N., Samarskiy A. A. Uravneniya matematicheskoy fiziki (Equations of mathematical physics). 7th publ. Moscow, MGU, Nauka, 2004, 798 p. (In Russian).

*Работа поступила  
в редакцию 24.01.2017 г.*

*Принята к публикации  
27.012.2017 г.*

---

*Ссылка для цитирования:*

Кузьминова И. В. Обработка и интерпретация результатов исследований ствола горизонтальных скважин методом дифференциальной телеметрии с гравитационной навигацией // Бюллетень науки и практики. Электрон. журн. 2017. №2 (15). С. 26–36. Режим доступа: <http://www.bulletennauki.com/kuzminova> (дата обращения 15.02.2017).

*Cite as (APA):*

Kuzminova, I. (2017). Processing and interpretation of research results of stem horizontal wells differential telemetry method with gravitational navigation. *Bulletin of Science and Practice*, (2), 26–36. Available at: <http://www.bulletennauki.com/kuzminova>, accessed 15.02.2017. (In Russian).