

МАРКШЕЙДЕРСКИЙ КОНТРОЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ СКВАЖИН

Б. Н. Бухтояров[✉], О. Р. Старикова

ООО «Газпром нефть шельф», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ z9851275712@gmail.com

Аннотация: От достоверной информации о пространственном положении скважины зависит корректность геологической модели, эффективность разработки месторождения, промышленная безопасность и в конечном итоге экономические показатели проекта. Рассмотрены проблемные вопросы контроля пространственного положения скважин при разработке нефтегазовых месторождений, даны предложения по усовершенствованию процедуры контроля пространственного положения скважин маркшейдерскими службами операторов разработки месторождений. Освещены основные элементы позиционирования скважин при выполнении измерений забойными телесистемами, приведена методика расчета азимута и зенитного угла на основании данных телеметрических систем, описаны основные источники ошибок и применяемые методы коррекции измерений.

Ключевые слова: маркшейдерский контроль траектории скважины, проводка скважин, забойные телеметрические системы (MWD), геомагнитные модели, модель ошибок, эллипс неопределенности

Для цитирования: Бухтояров БН, Старикова ОР. Маркшейдерский контроль пространственного положения скважин. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(3):21-28. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-21-28>.

SURVEYOR CONTROL OF SPATIAL POSITION OF WELLS

B. N. Bukhtoyarov[✉], O. R. Starikova

Gazprom Neft Shelf LLC, St. Petersburg, Russian Federation

✉ z9851275712@gmail.com

Abstract: The correctness of the geological model, field development efficiency, industrial safety and, ultimately, the economic performance of the project depend on reliable information about the spatial position of the well. The article considers the problematic issues of well spatial position control during oil and gas field development, gives proposals for improving the procedure of well spatial position control by surveyor services of field development operators. The basic elements of well positioning when performing measurements by downhole telemetry systems are covered, the method of calculation of azimuth and zenith angle on the basis of telemetry systems data is given, the main sources of errors and applied methods of measurement correction are described.

Keywords: Well trajectory surveying, well wiring, downhole telemetry systems (MWD), geomagnetic models, error model, uncertainty ellipse

For citation: Bukhtoyarov BN, Starikova OR. Surveyor control of spatial position of wells. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(3):21-28. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-21-28>.

Введение

Проблемные вопросы состояния маркшейдерского обеспечения разработки нефтегазовых месторождений неоднократно поднимались в профильных изданиях. Так, авторы согласны с выводами С. Н. Никифорова [1] о деградации нефтегазовой маркшейдерии в сторону чисто геодезических и землеустроительных работ и недостаточном участии маркшейдерских служб в контроле определения про-

странственного положения скважин. В связи с этим в профессиональном маркшейдерском сообществе отношение к нефтегазовой маркшейдерии неоднозначное.

К основным задачам маркшейдерского обеспечения безопасного и эффективного недропользования относится проведение исчерпывающего комплекса маркшейдерских работ, в том числе определение пространственно-геометрических параметров горных разработок и подземных сооружений, обе-

спечение рациональной разработки МПИ и охраны недр вне зависимости от вида добываемого полезного ископаемого.

При разработке месторождений углеводородного сырья (далее – УВС) главными и единственными подземными сооружениями остаются скважины. На определение пространственно-геометрических характеристик скважины распространяется действие пункта 3в «Положения о лицензировании маркшейдерских работ» [2].

В общем случае скважина – это горная выработка круглого сечения, пробуренная с поверхности земли или из горной выработки без доступа человека к забою, диаметр которой много меньше ее глубины. В нефтегазовой отрасли различают вертикальные скважины (зенитный угол до 5°) и наклонно-направленные. К наклонно-направленным также относятся горизонтальные скважины (с зенитными углами более 70°).

Горизонтальные скважины размещаются внутри продуктивного пласта-коллектора на протяженном участке, что позволяет повысить уровни добычи углеводородов при сокращении общего числа скважин, что делает их экономически выгодными несмотря на более высокую стоимость. Бурение горизонтальных скважин сделало возможным доступ к сложным и ранее недоступным объектам, с их помощью ведется добыча на шельфе, где нет возможности размещения кустов скважин и необходимо вести бурение с платформ или берега.

Средняя протяженность скважин на суше от 1 500 до 4 тыс. м, на шельфовых месторождениях скважины протяженностью 5–7 тыс. м не редкость, самые протяженные имеют глубины по стволу до 15 км.

По данным агентства Bloomberg [3], за 11 месяцев 2023 года в РФ пробурено 7 930 нефтяных эксплуатационных скважин общей протяженностью 28 100 км, около половины из них имеют горизонтальное заканчивание. Стоимость скважин составляет от нескольких миллионов долларов на суше до десятков миллионов долларов на шельфовых месторождениях. Затраты на строительство эксплуатационных скважин составляют основную статью капитальных вложений операторов добычи УВС.

Основная задача при проводке скважины заключается в достижении геологической цели – участка недр, определенного по геологической модели, из которого планируется добыча УВС данной скважиной и обеспечение проектных показателей добычи. Геометрические параметры траекторий пробуренных скважин используются для построения и актуализации геологических и гидродинамических моделей залежей УВС. Адекватность модельных построений напрямую зависит от корректности положения скважин, на основе которых они строятся, ошибки и неопределенности их траекторий ведут к снижению качества моделей по принципу мусор на входе – мусор на выходе.

Основные проблемы, связанные с низким качеством проводки и пространственной точностью скважин:

- недостижение геологических целей при вскрытии продуктивных объектов и недостижение плановых показателей добычи УВС;
- рост неопределенности геологического и гидродинамического моделирования;
- риск аварий из-за взаимного пересечения при бурении скважин;
- сужение пространства для маневра из-за больших эллипсов неопределенности и, как следствие, невозможность

строительства новых скважин нужной протяженности там, где они необходимы. Итог – неполное извлечение нефти;

- нарушения проектной кривизны по стволу, приводящие к непроходимости скважины и невозможности спуска колонны и инструментов.

Неопределенности геологической и гидродинамической моделей могут приводить к неверным решениям при выборе геологических целей при планировании новых скважин и негативно влиять на режимы эксплуатации месторождений, приводить к снижению коэффициента извлечения УВС, в конечном итоге ведут к снижению эффективности проектов. Все обозначенные риски особенно актуальны при разработке месторождений горизонтальными скважинами, эффективность которых напрямую зависит от позиционной точности их размещения.

Задача проводки скважин по проектным направлениям и определение их фактических траекторий лежит на специалистах нефтесервисных компаний. Как правило, это группа полевых инженеров по геонавигации на буровой установке, которые обеспечивают непрерывное управление бурением и измерения в скважине в режиме 24 на 7, а также инженер-руководитель в офисе с функцией координатора процесса. В соответствии с действующим профессиональным стандартом [4] инженер по геонавигации – это специалист, имеющий образование по нескольким специальностям.

Специальности, которыми должен обладать инженер по геонавигации:

- разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений;
- бурение нефтяных и газовых скважин;
- информационно-измерительная техника и технологии.

Взаимодействие с буровыми и нефтесервисными подрядчиками, включая контроль качества выполняемых работ, со стороны операторов разработки осуществляют специалисты геологических служб и буровых управлений. Все перечисленные специалисты как подрядных организаций, так и операторов разработки в соответствии со специализацией могут иметь различную степень подготовки в области геодезии и картографии, но специалистами по геометризации подземных сооружений на уровне требований лицензирования маркшейдерских работ они не являются. Программы подготовки геологов, буровиков, разработчиков содержат только базовые понятия о геодезии и картографии и не включают специальные дисциплины по обработке пространственных измерений (теория математической обработки измерений и т.д.).

Участие маркшейдерских служб операторов сведено к геодезическим работам: выдаче акта заложения скважины (координаты устья, направления движения станка), справки об альтитуде стола ротора и иногда – к выдаче значений магнитного склонения. Контроль траектории в лучшем случае заключается в повторном расчете координат оси скважины по полученным от геофизиков значениям зенитного угла, магнитного азимута и глубины по стволу скважины. Существующая процедура позволяет только найти ошибки в расчете приращений координат, при этом к контролю определения исходных угловых параметров – зенитных углов и азимутов, от которых и зависит траектория скважины, никакого отношения не имеет.

Отсутствие непосредственного контроля замеров в скважинах со стороны маркшейдерских служб исторически сложилось по объективным технологическим причинам: изме-

рения выполнялись приборами на кабеле интервально или по секциям буровыми и геофизическими подрядчиками, значения зенитного угла и магнитного азимута, зафиксированные фотомеханическими или электронными регистраторами, коррекции не подлежали. В итоге в отрасли сложилась ситуация, когда со стороны операторов разработки, имеющих лицензии на производство маркшейдерских работ, контроль определения траектории скважин не осуществляется. А корректность пространственно-геометрических параметров скважин целиком зависит от подрядных организаций, не заинтересованных в качестве геологических модельных построений залежи, полноты извлечения УВС и экономической эффективности проекта и не имеющих лицензии на производство маркшейдерских работ.

В таких условиях решающим становится вопрос о компетенции исполнителей со стороны нефтесервисных и геофизических подрядчиков и исполнения их внутренних процедур контроля качества скважинных измерений (при их наличии). Отсутствие же реального контроля точности траекторий скважин со стороны операторов разработки месторождений УВС вряд ли можно назвать нормальным состоянием отрасли, особенно при столь высокой стоимости строительства скважин, о чем говорилось выше.

В настоящее время изменились не только приборы для измерений в скважине и технология проведения замеров, также изменилась методика выполнения расчетов траектории.

Появление беспроводных каналов связи между устьем и забоем скважины и забойных телеметрических систем (MWD), использующих магнитометры и акселерометры, привело к следующим изменениям:

- существенно повысилась точность и оперативность измерений траекторий;
- для расчета зенитного угла и магнитного азимута требуется камеральная обработка измерений, возможна коррекция внешних воздействий на замеры телесистемы;
- значительно выросла роль методов теории математической обработки геодезических измерений, используемых при контроле качества замеров в скважине и расчете неопределенности её положения;
- методы коррекции позволяют уточнять пространственное положение скважин и снижать неопределенность позиционирования более чем на 50 % даже спустя десятилетия после их строительства, при условии наличия «сырых» измерений у оператора.

Существующие методики обработки замеров MWD позволяют маркшейдерским службам контролировать их качество, выполнять коррекцию измерений, вычислять все исходные параметры, необходимые для расчета траекторий, и оценивать их неопределенность, тем самым обеспечивая реальный контроль позиционирования скважин. Наличие полноценного контроля со стороны операторов в свою очередь приведет подрядные организации к необходимости соответствия возросшим требованиям отрасли.

Тема пространственных измерений в скважине и их обработки обширная, затрагивает сопредельные области знания и не может быть подробно освещена в рамках отдельной публикации, далее будут рассмотрены только основные элементы позиционирования скважин при выполнении измерений забойными телесистемами.

К таким элементам в рамках данной публикации можно отнести:

- забойные телеметрические системы (MWD);
- нормативное обеспечение скважинных измерений;
- расчет угловых параметров и траекторий;
- геомагнитные модели, используемые в нефтегазовой отрасли;
- контроль качества измерений и неопределенность траектории;
- коррекцию измерений.

Каждый из перечисленных элементов заслуживает отдельного исследования и серии публикаций, здесь будут рассмотрены только основные их аспекты.

Забойная телеметрическая система



Рис. 1. Забойная телеметрическая система /
Fig. 1. Downhole telemetry system

Забойные телеметрические системы (далее – MWD, Measure while drilling – измерения во время бурения) предназначены для оперативного управления траекторией бурения скважин путем измерения гравитации и магнитного поля в процессе бурения.

В общем случае телесистема состоит из основных компонентов, которые обеспечивают первичные измерения в скважине, передачу информации на устье, обработку и предоставление результата замера полевому инженеру MWD.

Основные компоненты забойной телеметрической системы:

- забойная измерительная аппаратура;
- аппаратура на поверхности;
- оборудование канала связи;
- источник электроэнергии (для систем с электромагнитным или гидравлическим каналом связи).

Измерительная аппаратура входит в состав компоновки низа бурильной колонны (далее – КНБК), измерения выполняются в статическом режиме во время остановок для наращивания бурильной колонны.

Измерительные приборы MWD представляют собой две группы датчиков: три акселерометра (G_x , G_y , G_z) ориентированных ортогонально друг другу, для гравиметрических измерений и три магнитометра (B_x , B_y , B_z), также ориентированных взаимно ортогонально, для измерения магнитного поля. Ориентация Z-датчиков в обеих группах совпадает с осью скважины.

Акселерометры служат для определения наклона скважины относительно отвесной линии – зенитного угла (I), магнитометры – для определения направления скважины относительно направления на магнитный север – магнитного азимута (A_m).

Измерительные системы на основе магнитометров и акселерометров могут использоваться для определения траекторий при геофизических исследованиях скважин на кабеле в открытом стволе.

Глубину скважины по стволу (мера инструмента) определяют при помощи отсчетного устройства на устье скважины, контроль глубины выполняется сравнением значения с суммой длин отдельных труб, составляющих бурильную колонну.

Нормативное обеспечение скважинных измерений

В действующих «Правилах осуществления маркшейдерской деятельности» [5] отсутствуют требования к маркшейдерскому контролю определения ключевых пространственных параметров траекторий скважин: глубины, азимута и зенитного угла, отсутствует методика оценки пространственной неопределенности траекторий скважин.

Раздел 20 «Технической инструкции по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах РД 153-39.0-072-01», 2001 года [6], посвящен инклинометрии. Его анализ позволяет утверждать, что полное исполнение его требований позволит обеспечить позиционную точность траекторий в пределах точности используемых приборов и методов измерения. Однако данная инструкция не применима для замеров забойными телесистемами. К недостаткам документа можно также отнести отсутствие методики расчета неопределенности положения скважин.

За пределами РФ забойные телесистемы начали приме-

нять в конце 1970-х, роль регулятора в этой сфере взял на себя Отраслевой руководящий комитет по точности измерений стволов скважин (ISCWSA – Industry Steering Committee on Wellbore Survey Accuracy), в состав которого вошли ведущие специалисты по точности скважинных измерений из ведущих компаний индустрии. ISCWSA ведет деятельность в рамках Сообщества инженеров-нефтяников (SPE – Society of Petroleum Engineers). Руководящие документы и научные статьи размещены на сайте Комитета и ресурсе SPE OnePetro.org. И первые, и вторые признаются операторами разработки, нефтесервисными подрядчиками и производителями измерительных систем, организации как стандарты [7, 8, 10–18].

К главной, но не единственной разработке ISCWSA можно отнести «Модель ошибок ISCWSA» (Definition of the ISCWSA Error Model) [8].

В РФ отсутствуют действующие нормативные документы, устанавливающие требования для пространственных замеров забойными телесистемами в процессе бурения, и утвержденные методики оценки пространственной неопределенности скважин. В таких условиях выглядит оправданным использование стандартов ISCWSA российским нефтегазовым сектором.

Расчет исходных параметров и координат траектории

Задача расчета траектории скважины состоит в том, что на основании измерений глубины (MD), зенитного угла (I) и магнитного азимута (A_m) рассчитать координаты точек замеров в прямоугольной системе координат. Начало отсчета координат ведется от устья скважины, а глубины – от стола ротора. Для расчета зенитного угла (I) и магнитного азимута (A_m) в точках замеров по «сырым» (некорректированным) измерениям MWD необходимы замеры акселерометров – G_x , G_y , G_z и магнитометров – B_x , B_y , B_z [7].

Для определения зенитного угла достаточно только измерений акселерометров. Расчет выполняется по формуле

$$I = \cos^{-1} \left(\frac{G_z}{\sqrt{G_x^2 + G_y^2 + G_z^2}} \right). \quad (1)$$

Для расчета магнитного азимута (румба) используются значения замеров всех шести датчиков:

$$A_m = \tan^{-1} \left(\frac{(G_x B_y - G_y B_x) \sqrt{G_x^2 + G_y^2 + G_z^2}}{B_z (G_x^2 + G_y^2) - G_z (G_x B_x + G_y B_y)} \right). \quad (2)$$

Переход от магнитного азимута к истинному (A) выполняется по формуле

$$A = A_m + (\pm DEC), \quad (3)$$

где DEC – магнитное склонение.

Переход к дирекционным углам:

$$\alpha = A - (\pm \gamma), \quad (4)$$

где γ – сближение меридианов.

Расчет траекторий выполняют методом средних углов или минимальной кривизны, применение обоих методов описано в «Инструкции по проведению инклинометрических исследований в скважинах» 1988 года [9].

Данные геомагнитных моделей

Параметры магнитного поля необходимы для расчетов траектории скважины, контроля качества измерений магнитометров и коррекции значений.

Для этих целей используется:

- магнитное склонение (DEC);
- магнитное наклонение (DIP);
- модуль вектора индукции магнитного поля (B).

Магнитное склонение и магнитное наклонение определяют направление вектора магнитной индукции, а индукция является его силовой характеристикой.

Параметры магнитного поля получают из геомагнитных моделей, в соответствии с классификацией ISCWSA [10–12] они делятся на пять категорий:

- низкого разрешения (IGRF, WMM);
- стандартного разрешения (WMMHR);
- высокого разрешения (HDGM, BGGM);
- In-Field Referencing (IFR1) – учитывают местные магнитные аномалии;
- In-Field Referencing with Real-time Disturbance Field Correction (IFR2) – учитывают местные магнитные аномалии и внешние магнитные возмущения.

От степени разрешения модели магнитного поля Земли напрямую зависит точность позиционирования скважины. Использование моделей более высокого разрешения может значительно уменьшить неопределенность траектории.

В настоящее время в РФ недоступны модели высокого разрешения HDGM и BGGM. Отсутствие обеспечения российскими геомагнитными данными высокого разрешения – одна из наиболее актуальных проблем нефтегазового сектора.

Контроль качества измерений и неопределенность траекторий

Замеры MWD, как любые измерения, подвержены ошибкам. Измерения в скважине выполняются дистанционно, без замыкания и равномерного распределения ошибок, как это делается на поверхности или в горных выработках с доступом людей. Ошибки измерений нефтегазовой скважины накапливаются по мере ее бурения и имеют максимальные значения на забое. Возникающие ошибки могут быть значительными по отношению к геологическим целям, поэтому при бурении скважины требуется оценка ее пространственной неопределенности.

Используемая в отрасли модель ошибок ISCWSA, подробно описанная в работе Н. Williamson [13], учитывает практически все типы измерительных систем, их реакцию на различные воздействия окружающей среды и применение основных методов коррекции. Размеры области неопределенности положения забоя скважины – эллипсоида неопределенности (EOU) – следуют из точности измерительной системы и внешних условий. Модели погрешностей основаны на конкретных предположениях о точности инструмента, процедурах съемки и условиях окружающей среды. Каждая магнитная съемка должна быть связана с одной и той же моделью ошибок для проверки на контроль качества и расчетов предотвращения столкновений, в отчетах об обследовании должна быть указана модель ошибки, связанная с набором измерений. Если фактические данные исследований не соответствуют предположениям модели, оценка погрешности становится недействительной и уже нельзя считать, что цели бурения скважины достигнуты.

Использование модели ошибок без соответствующего контроля качества измерений представляет собой опасно-неполное решение. Для возможности использования модели ошибок необходимо обеспечить контроль качества входных данных и идентифицировать данные, которые не соответствуют модели.

Параметры тестирования контроля качества обычно подразделяются на одну из четырех категорий: тестирование полевых компонентов, тесты ориентации, тесты разброса измерений и тесты пространственного положения. В рамках данного исследования будет рассмотрено только тестирование полевых компонентов. Методики контроля качества измерений и выявления промахов подробно описаны в работах R. Ekseth [14, 15].

Приборы для скважинных исследований измеряют положение относительно гравитационного и магнитного поля Земли. Модель ошибок геодезического инструмента предсказывает, насколько хорошо измеренные значения поля должны совпадать с теоретическими. Соответствие данных съемки этим критериям указывает на соблюдение допущений модели точности определения зенитного угла и азимута.

Тестирование полевых компонентов заключается в сравнении данных полевых замеров с референсными значениями физических полей.

Для контроля качества замеров акселерометров используется тест на гравитационную ошибку, полное значение гравитационного поля G_t определяют по формуле

$$G_t = \sqrt{G_x^2 + G_y^2 + G_z^2} . \quad (5)$$

Для контроля качества измерений магнитометров используются тесты на полное значение модуля B_t и угол магнитного наклонения DIP:

$$B_t = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} ; \quad (6)$$

$$Dip = \sin^{-1} \left[\frac{B_x G_x + B_y G_y + B_z G_z}{B_t G_t} \right] . \quad (7)$$

Для получения референсных значений G_{ref} используют глобальные гравитационные модели, референсные значения B_{ref} и DIP_{ref} берут из геомагнитной модели.

В отрасли для указанных тестов приняты следующие пределы допуска отклонения от референсных значений:

$$G_t = G_{tref} \pm 2,5 \text{ mg};$$

$$B_t = B_{tref} \pm 300 \text{ nT};$$

$$DIP = DIP_{ref} \pm 0,45^\circ .$$

По результатам процедур контроля качества выбирается соответствующая им модель ошибок, при помощи которой выполняется расчет неопределенности пространственного положения скважины. Доверительный интервал, принятый в отрасли, соответствует нахождению каждой съемочной точки скважины внутри эллипсоида неопределенности с уверенностью 95 %, или $2,79 \sigma$ (сигма).

Основные источники ошибок и коррекция измерений

На сырые замеры акселерометров и магнитометров влияют различные ошибки. Источник ошибки – это физическое явление, влияющее на ошибку при взятии замера прибором.

Основной вклад в неопределенность положения забоя скважины вносят систематические ошибки, векторы которых суммируются от измерения к измерению.

К основным источникам ошибок измерений в скважинах относятся [13]:

- ошибки датчиков;
- магнитное влияние КНБК;
- отклонение оси прибора от оси скважины;
- неопределенность магнитного поля Земли;
- ошибки измерения глубины.

Для нивелирования указанных ошибок применяются различные методы коррекции результатов измерений. Необходимость и возможность того или иного вида коррекции определяется по результатам процедур контроля качества измерений с учетом требований к точности проводки скважины.

Ошибки датчиков компенсируются регулярными калибровками, в ходе которых определяют значения смещений значений, масштабные коэффициенты и несоосности. После калибровки должны проводиться приемочные испытания. Контроль своевременного проведения калибровок скважинных измерительных систем нефтесервисным подрядчиком – одна из функций оператора-заказчика.

Осевое магнитное влияние КНБК возникает из-за входящих в ее состав магнитных компонентов и электронной аппаратуры. Это влияние в значительной степени зависит от направления скважины, наиболее неблагоприятными являются горизонтальные участки в западном и восточном магнитном направлении. Основное магнитное влияние бурильная колонна, винтовой забойный двигатель и приборы КНБК оказывают на Z-магнитометр. Существует два метода коррекции этого влияния: метод короткого НУБТ (SCC) и многостанционный анализ (MSA).

Метод короткого НУБТ (SCC) заключается в вычислении теоретического значения Z-магнитометра, основываясь на знании полного модуля индукции магнитного поля из модели, при этом значения X- и Y-магнитометров принимаются как истинные (поперечное магнитное влияние КНБК на телесистему на порядок ниже, чем осевое). Поправку вычисляют отдельно для каждой точки съемки. У метода есть значительные ограничения: к зоне исключения метода относятся участки скважины с зенитным углом более 50° и направлениями в диапазоне $\pm 20^\circ$ от магнитного востока и запада.

Метод многостанционного анализа описан Эндрю Бруксом в 1998 году [16], учитывает измерения на нескольких станциях съемки с использованием одной КНБК. Сущность метода заключается в такой коррекции значения Z-магнитометра, при которой дисперсия измерений модуля индукции магнитного поля по всем съемочным точкам минимальна. Подбор поправки в измерения Z-магнитометров выполняется с помощью линейной регрессии по методу наименьших квадратов.

Преимущество MSA заключается в более точной коррекции измерений и лучше подходит для случаев, когда КНБК попала в зону исключения предыдущего метода. В полном развитии метод позволяет проводить оценку смещения значений всех магнитометров и их масштабных коэффициентов, а применение специальных алгоритмов позволяет выявить ошибки опорного магнитного поля [17, 18].

Кросс-аксиальная коррекция компенсирует ошибки, связанные с поперечными магнитными помехами и смещениями значений X- и Y-магнитометров и акселерометров. Поправки рассчитываются на основе «ролл-теста», который включает в себя по меньшей мере четыре измерения, выполненных на постоянной глубине и при разных углах поворота инструмента вокруг оси.

Sag-коррекция – исправление значения зенитного угла из-за несоосности между измерительным прибором и стволом скважины, вызванного прогибом КНБК под своим весом. Метод обеспечивает уменьшение неопределенности вертикального положения скважины. Для этого используется ряд алгоритмов, от простых до анализа методом конечных элементов. Простые алгоритмы определяют точки опоры КНБК, такие как стабилизаторы, и количественно оценивают изгиб между этими точками. Метод применим если ствол скважины имеет одинаковый размер и форму, а КНБК стабилизирована. Применение sag-коррекции позволяет сократить вертикальную неопределенность скважины более чем на 40 %.

Снижение неопределенности магнитного поля Земли позволяет снизить латеральную неопределенность скважины. Улучшение достигается за счет применения параметров из более точных геомагнитных моделей. Использование моделей класса IFR1 и IFR2 позволяет компенсировать ошибки местных магнитных аномалий и влияние внешних магнитных возмущений. Применение моделей IFR и коррекции MSA позволяет сократить латеральную неопределенность на 40–60 % в зависимости от направления скважины.

Коррекция измерения глубины (MD) выполняется для компенсации влияния на бурильную колонну температуры и растяжения. Коррекция применяется для снижения неопределенности по направлению движения бурильной колонны. Алгоритм коррекции основан на эмпирических данных, используют коэффициент удлинения за счет растяжения бурильной колонны под своим весом и коэффициент температурного расширения стали.

Закключение

1. Точность определения траекторий скважин оказывает влияние на корректность геологических и гидродинамических моделей месторождений. Высокая пространственная неопределенность траекторий может привести к низкой продуктивности скважин, связанной с недостижением геологических целей, а также к риску пересечений скважин, что в итоге может оказать негативное влияние на экономическую эффективность проекта и его промышленную безопасность. Для повышения точности скважин необходим реальный контроль их пространственного положения со стороны операторов разработки УВС.

2. Для реализации контроля положения траекторий необходимо обеспечить передачу информации операторам разработки от нефтесервисных и геофизических подрядчиков.

Информация, передаваемая операторам, должна включать в себя:

- данные скважинных замеров MWD (6 осей);
- параметры, использованные при проводке скважины и расчете их траекторий, включая данные магнитных и гравиметрических моделей;
- данные о процедурах контроля качества измерений;
- данные о проведенных калибровках измерительных систем;

- сведения о примененных коррекциях измерений;
- обоснования примененной модели погрешности.

Также необходим контроль за недопущением внесения изменений в «сырые» замеры MWD со стороны полевых специалистов подрядных организаций.

3. В условиях отсутствия требований регулятора к проведению замеров забойными телесистемами операторам разработки и нефтесервисным компаниям необходимо разработать собственные регламенты замеров MWD с определением требований к контролю качества измерений, методик их коррекции и критериев применения моделей ошибок.

4. Функция контроля позиционной точности скважин со стороны операторов разработки должна быть реализована

маркшейдерскими службами, на которые нормативными документами возложены обязанности:

- определения пространственно-геометрических параметров подземных сооружений;
- обеспечения соблюдения параметров проектов разработки месторождений;
- контроля за рациональной разработкой месторождений и охраной недр;
- обеспечения промышленной безопасности ведения горных работ.

5. Программа подготовки горных инженеров-маркшейдеров включает в себя набор дисциплин, необходимых для обеспечения полноценного контроля траекторий скважин и выполнения функций, перечисленных в пункте 3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCE

1. Никифоров С.Н. История становления и современное состояние маркшейдерского дела в отечественной и зарубежной нефтегазодобывающей промышленности. *Маркшейдерия и недропользование*. 2009;3(41). [Nikiforov S.N. History of formation and current state of surveying in domestic and foreign oil and gas producing industry. *Surveying and subsoil use*. 2009;3(41) (In Russ.)]
2. Положение о лицензировании производства маркшейдерских работ, утв. Постановлением Правительства РФ от 16.09.2020 № 1467. *Собрание законодательства Российской Федерации*. 2020;39:6047. [Regulations on licensing of surveying works, approved by the Resolution of the Government of the Russian Federation from 16.09.2020 № 1467. *Collected Legislation of the Russian Federation*. 2020;39:6047 (In Russ.)]
3. Russia's Oil Drilling Boom Proves Moscow's Resilience to Western Sanctions. *Bloomberg*. Available from: Russia's Oil Drilling Boom Proves Moscow's Resilience to Western Sanctions.
4. Специалист по контролю и управлению траекторией бурения (геонавигации) скважин: профессиональный стандарт, утв. Приказом Минтруда России от 29.06.2017 № 533н. *Официальный интернет-портал правовой информации*. [Professional standard «Specialist in control and management of drilling (geo-navigation) trajectory of wells», approved by Order of the Ministry of Labor of Russia from 29.06.2017 № 533n. *Official Internet portal of legal information* (In Russ.)]. Available from: <http://www.pravo.gov.ru>.
5. Правила осуществления маркшейдерской деятельности, утв. Приказом Ростехнадзора от 19.05.2023 № 186. *Официальный интернет-портал правовой информации*. [Rules of surveying activities, approved by the Order of Rostekhnadzor of 19.05.2023 № 186 // Official Internet-portal of legal information (In Russ.)]. Available from: <http://pravo.gov.ru>.
6. Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах (РД 153-39.0-072-01), утв. Приказом Минэнерго РФ от 07.05.2001 № 134. [Technical Instruction on geophysical research and works with instruments on cable in oil and gas wells (RD 153-39.0-072-01), approved by the Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation from 07.06.2001 № 134. (In Russ.)]. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200056065>.
7. Introduction to Wellbore Positioning. Available from: Wellbore-eBook-V9.10.2017.pdf.
8. Definition of the ISCWSA Error Model Revision 5.13. Error model sub-committee. Available from: definition-of-iscwsa-error-model-v5-13.pdf.
9. Инструкция по проведению инклинометрических исследований в скважинах (дополнение к Технической инструкции по проведению геофизических исследований в скважинах), утв. Министерством геологии СССР 12.07.1988. Калинин, 1989: 14. [Instruction for conducting inclinometer surveys in boreholes (supplement to the Technical Instruction for conducting geophysical surveys in boreholes), approved by the Ministry of Geology of the USSR 12.07.1988. Kalinin, 1989: 14 (In Russ.)]
10. Five Primary Geomagnetic Reference Model Categories. Available from: five-primary-geomagnetic-reference-model-categories-rev2.pdf.
11. Maus S, Manoj CN, Poedjono B, et al. High Definition Geomagnetic Models: A New Perspective for Improved Wellbore Positioning. *The IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition*. San Diego, California, USA, 2012.
12. Maus S. Managing Main & Crustal Magnetic Fields and New Developments in Global Magnetic Modeling. *ISCWSA meeting 41*, London, 2015.
13. Williamson HS. Accuracy Prediction for Directional Measurement While Drilling. *SPE Drill & Compl.* 2000;15(04):221-33. DOI: 10.2118/67616-PA.
14. Ekseth R, Torkildsen T, Brooks A, et al. The Reliability Problem Related to Directional Survey Data. *IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition*. Bangkok, Thailand, 2006. DOI: 10.2118/103734-MS.
15. Ekseth R, Torkildsen T, Brooks A, et al. High Integrity Wellbore Surveys: Methods for Eliminating Gross Errors. *SPE/IADC Drilling Conference*. Amsterdam, The Netherlands, 2007. DOI: 10.2118/105558-MS.
16. Brooks A, Gurden P, Noy K. Practical Application of a Multiple-Survey Magnetic Correction Algorithm. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. New Orleans, Louisiana, USA, 1998. DOI: 10.2118/49060-MS.
17. Nymes E, Torkildsen T, Wilson H. Minimum Requirements for Multi-Station Analysis of MWD Magnetic Directional Surveys. *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference & Exhibition held in Manama*. Bahrain, 2009. DOI: 10.2118/125677-MS.
18. Bulychenkov K. Improving Multistation Analysis of MWD Directional Magnetic Surveys. *SPE Arctic and Extreme Environments Technical Conference and Exhibition*. Moscow, 2013. DOI: 10.2118/166865-MS.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Борис Николаевич Бухтояров –
начальник отдела маркшейдерско-геодезических работ
ООО «Газпром нефть шельф», 191186, г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация, e-mail: z9851275712@gmail.com

ABOUT THE AUTHORS

Boris N. Bukhtoyarov –
Head of Surveying and Geodesy Department, Gazprom Neft
Shelf LLC. 191186, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail:
z9851275712@gmail.com

Оксана Рашитовна Старикова –

заместитель начальника отдела маркшейдерско-геодезических работ ООО «Газпром нефть шельф»,
191186, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail:
oxy3791@gmail.com

Oksana R. Starikova –

Deputy Head of the Surveying and Geodesy Department of
Gazprom Neft Shelf LLC. 191186, St. Petersburg, Russian
Federation, e-mail: oxy3791@gmail.com

Критерии авторства / Contribution:

Б. Н. Бухтояров – написание текста статьи, сбор и анализ данных, выполнение работы по систематизации материала; О. Р. Старикова – участие в создании концепции статьи, сборе и анализе данных, редактирование текста статьи. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи. / B. N. Bukhtoyarov – writing the text of the article, data collection and analysis, work on systematization of the material; O. R. Starikova – participation in the creation of the concept of the article, data collection and analysis, editing the text of the article. All authors read and approved the final version of the manuscript.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 11.04.2025

Поступила после рецензирования: 28.05.2025.

Принята к публикации: 02.06.2025.

Article info

Received: 11.04.2025

Revised: 28.05.2025.

Accepted: 02.06.2025.