

DOI: 10.15593/2224-9923/2014.13.3

УДК 621.3.049:621.3.088.7

© Цветков Г.А., Шумилов А.В., Черных И.А., 2014

## ОЦЕНКА ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРАМЕТРОВ КОНТРОЛЯ УГЛОВЫХ ОТКЛОНЕНИЙ УСТАНОВОЧНЫХ ПЛОЩАДОК НАЧАЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ ТИЛТМЕТРОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА

Г.А. Цветков, А.В. Шумилов\*, И.А. Черных\*\*

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия

\*ОАО «Пермнефтегеофизика», Пермь, Россия

\*\*ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ», Пермь, Россия

На основании проведенных исследований, анализа контроля параметров гидроразрыва пласта (ГРП) решается проблема создания автоматизированной измерительной системы с использованием приборов и средств инерциальной навигации, позволяющей повысить точность измерения углового рассогласования установочных площадок под приборы научной аппаратуры с учетом динамической погрешности измерения. Расширение функциональных возможностей измерительной системы достигается за счет дополнительного измерения пространственных угловых отклонений, угла азимутального рассогласования установочных площадок.

В работе проведена оценка точностных характеристик пространственных угловых отклонений установочных площадок под приборы ГИС от ошибок калибровки, неточности установки, углов наклона, неверной начальной ориентации приборов. Предложено использовать методологию разработки измерительной системы в решении проблемы ориентации тилтметров, приборов контроля и диагностики развития трещин при гидроразрыве пласта, с учетом оценки погрешностей, не учитываемых при проведении ГРП. Эта методология контроля позволит решить проблему обеспечения точности измерения параметров процесса проведения ГРП правильной установкой тилтметров, их ориентацией (при регистрации микросейсмов и измерении углов деформации отложений) как на дневной поверхности, так и в скважине, выполнением требований по установке тилтметров в нулевое (исходное) положение и в положение, при котором их взаимно перпендикулярные оси измерения ( $X$  и  $Y$ ) были точно ориентированы относительно сторон света. Предложенный метод контроля параметров углового рассогласования установочных площадок может быть распространен в машиностроении, станкостроении, геологии и геофизике, при построении нефтегазовых скважин.

**Ключевые слова:** измерительные навигационные головки, тилтметр, скважина, неточность координат и ориентация приемников, акселерометр, ориентация, пространственные угловые отклонения от горизонта и по азимуту, азимутальное рассогласование установочных площадок под приборы контроля и диагностики развития трещин.

## EVALUATION OF ACCURACY PARAMETERS OF CONTROLLING ERROR ANGLES OF THE PLATES FOR INITIAL TILTMETER ORIENTATION IN HYDROFRACTURING

G.A. Tsvetkov, A.V. Shumilov\*, I.A. Chernykh\*\*

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

\*OJSC "Permneftegeofizika", Perm, Russian Federation

\*\*LLC "LUKOIL-PERM", Perm, Russian Federation

Drawing on the research performed and the analysis of the control of hydrofracturing parameters, a problem is being solved of designing an automated measuring system making use of instruments and tools of inertial navigation which permit a higher accuracy of measuring error angles of mounting the plates for research equipment, considering dynamic measurement error. Enhanced features of the measurement system are provided by additional measurement of spatial angular deviations and azimuth misalignment angle of the plates.

The paper evaluates accuracy parameters of spatial angular deviations of the plates for GIS-tools from calibration errors, installation errors, tilt angles, initial tool misorientation. It is suggested to apply methodology of measurement system development to solve the problem of orientation of tiltmeters, instruments for control and monitoring of fracture growth following hydrofracturing, taking account of tolerances not considered during hydrofracturing. The methodology allows solving the problem of assuring accuracy in measuring parameters of hydrofracturing due to proper tiltmeters installation and orientation (during microseismic logging and measurement of deposit's deformation angles) both on daylight surface and inside a well; due to meeting requirements to set tiltmeters into a null (initial) position and the position in which their mutually perpendicular axes ( $X$  and  $Y$ ) are precisely aligned with the cardinal directions. The method to control angle-error parameters of the plates may be of use to machine construction, machine-tool manufacture, geology and geophysics, oil-and-gas well construction.

**Keywords:** measuring navigation heads, tiltmeter, well, coordinate inaccuracy and receiver orientation, accelerometer, orientation, spatial azimuth and horizon angle deviations, azimuth misalignment angle of the plates for the equipment to control and analyze a fracture growth.

## Введение

Гидроразрыв пласта (ГРП) является одним из основных методов интенсификации добычи нефти или газа из месторождений, коллекторы которых – песчаники и карбонаты – характеризуются высокой плотностью и низкой проницаемостью. Цель проведения гидроразрыва в коллекторе – максимальное увеличение его проницаемости и площади дренирования без выхода создаваемой для этого системы трещин за пределы коллектора. Достижение указанных целей может быть обеспечено контролем процесса гидроразрыва и управлением его направленностью в реальном времени. Наиболее эффективными методами, решающими эту задачу, являются регистрация микросейсмов и измерение углов деформации отложений (*tilt measuring*). Эта возможность создала предпосылки для разработки технологии управления развитием трещин, имеются сообщения о проведении мониторинга ГРП в США. На основании этого можно сделать следующие выводы:

1. Разработаны системы измерения как в скважинах, так и на поверхности. Измерение углов деформации выполняются высокочувствительными тилтметрами, обработка данных с помощью программного обеспечения, построенного на теоретических и модельных исследованиях, производится в реальном времени.

2. Методы мониторинга ГРП и картирования зон разрыва дополняют друг друга, а при совместном рассмотрении устраняют ряд неопределенностей.

3. Способность управления развитием трещин является основой повышения эффективности, предсказуемости и экологической безопасности результатов ГРП, способствует более широкому применению геофизических методов мониторинга гидроразрывов.

*Эти технологии имеют определенные ограничения и требуют совершенствования, они открывают широкие*

*возможности для управления развитием системы трещин.*

Ошибки измерения включают ошибки калибровки, неточности установки и неверную начальную ориентацию тилтметров.

Исключительно важной для обеспечения точности измерения является правильная установка тилтметров как на дневной поверхности, так и в скважине. Требования к установке тилтметров состоят в том, чтобы, во-первых, исходное положение обоих сенсоров отвечало нулевым показаниям и, во-вторых, взаимно перпендикулярные оси измерения ( $X$  и  $Y$ ) были точно ориентированы относительно сторон света.

Для решения вышеуказанных задач предлагается создание измерительной системы контроля пространственных угловых отклонений установочных площадок под приборы научной аппаратуры, тилтметры, при проведении ГРП для их правильной ориентации и установки как на дневной поверхности, так и в скважине.

В работах [1–5] приведена методология контроля пространственных угловых отклонений установочных площадок под приборы системы измерений и управления, показана автоматизированная измерительная система с навигационной системой управления (НСУ)<sup>1</sup>.

Предложено использовать методологию создания измерительной системы в решении проблемы ориентации тилтметров, приборов контроля и диагностики развития трещин при гидроразрыве пласта, оценки и учета погрешностей, не учитываемых при проведении ГРП.

## Проблема контроля параметров ГРП

В работах [6–18] на основании проведенного анализа (по материалам зарубежной печати) контроль гидроразрыва в реальном времени производится путем

<sup>1</sup> Устройство для измерения пространственных угловых отклонений: пат. RU 2495 374 С1 / Цветков Г.А., Утробин Г.Ф., Федорова Е.А.; заявл. от 30.03.2012.

измерения возникающих при образовании трещин микросейсмиков и углов деформации окружающей среды и является сегодня единственным способом непосредственной оценки области распространения трещин, их размера и ориентации. Выполнение этих исследований в реальном времени создает предпосылки для управления процессом распространения трещин в коллекторе.

*Измерение углов деформации.* Измерение углов деформации осуществляется специальным прибором – наклономером, или, иначе, тилтметром (*tiltmeter*). Каждый тилтметр имеет два сенсора, измеряющих угол наклона в двух взаимно перпендикулярных направлениях  $X$  и  $Y$ . Чувствительность таких сенсоров исключительно высока и составляет единицы нанорадиана, т.е.  $5,7 \cdot 10^{-8}$  град.

Измерения тилтметрами проводятся как на поверхности, так и в скважинах [12, 13, 19]. Тилтметры выполняются в виде отдельных блоков, каждый из которых содержит два сенсора, источник питания, электронную схему измерения и систему передачи информации. Диаметр тилтметров лежит в пределах 2,5–3 дюймов. Тилтметры, предназначенные для измерений в скважинах, рассчитаны на давление 70–100 МПа и температуру 125–150 °С. Для измерения углов деформации применяются два способа размещения тилтметров – на дневной поверхности и в наблюдательной скважине (*monitor well*), расположенной вблизи от рабочей скважины (*treatment well*), в которой производится разрыв [7, 10, 14, 17].

Тилтметры распределяются с определенным шагом в интервале, охватывающем сверху и снизу область предполагаемого развития трещин, и прижимаются к колонне с помощью стандартных пружинных центраторов или магнитов [11, 12, 16, 18].

Требования к установке тилтметров состоят в том, чтобы, во-первых, исходное положение обоих сенсоров отвечало

нулевым показаниям и, во-вторых, взаимно перпендикулярные оси измерения ( $X$  и  $Y$ ) были точно ориентированы относительно сторон света. Увеличение размера трещины приводит к соответствующему, положительному или отрицательному, наращиванию угла деформации в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

*Внешние помехи.* Наблюдаемая в процессе гидроразрыва картина изменения углов деформации осложнена внешними помехами, которые особенно сильно проявляются при наземных измерениях, характеризующихся слабыми сигналами. К таким помехам относятся, например, пики изменения углов деформации, вызванные низкочастотными колебаниями оснований, проездом одиночных груженых грузовиков, более плавные изменения, связанные с движением железнодорожных составов, значительные периодические изменения, являющиеся следствием приливных явлений в земной коре, и изменением уровня грунтовых вод при их отборе (рисунок). Все возможные виды помех необходимо определять до начала измерений, чтобы выделить их при обработке данных.

*Ошибки в картировании тилтметрами системы трещин* [7, 10, 13–15, 17] могут быть сведены в две основные группы: ошибки измерения и ошибки модели. Ошибки измерения включают ошибки калибровки, неточности установки и неверную начальную ориентацию тилтметров, низкочастотные колебания, внешние помехи, т.е. другие, помимо образования трещин, причины деформации поверхности. Суммарное действие ошибок измерения и моделирования приводит к некоторой неопределенности результатов картирования трещин.

Оценка неопределенности результатов картирования, вызванная ошибками разного рода, осуществляется методом Монте-Карло на основе представлений, что каждое измерение деформации тилтметром содержит случайные ошибки.

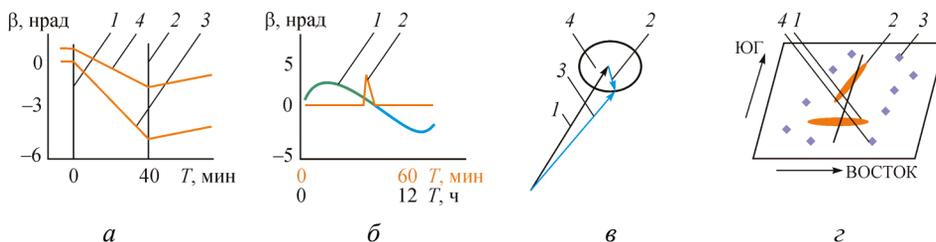


Рис. Результаты измерения углов деформации (по материалам [6–18]): а – измерение двухкомпонентным тилтметром: 1, 2 – соответственно начало и конец нагнетания жидкости разрыва; 3, 4 – изменение углов деформации по осям X и Y до, в процессе и после нагнетания жидкости разрыва; б – характер внешних помех: 1 – изменение угла деформации, вызванное приливными явлениями; 2 – помехи, вызванные проездом груженого транспорта; в – оценка неопределенности результатов измерения: 1 – истинное положение вектора угла деформации; 2 – вектор случайной ошибки измерения; 3 – результат измерения, искаженный случайной помехой; 4 – область неопределенности; з – схема расположения результатов на планшете: 1, 2 – соответственно поперечная и продольная трещины; 3 – точки расположения тилтметров; 4 – направление ствола горизонтальной скважины

Величина случайных ошибок оценивается экспериментально. Для этого до начала гидроразрыва в течение 24 ч тилтметрами регистрируются углы деформаций, вызванных различными, в том числе внешними, причинами, а затем вычисляется их среднее значение и среднеквадратическое отклонение. По результатам такого многократного моделирования определяются стандартные отклонения параметров трещин, которые принимаются за меру неопределенности.

### Приборы регистрации и измерения микросейсм

Регистрация микросейсм, возникающих в рабочей скважине, осуществляется трехкомпонентными гидрофонами или акселерометрами, которые помещаются в соседнюю наблюдательную скважину на разных уровнях либо на поверхности над зоной разрыва.

Вертикальное размещение комплекта приемников в наблюдательной скважине должно быть таким, чтобы охватывать зону разрыва сверху и снизу, что позволяет судить с одинаковой уверенностью о распространении трещин и вверх, и вниз. Такое условие в наблюдательной скважине не всегда достижимо по техническим причинам. Приемники могут быть размещены как в вертикальных, так

и в наклонных скважинах, а также в горизонтальном стволе, куда они вводятся специальными средствами, например с помощью скважинного трактора.

Эффективность регистрации микросейсм зависит от характеристик приемников. Существует два основных типа приемников, применяемых для мониторинга гидроразрыва: всенаправленные геофоны и акселерометры.

Определение гипоцентра микросейсма основано на допущении, что источник микросейсма является точечным. Он возбуждает в однородной изотропной среде как продольные, так и поперечные волны, которые регистрируются в наблюдательной скважине или на поверхности каждым из трехкомпонентных приемников с ортогональными осями X, Y, Z [11, 12, 18]. Направление на точку возникновения микросейсма, т.е. азимут и угол наклона прямой, соединяющей приемник и источник микросейсма, определяется из диаграмм поляризации (направленности движения) частиц среды в функции времени, вызванных продольной волной. Диаграмма поляризации – годограмма (*hodogram*) – представляет собой 2D-кросс-плоты волновых форм в плоскостях X–Y, X–Z, Y–Z в интервале времени вокруг момента вступления. Она дает возможность опре-

делять направление лучей (азимут, угол) от приемника до гипоцентра микросейсма, так называемую обратную проекцию (*back-projection*). Для правильного определения местонахождения источника микросейсма необходимо точное знание акустической скорости среды и ориентации приемников, расположенных в скважине или на поверхности.

Определение горизонтальных скоростей осуществляется обычно одновременно с определением ориентации приемников путем регистрации мощного акустического сигнала, направленного в приемники из точки с известными координатами. Источником такого сигнала может быть, например, перфорация, проведенная на заданной глубине в рабочей скважине. При этих измерениях фиксируются как момент выстрела, так и время первых вступлений продольных и поперечных волн. Поскольку расстояние между приемниками и местом перфорации известно, по этим данным определяется скорость продольных и поперечных волн в пространстве между точкой взрыва и приемниками. Соотношение сигналов, зарегистрированных каждым приемником, дает возможность определить, как ориентированы сенсором оси приемников  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  относительно направления на источник сигнала.

*Измерение микросейсм.* Локализация серии микросейсм, происходящих в процессе проведения гидроразрыва, осуществляется на основе алгоритмов, обрабатывающих комплекс измеряемых и априорных данных. К числу измеряемых данных относятся время вступления продольных и поперечных волн, их амплитуда, фаза и другие характеристики. Априорные данные включают скоростную характеристику среды между контрольной скважиной и зоной разрыва, координаты наблюдательных скважин, их угол и азимут наклона, а также ориентацию осей приемников.

*Оценка неопределенности в положении источника микросейсма, вызванная*

*ошибками измерения, неточностью априорных данных, используемых в вычислениях, и идеализацией модели.*

В работах [6, 13, 15] приводятся основные компоненты неопределенности и способы их устранения или подавления:

- неопределенность траектории скважины (*well path uncertainty*), происходящая от неточности углов наклона и азимута наблюдательной и рабочей скважин;

- неопределенности, вызванные неточностью координат и ориентации приемников (*station distribution bias*);

- неопределенность диаграмм направленности (*hodogram uncertainty*), к которой приводит низкое отношение сигнала к шуму и неоднородность среды вблизи приемников;

- неопределенность регистрации моментов вступления (*time-pick uncertainty*), вызванная в основном низким отношением сигнал/шум;

- неопределенности инверсии (*inversion bias*), обусловленные идеализацией модели и принятыми в алгоритме допущениями;

- неопределенности скоростной модели среды (*velocity model uncertainty*), вносящие основной вклад в ошибку локализации источника микросейсма.

Совместное рассмотрение результатов картирования трещин, полученных измерением углов деформации и анализом микросейсм, может устранить значительную часть неопределенностей в оценке размеров и ориентации зоны разрыва пласта. Практическое решение проблемы комплексирования состоит в объединении сенсоров обоих типов в едином приборе.

В этом приборе каждая пара сенсоров, тилтметр и акселерометр, монтируется в едином блоке, который прижимается к стенке колонны с помощью рычажного прижима. Конструкция таких блоков позволяет пропускать через себя силовые и информационные цепи и соединять в связку определенное число идентичных блоков. Связка ряда комбинированных приборов опускается в на-

блюдательную скважину с заданным числом приборов и заданной апертурой.

Таким образом, задачами совершенствования геофизического контроля гидроразрыва пласта в реальном времени являются:

1. Минимизация ошибок калибровки, неверной начальной ориентации и неточностей установки тилтметров как на дневной поверхности, так и в скважине по горизонту и азимуту. Требования к установке тилтметров состоят в том, чтобы, во-первых, исходное положение обоих сенсоров отвечало нулевым показаниям и, во-вторых, взаимно перпендикулярные оси измерения ( $X$  и  $Y$ ) были точно ориентированы относительно сторон света.

2. Определение и учет влияния низкочастотных колебаний основания, помех, пиков изменения углов деформации, вызванных проездом одиночных груженых грузовиков; более плавных изменений, связанных с движением железнодорожных составов; значительных периодических изменений, являющихся следствием приливных явлений в земной коре и изменения уровня грунтовых вод (неучитываемая динамическая составляющая погрешности измерений).

### **Особенности разработки измерительной системы**

Для решения вышеуказанных задач предлагается создание измерительной системы контроля пространственных угловых отклонений установочных площадок, углов азимутального рассогласования под приборы научной аппаратуры, тилтметры, при проведении ГРП для их правильной ориентации и установки как на дневной поверхности, так и в скважине с учетом динамической составляющей погрешности измерений.

В работах [1–5, 19, 20] и патенте<sup>2</sup> приведена методология контроля прост-

ранственных угловых отклонений установочных площадок под приборы системы измерений и управления, показана автоматизированная измерительная система с навигационной системой управления.

Предложено использовать методологию для создания измерительной системы в решении проблемы ориентации тилтметров, приборов контроля и диагностики развития трещин при гидроразрыве пласта, оценки и учета погрешностей, не учитываемых при проведении гидроразрыва пласта.

### **Состав измерительной системы**

Измерительная система включает в себя две измерительные головки [2, 3], в состав каждой из которых входят: акселерометр типа ЦЕ, установленный на вращающейся платформе, датчик момента ДМ, поворачивающий платформу вокруг вертикальной оси, датчик угла типа ВЕ, измеряющий угол поворота платформы вокруг вертикальной оси. Чувствительным элементом акселерометра является полый цилиндр, установленный в опорах и помещенный в демпфирующую жидкость, поворот цилиндра в пределах  $\alpha_{\max} = \pm 5'$  измеряется фотоэлектронным датчиком угла. Восстанавливающий момент создается датчиком момента. Измерительная система включает в себя, кроме измерительных головок, блок сопряжения, состоящий из усилителя обратной связи акселерометра, АЦП напряжения, контроллера измерительных головок, блоков управления ДМ и ДУ и блока хранения результатов, который автономно подключается к ЭВМ.

Автоматизированная измерительная система предназначена для измерения углов взаимной ориентации установочных площадок под приборы научной аппаратуры летательных аппаратов. Известна система для измерения наклона [1], состоящая из двух идентичных измерительных каналов. Измерительный канал имеет измерительный преобразователь и систему преобразования выход-

<sup>2</sup> Устройство для измерения пространственных угловых отклонений: пат. RU 2495 374 C1 / Цветков Г.А., Утробин Г.Ф., Федорова Е.А.; заявл. от 30.03.2012.

ных сигналов. Недостатком устройства является то, что при больших углах азимутального рассогласования между базовыми осями координат контролируемых площадок и при колебаниях основания возникает динамическая погрешность, снижающая точность измерений.

В работе [1] приведена конструкция одно- и двухкоординатного наклономера, предназначенного для измерения двух пространственных угловых отклонений контрольных площадок от горизонта. Чувствительным элементом устройства является одноосный наклономер с подвесом инерциальной массы на газодинамической опоре.

Конструкция и принцип действия автоматизированной измерительной системы приведены в работе [2] и патенте<sup>3</sup> в которых показаны структурно-функциональная схема автоматизированной измерительной системы контроля пространственных угловых отклонений, процедура функционирования измерительной системы, проведен анализ и представлено теоретическое обоснование определения углов азимутального рассогласования между базовыми осями контролируемых площадок и углов отклонения от горизонта [15].

На основании результатов проведенного исследования можно сделать выводы:

– выявлены закономерности, позволяющие обоснованно подходить к проектированию измерительных систем контроля пространственных угловых отклонений установочных площадок и их ориентации;

– разработанная измерительная система позволяет при наклоне изделия (измерительного модуля) относительно горизонта определить угол азимутального

рассогласования между базовыми осями двух и более контролируемых площадок.

### Оценка точностных характеристик измерительной системы

*Динамическая ошибка измерений углового рассогласования установочных площадок под приборы.* В реальных условиях контроля измерительный модуль может совершать низкочастотные колебания, обусловленные нестабильностью основания, которые приводят к динамической погрешности измерения углового рассогласования. Пусть вдоль оси  $OY_T$  действует ускорение

$$\ddot{y} = a_y \cdot \sin(\omega t + v_y), \quad (1)$$

а вдоль оси  $OX_T$  действует ускорение:

$$\ddot{x} = a_x \cdot \sin(\omega t + v_x), \quad (2)$$

где  $a_x, a_y$  – амплитуды действующих ускорений;  $\omega$  – частота колебаний;  $v_x, v_y$  – начальные фазы;  $t$  – время.

Оценим динамическую ошибку измерения углов отклонения первой контролируемой площадки от горизонта.

Принцип измеряемого преобразователем ускорения запишется в следующем виде:

$$\begin{aligned} W_{\eta_1}^0 &= g \cdot \sin(\varphi_{10}^0)^* + a_y \cdot \sin(\omega t + v_{y1}) \times \\ &\times \cos(A_1 + \Delta A) \cdot \cos(\varphi_{10}^0)^* + \\ &+ a_x \cdot \sin(\omega t + v_{x1}) \cdot \sin(A_1 + \Delta A) \times \\ &\times \cos(\varphi_{10}^0)^*, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} W_{\xi_1}^0 &= -g \cdot \sin(\vartheta_{10}^0)^* + a_y \cdot \sin(\omega t + v_{y2}) \times \\ &\times \sin(A_1 + \Delta A) - a_x \cdot \sin(\omega t + v_{x1}) \times \\ &\times \cos(A + \Delta A) \cdot \sin(\vartheta_{10}^0)^*. \end{aligned} \quad (4)$$

Представим

$$\begin{aligned} (\varphi_1^0)^* &= (\varphi_{10}^0)^* + \Delta\varphi_{1g}^0, \\ (\vartheta_1^0)^* &= (\vartheta_{10}^0)^* + \Delta\vartheta_{1g}^0. \end{aligned} \quad (5)$$

<sup>3</sup> Устройство для измерения пространственных угловых отклонений: пат. RU 2495 374 С1 / Цветков Г.А., Утробин Г.Ф., Федорова Е.А.; заявл. от 30.03.2012.

Считая  $\Delta\varphi_{1g}^0$  и  $\Delta\vartheta_{1g}^0$  малыми, подставив (5) в (3) и (4) с учетом  $\sin(\varphi_1^0)^* = \frac{W_{\eta 1}^0}{g}$ ,  $\sin(\vartheta_1^0)^* = \frac{W_{\xi 1}^0}{g}$ , получим

$$\Delta\varphi_{1g}^0 = \frac{a_y}{g} \cdot \sin(\omega t + \nu_{y1}) \cdot \cos(A_1 + \Delta A) + \frac{a_x}{g} \cdot \sin(\omega t + \nu_{x1}) \cdot \sin(A_1 + \Delta A). \quad (6)$$

Динамическая ошибка измерения угла  $(\nu_1^0)^*$ :

$$\Delta\nu_{1g}^0 = \frac{a_y}{g} \cdot \sin(\omega t + \nu_{y2}) \cdot \cos(A_1 + \Delta A) + \frac{a_x}{g} \cdot \sin(\omega t + \nu_{x1}) \cdot \cos(A_1 + \Delta A). \quad (7)$$

Для второй контролируемой площадки

$$\Delta\varphi_{2g}^0 = \frac{a_y}{g} \cdot \sin(\omega t + \nu_{y1}) \cdot \cos A_2 + \frac{a_x}{g} \cdot \sin(\omega t + \nu_{x1}) \cdot \sin A_2, \quad (8)$$

$$\Delta\nu_{2g}^0 = \frac{a_y}{g} \cdot \sin(\omega t + \nu_{y2}) \cdot \sin A_2 + \frac{a_x}{g} \cdot \sin(\omega t + \nu_{x1}) \cdot \cos A_2. \quad (9)$$

Динамическую погрешность определения угла азимутального рассогласования определим, записав проекции ускорений на оси  $O_{\xi 1}$  и  $O_{\eta 1}$  с учетом (1), (2):

$$\begin{aligned} W_{\eta 1}^k = & -g \left[ -\cos \varphi_3 \cdot \sin(\varphi_1^0)^* + \right. \\ & \left. + \sin \varphi_3 \cdot \sin(A_1 + \Delta A) \cdot \cos(\varphi_1^0)^* \right] + \\ & + a_y \cdot \sin(\omega t + \nu_{y3}) \cdot \cos(A_1 + \Delta A) \cdot \cos(\varphi_1^0)^* + \\ & + a_x \cdot \sin(\omega t + \nu_{x4}) \cdot \left[ \cos \varphi_3 \cdot \sin(A_1 + \Delta A) \times \right. \\ & \left. \times \cos(\varphi_1^0)^* + \sin \varphi_3 \cdot \sin(\varphi_1^0)^* \right]. \quad (10) \end{aligned}$$

Для малых углов  $(\varphi_1^0)^*$ ,  $\varphi_2^0$ ,  $\varphi_2^k$ ,  $(\varphi_1^k)^*$ ,  $(\nu_1^k)^*$ ,  $\nu_2^k$ ,  $(\nu_1^0)^*$ ,  $\nu_2^0$  и  $\varphi_3$  и с учетом малости динамической погрешности  $\delta A_{\xi}$  запишем выражения для динамической ошибки определения азимутального угла первой площадки:

$$\delta A_{g1} = \frac{a_y \cdot \cos(A_1 + \Delta A)}{g \cdot \sin \varphi_3} \times$$

$$\times \left[ \sin(\omega t + \nu_{y1}) + \sin(\omega t + \nu_{y3}) \right] +$$

$$+ \frac{a_x \cdot \sin(A_1 + \Delta A)}{g \sin \varphi_3} \times$$

$$\times \left[ \sin(\omega t + \nu_{x1}) + \sin(\omega t + \nu_{x4}) \right]. \quad (11)$$

Динамическая погрешность определения азимутального угла для второй контролируемой площадки:

$$\delta A_{g2} = \frac{a_y \cdot \cos A_2}{g \cdot \sin \varphi} \times$$

$$\times \left[ \sin(\omega t + \nu_{y1}) + \sin(\omega t + \nu_{y3}) \right] +$$

$$+ \frac{a_x \cdot \sin A_2}{g \cdot \sin \varphi_3} \times$$

$$\times \left[ \sin(\omega t + \nu_{x1}) + \sin(\omega t + \nu_{x4}) \right]. \quad (12)$$

Определим погрешность измерения разности горизонтальных углов с учетом (6)–(9):

$$\delta|\Delta\varphi| = \frac{a_y}{g} \cdot \left[ \cos A_2 - \cos(A_1 + \Delta A) \right] \times$$

$$\times \sin(\omega t + \nu_{y1}) + \frac{a_x}{g} \times$$

$$\times \left[ \sin A_2 - \sin(A_1 + \Delta A) \right] \cdot \sin(\omega t + \nu_{x1}), \quad (13)$$

$$\delta|\Delta\vartheta| = \frac{a_y}{g} \cdot \left[ \sin A_2 - \sin(A_1 + \Delta A) \right] \times$$

$$\times \sin(\omega t + \nu_{y2}) + \frac{a_x}{g} \times \\ \times [\cos A_2 - \cos(A_1 + \Delta A)] \cdot \sin(\omega t + \nu_{x1}). \quad (14)$$

Максимальные значения величин (13), (14):

$$\delta|\Delta\varphi|_{g \max} = \frac{a_y}{g} \cdot [\cos A_2 - \cos(A_1 + \Delta A)] + \\ + \frac{a_x}{g} \cdot [\sin A_2 - \sin(A_1 + \Delta A)], \quad (15)$$

$$\delta|\Delta\theta|_{g \max} = \frac{a_y}{g} \cdot [\sin A_2 - \sin(A_1 + \Delta A)] + \\ + \frac{a_x}{g} \cdot [\cos A_2 - \cos(A_1 + \Delta A)]. \quad (16)$$

Максимальное значение динамической ошибки разности азимутальных углов с учетом (11) и (12) запишется в виде

$$\delta|\Delta A|_{g \max} = \frac{2a_y}{g \cdot \sin \varphi_3} \times \\ \times [\cos A_2 - \cos(A_1 + \Delta A)] + \\ + \frac{2a_x}{g \cdot \sin \varphi_3} \cdot [\sin A_2 - \sin(A_1 + \Delta A)]. \quad (17)$$

Оценим величину динамических погрешностей измерения углов рассогласования при использовании системы измерения наклона.

При жестком закреплении преобразователей на основании угол  $\Delta A$  в выражениях (15)–(17) равен нулю. Тогда при

$$\frac{a_x}{g} = \frac{a_y}{g} = 3,6 \cdot 10^{-5} \text{ рад } A_1 = 0, A_2 = 45^\circ,$$

$$\varphi_3 = 5^\circ.$$

$$\delta(\Delta\varphi)_{g \max} = \frac{2 \cdot 3,6 \cdot 10^{-5}}{2} = 5 \cdot 10^{-5} = 10'',$$

$$\delta(\Delta A)_{g \max} = \frac{2 \cdot 3,6 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 0,08727} + \frac{2 \cdot 3,6 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 0,08727} = \\ = 116,3 \cdot 10^{-5} = 3,9'.$$

При развороте платформы ИГ-I с измерительным преобразователем на угол  $\Delta A$  в азимутальной плоскости значение угла  $A_2$  можно представить в виде

$$A_2 = A_1 + \Delta A + \delta\bar{A}, \quad (18)$$

где  $\delta\bar{A}$  – угол, равный номинальному значению угла азимутального рассогласования между осями  $OX_1$  и  $OY_2$  (взят из чертежа изделия);  $\delta\bar{A}$  – разностный угол, определяемый допусками на изготовление площадок.

Тогда с учетом малости  $\bar{A}$  получим

$$\cos A_2 - \cos(A_1 + \Delta A) = \\ = \delta\bar{A} \cdot \sin(A_1 + \Delta A), \quad (19)$$

$$\sin A_2 - \sin(A_1 + \Delta A) = \\ = \delta\bar{A} \cdot \cos(A_1 + \Delta A). \quad (20)$$

С учетом (19) и (20) выражения (15)–(17) примут вид

$$\delta|\Delta\varphi|_{g \max} = \delta(\vartheta)_{g \max} = \frac{\delta\bar{A} \sqrt{a_x^2 + a_y^2}}{g}, \quad (21)$$

$$\delta|\Delta A|_{g \max} = \frac{2\delta\bar{A} \sqrt{a_x^2 + a_y^2}}{g \cdot \sin \varphi_3}. \quad (22)$$

Оценим динамическую ошибку с учетом  $\delta\bar{A} = 45 \cdot 10^{-4}$  рад:

$$\delta|\Delta\varphi|_{g \max} = 5 \cdot 10^{-5} \cdot 45 \cdot 10^{-4} = (4 \cdot 10^{-2})'',$$

$$\delta|\Delta A|_{g \max} = \frac{2 \cdot 45 \cdot 10^{-4} \cdot 5 \cdot 10^{-5}}{0,08727} = 5 \cdot 10^{-6} = 1''.$$

Следовательно, предлагаемое техническое решение позволяет снизить динамическую погрешность определения углов отклонения от горизонта в 200 раз и при наклоне изделия на малые углы позволяет определить угол азимутального рассогласования следующим образом.

С учетом малости  $\varphi_3$ , а также уравнений анализа работы измерительной системы

$$\operatorname{tg}(A + \Delta A) = \frac{\sin \frac{(\varphi_1^k)^* - (\varphi_1^0)^*}{2}}{\sin \frac{(\vartheta_1^k)^* - (\vartheta_1^0)^*}{2}},$$

$$\operatorname{tg} A_2 = \frac{\sin \frac{(\varphi_2^k)^* - (\varphi_2^0)^*}{2}}{\sin \frac{(\vartheta_2^k)^* - (\vartheta_2^0)^*}{2}}$$

находим

$$\begin{aligned} \delta \bar{A} = \operatorname{arctg} \frac{\sin \frac{\varphi_2^k - \varphi_2^0}{2}}{\sin \frac{\vartheta_2^k - \vartheta_2^0}{2}} - \\ - \operatorname{arctg} \frac{\sin \frac{(\varphi_1^k)^* - (\varphi_2^0)^*}{2}}{\sin \frac{(\vartheta_2^k)^* - (\vartheta_2^0)^*}{2}}. \end{aligned} \quad (23)$$

Затем определяем угол азимутального рассогласования по формуле

$$\Delta A^* = \Delta A + \delta \bar{A}. \quad (24)$$

Углы  $\Delta A^*$ ,  $\Delta \varphi$  и  $\Delta \vartheta$  позволяют определить ориентацию базовой системы координат второй площадки  $X_2OY_2Z_2$  в системе координат первой площадки  $X_1OY_1Z_1$ . Следовательно, предлагаемое техническое решение позволяет снизить динамическую погрешность измерения пространственных углов отклонения и при наклоне изделия на малый угол определить дополнительно угол азимутального рассогласования.

Технические характеристики измерительной системы:

Диапазон измерений, град:  
горизонтальных координат – 0–10;  
азимутальных координат – 0–360.

Чувствительность измерительного преобразователя, угл. с – 0,1.

Погрешность измерения, угл. с:  
горизонтальных координат – 0,5;  
азимутальных координат – 15.

### Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- выявлены закономерности, позволяющие обоснованно подходить к проектированию измерительных систем контроля пространственных угловых отклонений установочных площадок под приборы измерения, управления, научной аппаратуры;

- измерительная система позволяет снизить динамическую погрешность измерения пространственных угловых отклонений, определить угловое рассогласование установочных площадок по горизонту и в азимутальном направлении;

- предлагаемая методика правильной установки тилтметров, их ориентации (при регистрации микросейсмсов и измерении углов деформации отложений) как на дневной поверхности, так и в скважине, выполнение требований по установке тилтметров в нулевое (исходное) положение (положение обоих сенсоров отвечало нулевым показаниям) и в положение, при котором их взаимно перпендикулярные оси измерения ( $X$  и  $Y$ ) были точно ориентированы относительно сторон света, позволит решить проблему обеспечения точности измерения параметров процесса проведения ГРП.

### Список литературы

1. Цветков Г.А., Утробин Г.Ф. Система контроля пространственных угловых отклонений // Вестник Пермского государственного технического университета. Аэрокосмическая техника. – 2004. – № 18. – С. 130–134.
2. Цветков Г.А. Автоматизированная измерительная система контроля пространственных угловых отклонений // Приборы и методы измерений. – Минск, 2012. – № 2(5). – С. 57–62.
3. Цветков Г.А., Егоров М.А. Оценка точностных характеристик автоматизированной измерительной системы контроля пространственных угловых отклонений // Приборы и методы измерений. – Минск, 2013. – № 1(6). – С. 60–63.
4. Цветков Г.А., Балуева Н.Ю., Крюков С.А. Повышение точности гироскопических измерений при калибровке на установках пространственной ориентации // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2010. – № 12. – С. 28–29.
5. Цветков Г.А. Гироскопический инклинометрический комплекс для измерения траектории нефтяных или железно-рудных скважин // Каротажник. – 2004. – № 3–4. – С. 116–117.

6. Аксельрод С.М. Геофизический контроль гидроразрыва пласта в реальном времени: возможности, реализация и ограничения (по материалам зарубежной печати) // Каротажник. – Тверь, 2014. – Вып. 4(238). – С. 84–116.
7. Denney D. Integrated Microseismic Monitoring for Field Optimization – Marcellus Shale // Journal of Petroleum Technology. – 2013. – Vol. 65, № 3. – P. 102–111.
8. Denney D. Optimizing Fracture Stimulation in Low-Permeability Oil Reservoirs in the Ordos Basin // Journal of Petroleum Technology. – 2013. – Vol. 65, № 3. – P. 112–116.
9. Denney D. Measurements of Hydraulic-Fracture Induced Seismicity in Gas Shales // Journal of Petroleum Technology. – 2013. – Vol. 65, № 3. – P. 149–152.
10. Dusseault M., McLennan J. Massive Multi-Stage Hydraulic Fracturing: Where Are We? // Geophysical Prospecting. – 2010. – Vol. 58. – P. 809–820.
11. Eisner L., Thornton M., Griffin J. Challenges for Microseismic Monitoring // SEG San Antonio 2011 Annual Meeting. – P. 1519–1522.
12. Fisher K., Griffin L. Tiltmeter Mapping for Long-Term Reservoir Monitoring // World Oil. – 2003. – Vol. 224, № 3, available at: <http://www.worldoil.com/March-2003-Tiltmeter-mapping-for-long-term-reservoir-monitoring.html> (дата обращения: 15.07.2014).
13. Reducing Uncertainty for Better Production Operation Decisions / D.T. Luvio [et al.] // World Oil. – 2013. – P. 45–51, available at: [www.slb.com/media/Files/coiled\\_tubing/industry\\_articles/201303wo\\_prod\\_operation.pdf](http://www.slb.com/media/Files/coiled_tubing/industry_articles/201303wo_prod_operation.pdf) (дата обращения 15.07.2014).
14. Earthquake Source Mechanics. Lecture 6. Seismic / University College London, available at: <http://www.ucl.ac.uk/EarthSci/people/Sammonds/eseismicmoment.pdf> (дата обращения: 15.07.2014).
15. Warpinski N. Microseismic Monitoring: Inside and Out, available at: <http://www.spe.org/jpt/print/archives/2009/11/19DAS.pdf> (дата обращения: 15.07.2014).
16. Development of an Advanced Hydraulic Fracture Mapping System. Final Report for U.S. Department of Energy / N. Warpinski, S. Wolhart, L. Griffin, E. Davis; Pinnacle Technologies, Inc., April 2004 – January 2007, available at: <http://www.netl.doe.gov/technologies/oil-gas/publications/EPreports/NT42108/FinalReport.pdf> (дата обращения: 15.07.2014).
17. Warpinski N.R. Hydraulic Fracture Mapping with Hybrid Microseismic // Tiltmeter Arrays. GazTIPS. – 2006. – Vol. 12, № 3. – P. 17–20.
18. Wolhart S.L. Hydraulic Fracture Diagnostics: Recent Advances and their Impact, available at: [http://www.kgu.or.kr/download.php?tb=bbs\\_017&fn=p-106.pdf&tm=p](http://www.kgu.or.kr/download.php?tb=bbs_017&fn=p-106.pdf&tm=p) (дата обращения: 15.07.2014).
19. Цветков Г.А. Проект создания автоматизированной управляемой прецизионной установки пространственной ориентации гироинклинометров // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 4. – С. 35–39.
20. Исследование отклонений геомагнитной оси гироинклинометра в азимуте при построении нефтегазовых скважин / Г.А. Цветков, И.Р. Юшков, О.И. Вяткин, Н.Ю. Балueva // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2014. – № 10. – С. 31–41. DOI: 10.15593/2224-9923/2014.10.3

#### References

1. Tsvetkov G.A., Utrobin G.F. Sistema kontrolya prostranstvennykh uglovyykh otklonenii [System of Controlling Spatial Angular Deviations]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika*, 2004, no. 18, pp. 130–134.
2. Tsvetkov G.A. Avtomatizirovannaya izmeritel'naya sistema kontrolya prostranstvennykh uglovyykh otklonenii [Automated Measuring System for Controlling Spatial Angular Deviations]. *Pribory i metody izmerenii*. Minsk, 2012, no. 2(5), pp. 57–62.
3. Tsvetkov G.A., Egorov M.A. Otsenka tochnostnykh kharakteristik avtomatizirovannoi sistemy kontrolya prostranstvennykh uglovyykh otklonenii [Assessment of Accuracy Parameters of the Automated Measuring System to Control Spatial Angular Deviations]. *Pribory i metody izmerenii*. Minsk, 2013, no. 1(6), pp. 60–63.
4. Tsvetkov G.A., Balueva N.Iu., Kriukov S.A. Povyshenie tochnosti giroinclinometrov pri kalibrovke na ustanovkakh prostranstvennoi orientatsii [Improving Accuracy of Gyro-inclinometers by Calibration on Spatial Orientation Stands]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neflyanykh i gazovykh mestorozhdenii*, 2010, no. 12, pp. 28–29.
5. Tsvetkov G.A. Girokopieskii i inklinocheticheskii kompleks dlia izmereniia traektorii neflyanykh ili zhelezorudnykh skvazhin [Gyroscopic inclinometer system for measuring oil and iron ore well path]. *Karotazhnik*, 2004, no. 3–4, pp. 116–117.
6. Akse'lrod S.M. Geofizicheskii kontrol' gidrorazryva plasta v real'nom vremeni: vozmozhnosti, realizatsiia i ogranicheniia (po materialam zarubezhnoi pechati) [Real-Time Geophysic Control of Hydrofracturing: Possibilities, Implementation and Limitations (Based on Analysis of Foreign Sources)]. *Karotazhnik*. Tver', 2014, no. 4(238), pp. 84–116.
7. Denney D. Integrated Microseismic Monitoring for Field Optimization – Marcellus Shale. *Journal of Petroleum Technology*, 2013, vol. 65, no. 3, pp. 102–111.
8. Denney D. Optimizing Fracture Stimulation in Low-Permeability Oil Reservoirs in the Ordos Basin. *Journal of Petroleum Technology*, 2013, vol. 65, no. 3, pp. 112–116.
9. Denney D. Measurements of Hydraulic-Fracture Induced Seismicity in Gas Shales. *Journal of Petroleum Technology*, 2013, vol. 65, no. 3, pp. 149–152.
10. Dusseault M., McLennan J. Massive Multi-Stage Hydraulic Fracturing: Where Are We? *Geophysical Prospecting*, 2010, vol. 58, pp. 809–820.
11. Eisner L., Thornton M., Griffin J. Challenges for Microseismic Monitoring. *SEG San Antonio 2011 Annual Meeting*, pp. 1519–1522.
12. Fisher K., Griffin L. Tiltmeter Mapping for Long-Term Reservoir Monitoring. *World Oil*, 2003, vol. 224, no. 3, available at: <http://www.worldoil.com/March-2003-Tiltmeter-mapping-for-long-term-reservoir-monitoring.html> (accessed 15 July 2014).
13. Luvio D.T. [et al.]. Reducing Uncertainty for Better Production Operation Decisions. *World Oil*, 2013, pp. 45–51, available at: [www.slb.com/media/Files/coiled\\_tubing/industry\\_articles/201303wo\\_prod\\_operation.pdf](http://www.slb.com/media/Files/coiled_tubing/industry_articles/201303wo_prod_operation.pdf) (accessed 15 July 2014).
14. Earthquake Source Mechanics. Lecture 6. Seismic. University College London, available at: <http://www.ucl.ac.uk/EarthSci/people/Sammonds/eseismicmoment.pdf> (accessed 15 July 2014).
15. Warpinski N. Microseismic Monitoring: Inside and Out, available at: <http://www.spe.org/jpt/print/archives/2009/11/19DAS.pdf> (accessed 15 July 2014).
16. Warpinski N., Wolhart S., Griffin L., Davis E. Development of an Advanced Hydraulic Fracture Mapping System. Final Report for U.S. Department of Energy. Pinnacle Technologies, Inc., April 2004 – January 2007, available at: <http://www.netl.doe.gov/technologies/oil-gas/publications/EPreports/NT42108/FinalReport.pdf> (accessed 15 July 2014).
17. Warpinski N.R. Hydraulic Fracture Mapping with Hybrid Microseismic. *Tiltmeter Arrays*. *GazTIPS*, 2006, vol. 12, no. 3, pp. 17–20.
18. Wolhart S.L. Hydraulic Fracture Diagnostics: Recent Advances and their Impact, available at: [http://www.kgu.or.kr/download.php?tb=bbs\\_017&fn=p-106.pdf&tm=p](http://www.kgu.or.kr/download.php?tb=bbs_017&fn=p-106.pdf&tm=p) (accessed 15 July 2014).
19. Tsvetkov G.A. Proekt sozdaniia avtomatizirovannoi upravliaemoi pretsionnoi ustanovki prostranstvennoi orientatsii giroinclinometrov [Design of automated controlled high-accuracy system of space orientation of gyro-inclinometers]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2013, no. 4, pp. 35–39.
20. Tsvetkov G.A., Iushkov I.R., Viatkin O.I., Balueva N.Iu. Issledovanie otklonenii geomagnitnoi osi giroinclinometra v azimute pri postroenii neftegazovykh skvazhin [Research of inclination of geomagnetic axis of gyro-inclinometer in azimuth in oil and gas wells construction]. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 2014, no. 10, pp. 31–41. DOI: 10.15593/2224-9923/2014.10.3

#### Об авторах

Цветков Геннадий Александрович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: bg@pstu.ru).

**Шумилов Александр Владимирович** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, заместитель генерального директора по промышленной геофизике ОАО «Пермнефтегеофизика» (614090, г. Пермь, Лодыгина, 34; e-mail: shum5011@gmail.com).

**Черных Ирина Александровна** (Пермь, Россия) – начальник отдела геофизических работ ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» (614990, г. Пермь, ул. Ленина, 62; e-mail: chernykhia@p.lukoil.com).

### About the authors

**Gennadii A. Tsvetkov** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Life Safety, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29; e-mail: bg@pstu.ru).

**Aleksandr V. Shumilov** (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Deputy General Director for Petroleum Geophysics, OJSC “Permneftegeofizika” (614090, Perm, Lodygina st., 34; e-mail: shum5011@gmail.com).

**Irina A. Chernykh** (Perm, Russian Federation) – Head of Department of Geophysical Operations, LLC “LUKOIL-PERM” (614990, Perm, Lenina st., 62; e-mail: chernykhia@p.lukoil.com).

Получено 11.09.2014

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Цветков Г.А., Шумилов А.В., Черных И.А. Оценка точностных характеристик параметров контроля угловых отклонений установочных площадок начальной ориентации тилтметров при проведении гидроразрыва пласта // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2014. – № 13. – С. 26–37. DOI: 10.15593/2224-9923/2014.13.3

Please cite this article in English as:

Tsvetkov G.A., Shumilov A.V., Chernykh I.A. Evaluation of accuracy parameters of controlling error angles of the plates for initial tiltmeter orientation in hydrofracturing. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 2014, no. 13, pp. 26–37. DOI: 10.15593/2224-9923/2014.13.3