

На правах рукописи



АРДАШИРОВ АЙРАТ РОБИРТОВИЧ

**МЕТОДИКА АДАПТИВНОЙ КОРРЕКЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ
ПОГРЕШНОСТЕЙ ИНКЛИНОМЕТРОВ НА ОСНОВЕ
ФЕРРОЗОНДОВЫХ МАГНИТОМЕТРОВ И
АКСЕЛЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ**

Специальность 1.6.9 «Геофизика»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Уфа 2023

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (УГНТУ)

Научный руководитель: *Миловзоров Георгий Владимирович,*

доктор технических наук, профессор, директор Сарапульского политехнического института (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ижевский государственный технический университет имени М.Т.Калашникова»

Официальные оппоненты: - *Астраханцев Юрий Геннадьевич,*

доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории скважинной геофизики Института геофизики имени Ю.П. Булашевича УрО РАН (г. Екатеринбург)

– *Ясовеев Васих Хаматович,*

доктор технических наук, профессор кафедры электронной инженерии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» (г. Уфа)

Ведущая организация: – ООО «Нефтегазгеофизика» (г. Тверь)

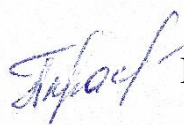
Защита диссертации состоится 21 декабря 2023 г. в 13³⁰ часов на заседании объединенного диссертационного совета 24.2.358.01 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» и на сайте университета <http://www.psu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 года.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в 2-х экземплярах направлять по юридическому адресу 614990, г. Пермь, ул. Букирева 15, ПГНИУ ученому секретарю диссертационного совета Красильникову Павлу Анатольевичу.

Ученый секретарь диссертационного совета, доктор геолого-минералогических наук, доцент



Красильников Павел Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Разрабатываемые месторождения нефти и газа имеют тенденции к истощению запасов, что требует вовлечение в эксплуатацию новых залежей. На разведанных и эксплуатируемых месторождениях применяют разработку по уплотненной сетке, а это влечет за собой строительство новых скважин и разбуривание старого фонда посредством боковых стволов. Геофизические исследования скважин (ГИС) играют особую роль при изучении геологического строения месторождений. Как при бурении, так и при выполнении геофизических исследований посредством каротажных работ первостепенное значение имеет пространственное расположение ствола, поскольку другие геофизические параметры имеют конкретную пространственную привязку. Такие геофизические исследования при контроле фактической траектории осуществляют с помощью инклинометрических устройств (ИнУ). ИнУ, используемые в открытом стволе при проведении геофизических исследований с применением каротажных технологий, менее подвержены механическим возмущениям. Забойные ИнУ, встраиваемые в компоновку низа буровой колонны, эксплуатируются в жестких условиях породоразрушения, сопровождаемого вибрационными и ударными перегрузками, а также и низкочастотными крутильными возмущениями. Дестабилизирующее воздействие возмущений приводит к появлению дополнительных динамических погрешностей измерений. Метрологические характеристики ИнУ регламентируются в метрологических службах геофизических производственных предприятий с использованием стационарных поверочных установок только в статических режимах, а динамическим процессам разработки инклинометрических систем уделяли недостаточное внимание. Поэтому разработка научно обоснованных решений в направлении снижения динамических погрешностей ИнУ является актуальной научной задачей и имеет важное значение как для геофизических исследований в открытом стволе, так и для геофизического сопровождения проводки скважин по проектной траектории.

Степень разработанности темы исследования. В становлении и развитии отечественной инклинометрии большой вклад внесли: Астраханцев Ю.Г., Белоглазова Н.А., Галета В.О., Гарейшин З.Г., Гринев И.В., Дьячков А.С., Заико А.И., Иголкина Г.В., Исаченко В.Х., Ковшов Г.Н., Козыряцкий Н.Г., Коловертнов Г.Ю., Коровин В.М., Королев А.Б., Леготин Л.Г., Лобанков В.М., Лутфуллин Р.Р., Малюга А.Г., Миловзоров Г.В., Миловзоров Д.Г., Молчанов А.А., Морозова Е.С., Нугаев И.Ф., Салов Е.А., Султанов С.Ф., Терешин В.Г., Цветков Г.А., Чупров В.П., Ясовеев В.Х и др.

На основе результатов теоретических исследований в области синтеза и анализа математического обеспечения ИНУ создано и применяется на практике объектно-ориентированное программное обеспечение. Метрологические характеристики ИНУ, как правило, регламентируются для условий лабораторного исследования. На практике встречаются существенные расхождения при выполнении замеров в открытом стволе скважины, получаемых геофизическими предприятиями при проведении каротажных работ, с замерами, проводимыми в процессе бурения на основе показаний забойных инклинометрических систем (телесистем). Вопросы теоретических и экспериментальных исследований динамических характеристик ИНУ при проявлении внешних возмущающих воздействий недостаточно глубоко изучены и представляются весьма актуальными.

Цель работы. Разработка научно обоснованных технических и методических решений, обеспечивающих улучшенные точностные показатели ИНУ в условиях воздействий низкочастотных крутильных возмущений при проведении геофизических исследований в открытом стволе и при геофизическом сопровождении проводки скважин по проектной траектории.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

- 1) определить источники динамических погрешностей и выявить факторы доминирующего влияния на точностные показатели ИНУ при

проведении геофизических исследований в открытом стволе и при геофизическом сопровождении проводки скважин;

- 2) выполнить анализ известного математического обеспечения ИнУ на основе феррозондовых и акселерометрических датчиков и выявить параметры, связанные с влиянием внешних возмущающих воздействий;
- 3) разработать математические модели трехкомпонентных акселерометрических и феррозондовых датчиков ИнУ, учитывающие параметры воздействия низкочастотных крутильных возмущений при геофизических исследованиях в открытом стволе, при геофизическом сопровождении проводки скважин и провести имитационное моделирование на ЭВМ;
- 4) выполнить анализ динамических погрешностей ИнУ и разработать методику их адаптивной программно-алгоритмической коррекции, основанной на верификации численных значений корректирующих параметров;
- 5) провести комплекс экспериментальных исследований и внедрить результаты в производственных организациях.

Методология и методы исследования. При решении теоретических задач использованы методы векторно-матричного математического аппарата и элементы кватернионного моделирования общей теории пространственной ориентации твердых тел. При проведении экспериментальных исследований использованы методы статистической обработки результатов измерений.

Объект исследований – скважинная инклинометрическая аппаратура.

Предмет исследований – динамические погрешности инклинометров, обусловленные крутильными воздействиями.

Положения, выносимые на защиту.

1. Результаты анализа источников динамических погрешностей ИнУ при геофизических исследованиях на кабеле и геофизическом сопровождении проводки скважин, на основе которого было выявлено доминирующее

влияние низкочастотных крутильных воздействий на измеряемые сигналы с акселерометрических и феррозондовых датчиков.

2. Совокупность новых математических моделей ИнУ, учитывающих влияние параметров крутильных воздействий на измеряемые сигналы с феррозондовых и акселерометрических датчиков.

3. Методика адаптивной коррекции измеряемых сигналов с акселерометров и феррозондов, включающая верификацию численных значений корректирующих параметров и программно - алгоритмический комплекс, обеспечивающий уменьшение динамических погрешностей ИнУ.

Научная новизна.

1. Новизной анализа источников динамических погрешностей, обусловленных спецификой эксплуатации ИнУ при проведении скважинных геофизических исследований в открытом стволе и при геофизическом сопровождении проводки скважин, *является то*, что, выявлено *доминирующее* влияние низкочастотных крутильных воздействий на значения измеряемых сигналов с феррозондовых и акселерометрических датчиков, *что позволяет* определить методологию решения последующих задач исследования.

2. Новизна математических моделей ИнУ *заключается в том*, что, при их разработке *впервые* предложено в векторно-матричные уравнения ввести матрицы дополнительных поворотов базиса корпуса скважинного прибора вокруг продольной оси на малые угловые параметры, определяемые совокупной задержкой последовательных опросов информационных сигналов с акселерометрических и феррозондовых датчиков при геофизических исследованиях на кабеле и геофизическом сопровождении проводки скважин, *что позволяет* сформировать основу программно-алгоритмической коррекции динамических погрешностей, обусловленных воздействием внешних крутильных возмущений.

3. Новизна разработанной методики адаптивной коррекции динамических погрешностей ИнУ *состоит в том*, что при ее реализации

учитываются различные варианты последовательностей опросов сигналов с феррозондовых и акселерометрических датчиков и осуществляется верификация численных значений малых угловых параметров, характеризующих внешние крутильные возмущения, что позволяет формализовать процедуру синтеза алгоритмов обработки результатов измерений.

4. Новизна разработанного программно-алгоритмического и методического обеспечения заключается в том, что оно основано на новых математических моделях, а также и на предложенной методике адаптивной коррекции измеряемых сигналов с акселерометрических и феррозондовых датчиков и верификации значений корректирующих параметров, что позволяет уменьшать в итоге динамические погрешности ИнУ при геофизических исследованиях на кабеле и геофизическом сопровождении проводки скважин.

Практическая значимость работы.

1. На основе обзора и анализа известных работ выявлены основные тенденции развития инклинометрии, а также выполнен анализ источников динамических погрешностей, в результате которого было выявлено доминирующее влияние низкочастотных крутильных воздействий на точностные показатели ИнУ при геофизических исследованиях на кабеле и геофизическом сопровождении проводки скважин.

2. Разработаны математические модели, учитывающие параметры информационных сигналов с акселерометрических и феррозондовых датчиков, а также параметры крутильных возмущений при геофизических исследованиях на кабеле и геофизическом сопровождении проводки скважин, составляющие в дальнейшем основу алгоритмов обработки результатов измерений.

3. Разработано методическое и программно - алгоритмическое обеспечение, основанное на новых математических моделях и реализующее методику адаптивной коррекции значений измеряемых информационных сигналов с

феррозондов и акселерометров и применением верификации значений корректирующих параметров, что обеспечивает уменьшение динамических погрешностей ИнУ.

Практическая ценность результатов работы подтверждается также внедрением результатов диссертации в производственные организации.

Степень обоснованности и апробация результатов. Диссертационная работа отражает результаты научных исследований, выполненных в период трудовой деятельности автора с 1998 по 2023 год в организациях ВНИИ «Нефтепромгеофизика» при АО НПФ «Геофизика», ООО НПП «СмартГИС» и ФГБОУ ВО «УГНТУ». Достоверность научных положений основана на корректности математических методов решения задач пространственной ориентации и имитационного моделирования на ЭВМ, а также подтверждена использованием современных методов обработки результатов экспериментальных данных и их согласованностью с теоретическими положениями. Результаты, представленные в диссертации, прошли рецензирование и опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК. Результаты, полученные при математическом моделировании ИнУ, привносят новую информацию в описании динамических процессов, обусловленных внешними возмущающими воздействиями на ИнУ при проведении геофизических исследований на кабеле в открытом стволе и при сопровождении бурения скважин.

Основные положения диссертационной работы и результаты исследований докладывались и обсуждались на: секции автоматизации производственных процессов международной научно-технической конференции «Проблемы нефтегазового комплекса России» (Уфа, 1998г.); Секции «В» «Новая техника и технологии для геофизических исследований скважин» VIII Конгресса нефтегазопромышленников России (Уфа, 2009 г.); VIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 60-летию Ижевского государственного технического университета имени М.Т.Калашникова «Приборостроение в XXI веке – 2012.

Интеграция науки, образования и производства» (Ижевск, 2012г.); 1 Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы науки и техники» (Сарапул, 2021г.); II Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы науки и техники», посвященной 70-летию ИМИ-ИжГТУ и 60-летию СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т.Калашникова» (Сарапул, 2022г.); XVIII Всероссийской научно-технической конференции «Приборостроение в XXI веке - 2022. Интеграция науки, образования и производства» (Ижевск, 23-25 нояб. 2022г.); III Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные вопросы энергомашиностроения, нефтяной и газовой отрасли», посвященной памяти профессора А.В.Алиева (Ижевск, 2023г.).

Реализация результатов работы. Научные положения диссертационной работы, а также результаты теоретических и экспериментальных исследований и практические разработки внедрены и используются в ОАО НПФ «Геофизика» (Уфа), в АО «Когалымнефтегеофизика» (г. Когалым).

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем. Опубликовано 12 научных работ, из них 3 – в научных журналах, рекомендованных ВАК (в соавторстве), 1 патент РФ на способ.

Личный вклад автора. Анализ и обобщение информации в области инклинометрии; разработка математического и программно-алгоритмического обеспечения; разработка методики адаптивной идентификации корректирующих параметров и верификации их численных значений; выполнение моделирования на ЭВМ и проведение вычислительных экспериментов; разработка специализированной установки и проведение комплекса экспериментальных исследований; внедрение результатов работы в производственных организациях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, изложенных на 152 с. машинописного текста. В работу

включены 59 рис., 11 табл., список литературы из 97 наименований и приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, выявлена степень ее разработанности, сформулированы цель, задачи, методы исследований, научная новизна, практическая значимость и положения, выносимые на защиту, приведены сведения о реализации и апробации результатов работы.

В первой главе рассматриваются вопросы актуальности инклинометрии скважин применительно к геофизическим исследованиям в скважинах при проведении каротажных работ в открытом стволе и к бурению по проектной траектории, выполняется обзор анализ известных работ в области инклинометрии, приводится обобщенная структура ИнУ с феррозондовыми и акселерометрическими датчиками и принцип действия, рассматривается проблематика возмущающих воздействий на ИнУ и осуществляется постановка задач исследований в диссертационной работе.

Во второй главе рассматриваются вопросы математического моделирования ИнУ с трехкомпонентными акселерометрическими и феррозондовыми датчиками, описан общий подход в моделировании ИнУ, основанный на классической теории пространственной ориентации твердых тел и выполняется анализ известных математических моделей.

В третьей главе рассматриваются вопросы математического моделирования ИнУ с трехкомпонентными акселерометрическими и феррозондовыми датчиками в условиях воздействия внешних крутильных возмущений, а также выполняется анализ динамических погрешностей определения искомых углов (азимута, зенитного и визирного углов) в зависимости от амплитуды и частоты крутильных возмущений, а также и последовательностей опроса информационных сигналов.

В четвертой главе рассматриваются вопросы разработки стратегии в идентификации параметров динамических погрешностей ИнУ,

обусловленных воздействием крутильных возмущений, формулируются научно обоснованные критерии выявления этих динамических погрешностей, разрабатывается методика их адаптивной коррекции, выполняется разработка программно - алгоритмического обеспечения обработки данных и приводятся результаты имитационного моделирования на ЭВМ и экспериментальных исследований.

ПЕРВОЕ ЗАЩИЩАЕМОЕ ПОЛОЖЕНИЕ

Результаты анализа источников динамических погрешностей ИнУ при геофизических исследованиях на кабеле и геофизическом сопровождении проводки скважин, на основе которого было выявлено доминирующее влияние низкочастотных крутильных воздействий на измеряемые сигналы с акселерометрических и феррозондовых датчиков.

В результате обзора и критического анализа в области современной инклинометрии выявлено, что наиболее распространенной тенденцией остается построение скважинных приборов ИнУ на основе триады акселерометрических и феррозондовых датчиков. На рисунке 1 показана типичная структура инклинометрических устройств. Измерительные сигналы с датчиков скважинного прибора преобразуются в цифровые коды, которые передаются по каналу связи (кабельному или беспроводному) в наземную часть, где происходит обработка и регистрация определяемых углов – магнитного азимута α , зенитного угла θ и визирного угла φ .

Рассмотрена проблематика возмущающих воздействий на ИнУ в различных условиях эксплуатации (рисунок 2). Вибрационные и ударные знакопеременные перегрузки, порождаемые самим процессом породоразрушения на забое скважины, оказывают негативное влияние на точностные показатели ИнУ, но могут быть устранены путем усреднения при статистической обработке результатов замеров или размещения скважинного прибора в дополнительном амортизирующем контейнере. Показано, что при роторном бурении забойное ИнУ находится в постоянном вращении вместе с колонной бурильных труб. Кабельные ИнУ, применяемые при ГИС, характеризуются недостоверными данными на интервале «раскрутки» (порядка нескольких десятков метров). Забойные ИнУ эксплуатируются при

крутильных возмущениях. Особое место в рассматриваемой проблематике занимают крутильные низкочастотные возмущения.

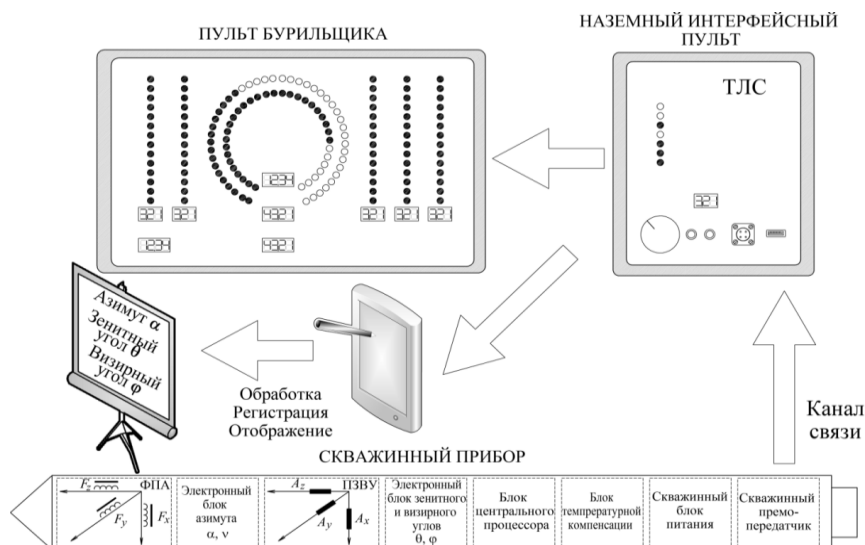


Рисунок 1 - Структура забойной инклинометрической системы

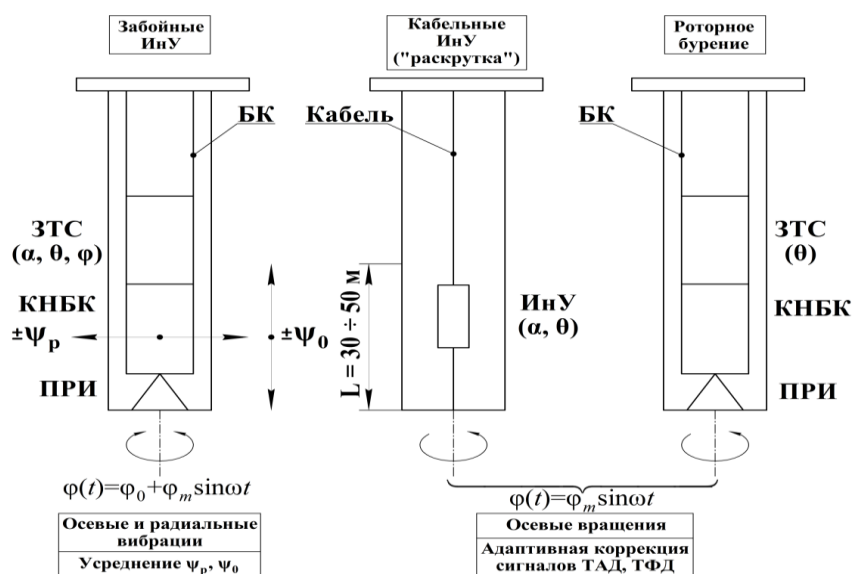


Рисунок 2 – Источники внешних механических возмущений на ИнУ

На рисунке 3 представлены примеры каротажных инклинограмм, формируемых при геофизических замерах в открытом стволе, на которых наглядно показаны призабойные участки недостоверных данных, характеризующихся эффектом «раскрутки» скважинного прибора, обусловленном пружинно-упругими свойствами каротажного кабеля.

При анализе фактических инклинограмм, получаемых при геофизических исследованиях на кабеле в открытом стволе, и данных замеров с помощью забойных ИнУ (телесистем), получаемых в процессе

сопровождения скважин (рисунок 4), выявлено, что зачастую имеются существенные расхождения, достигающих единиц (десятков) градусов. Анализ источников погрешностей, обусловленных внешними возмущающими воздействиями на скважинную аппаратуру ИнУ, показывает, что устранить их полностью затруднительно. Перечисленные возмущения могут проявляться как в отдельности, так и в совокупности. Но при этом показано, что доминирующее влияние оказывают низкочастотные крутильные возмущения.

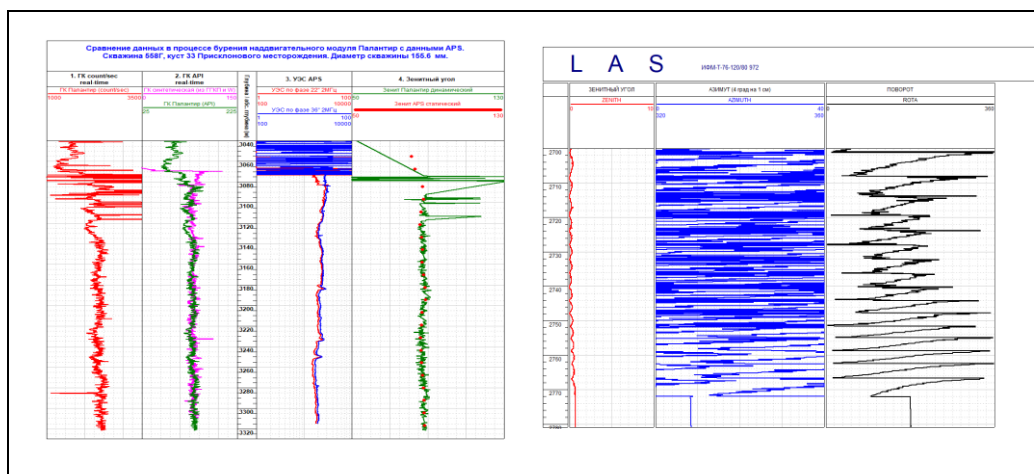


Рисунок 3 – Фрагменты инклинограмм с призабойным интервалом

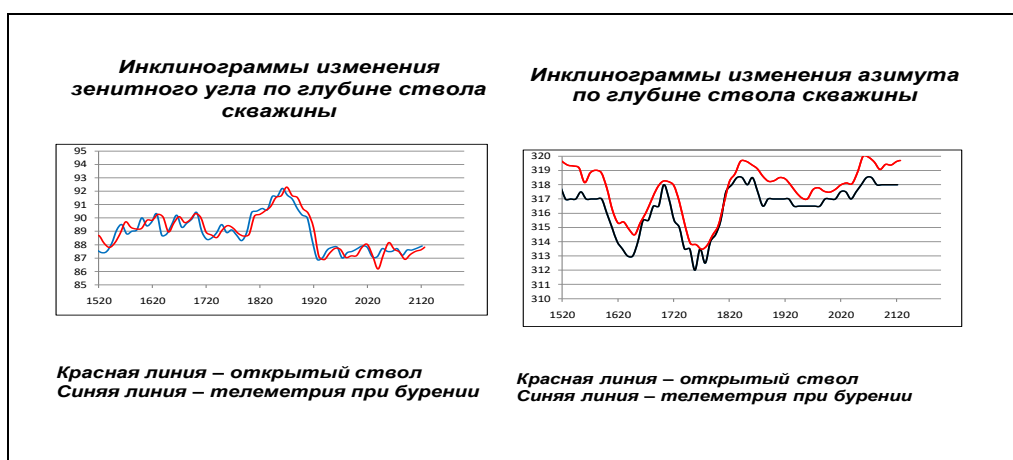


Рисунок 4 – Расхождения инклинограмм изменения зенитного угла и азимута по глубине ствола скважины

Это подтверждает актуальность темы диссертации в плане исследований динамических характеристик ИнУ и разработки научно обоснованных технических и методических решений, обеспечивающих улучшенные точностные показатели ИнУ.

В завершающем разделе первой главы сформулированы развернутые задачи, направленные на достижение цели диссертационной работы.

В работе рассмотрен общий подход в математическом моделировании Ину. На рисунке 5 показан основной базис R_0 , базис корпуса R_k и искомые углы пространственной ориентации скважинного прибора Ину - α , θ и φ .

Выявлено, что при математическом моделировании Ину используются в основном два метода – метод матриц и метод кватернионов. В соответствии с матричным методом для обозначенных отдельных плоских поворотов применительно к вектору ускорения свободного падения \vec{G} и к полному вектору индукции геомагнитного поля \vec{M} составляются следующие векторно-матричные уравнения (ВМУ):

$$\left. \begin{aligned} \vec{G}_{Rk} &= A_{\varphi(z)} A_{\theta(y)} \vec{G}_{R0} \\ \vec{M}_{Rk} &= A_{\varphi(z)} A_{\theta(y)} A_{\alpha(z)} \vec{M}_{R0} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где \vec{G}_{R0} и \vec{M}_{R0} – проекции векторов \vec{G} и \vec{M} в основном базисе $R_0(0, X_0, Y_0, Z_0)$, \vec{G}_{Rk} и \vec{M}_{Rk} проекции векторов \vec{G} и \vec{M} в базисе корпуса скважинного прибора $R_k(0, X_k, Y_k, Z_k)$; $A_{\varphi(z)}$, $A_{\theta(y)}$ и $A_{\alpha(z)}$ – матрицы направляющих косинусов.

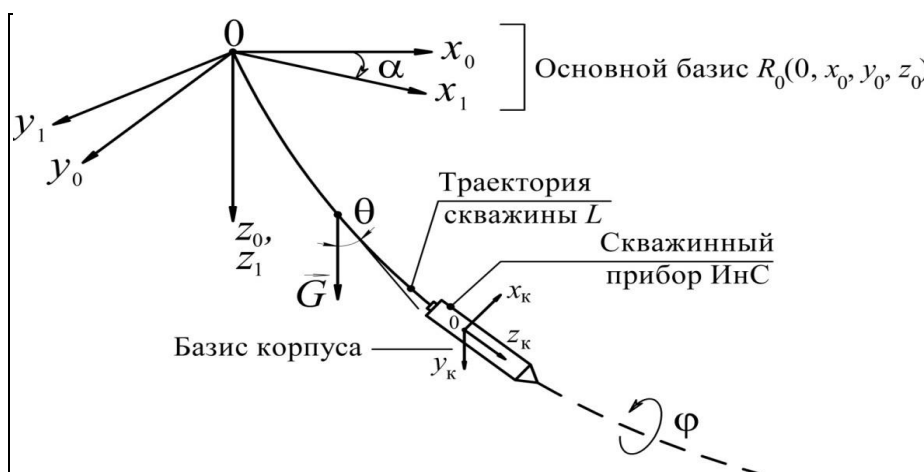


Рисунок 5 – Базисы и углы пространственной ориентации

Данные уравнения (1) позволяют выполнить детальный анализ и исследовать характер изменений каждой из измеряемых проекций $g_i(x,y,z)$ и $m_i(x,y,z)$ по диапазонам углов α , θ и φ , а также и получить базовые статические математические модели для трехкомпонентного акселерометрического датчика (ТАД) и трехкомпонентного феррозондового датчика (ТФД):

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \operatorname{arctg} \frac{g_y}{-g_x} \\ \theta &= \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{g_x^2 + g_y^2}}{g_z} \end{aligned} \right\}; \quad \alpha_k = \operatorname{arctg} \frac{-\tilde{m}_x \sin(\varphi_h) - \tilde{m}_y \cos(\varphi_h)}{[-\tilde{m}_x \cos(\varphi_h) + \tilde{m}_y \sin(\varphi_h)] \sin \theta_h + \tilde{m}_z \cos \theta_h}. \quad (2)$$

Однако данные известные результаты приемлемы лишь к статике и не учитывают дополнительные динамические погрешности. Но сама методика составления ВМУ и известные математические модели в последующих разделах составят основу синтеза математического обеспечения в рассматриваемых условиях эксплуатации ИнУ.

ВТОРОЕ ЗАЩИЩАЕМОЕ ПОЛОЖЕНИЕ

Совокупность новых математических моделей ИнУ, учитывающих влияние параметров крутильных воздействий на измеряемые сигналы с феррозондовых и акселерометрических датчиков.

На рисунке 5 показано изменение визирного угла φ в условиях наличия крутильных возмущений.

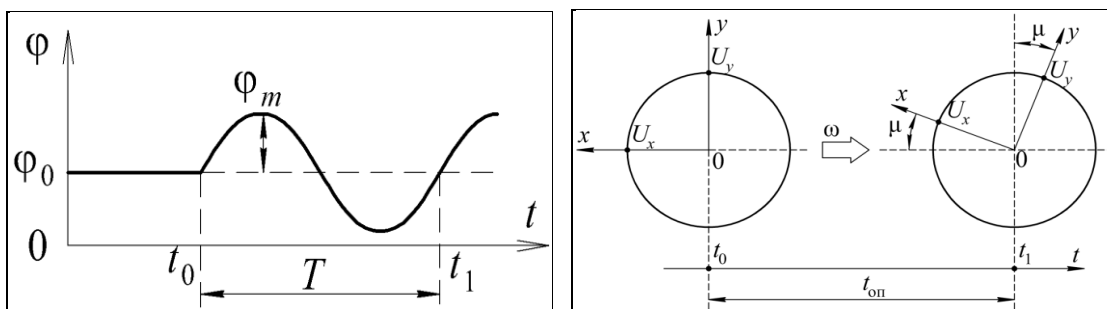


Рисунок 5 - Временная функция $\varphi(t)$ и поворот базиса ТАД

Крутильные колебания, представляющие собой внешние воздействия, осуществляются вокруг оси OZ_k и описываются временной функцией моногармонического сигнала (рисунок 5) $\varphi(t) = \varphi_0 + \varphi_m \sin \omega t$, где $\omega = T/(2\pi)$ – частота колебаний; $\varphi(t) \in 0 \dots 360^\circ$.

Отмечено, что измеряемый сигнал $g_z(t)$ с ТАД, является инвариантным к крутильным колебаниям, т.е. $g_z(t) = g_z$.

Тогда измеряемые проекции $g_i(t)$ будут иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} g_x(t) &= -g \cos\{\varphi_0 + \varphi_m \sin[\omega(t + \tau_x)]\} \sin \theta \\ g_y(t) &= g \sin\{\varphi_0 + \varphi_m \sin[\omega(t + \tau_y)]\} \sin \theta \\ g_z &= g \cos \theta \end{aligned} \right\}.$$

Получены также и аналогичные математические модели для сигналов с феррозондов в виде временных функций. Тут применительно к рассматриваемой тематике предложено ввести само понятие «задержка». Длительность опроса каждого сигнала с датчиков включает в себя два интервала – время переходного процесса при коммутации и время самого аналого-цифрового преобразования. Варианты формирования последовательности опроса измеряемых информационных сигналов с акселерометрических и феррозондовых датчиков представлены в таблице 1.

Таблица 1

| Вариант | A0 | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|---------|
| 1 | g_x | g_y | g_z | m_x | m_y | m_z | $U_{пит}$ | T, град |
| 2 | g_x | g_y | m_x | m_y | g_z | m_z | $U_{пит}$ | T, град |
| 3 | g_x | m_x | g_y | m_y | g_z | m_z | $U_{пит}$ | T, град |
| 4 | g_x | m_x | g_y | m_y | g_z | m_z | - | - |

При возникновении крутильных возмущений с круговой частотой ω и при «задержке» в опросах датчиков по сути происходит поворот базиса корпуса скважинного прибора вокруг оси OZ на угол μ . Таким образом возникает «искусственная неортогональность» (рисунок 5) между осями чувствительности опрашиваемых акселерометрических датчиков, что и является причиной появления динамических погрешностей в ИиУ.

В математическом моделировании ТАД нужно рассматривать уже два ВМУ. Причем из первого ВМУ системы (1) берется проекция вектора \vec{G} на ось OX, а из второго ВМУ - проекция вектора \vec{G} на ось OY, в которой учитывается угол μ :

$$\left. \begin{aligned} \vec{G}_{Rkx} &= A_{\varphi(z)} A_{\theta(y)} \vec{G}_{R0} \\ \vec{G}_{Rky} &= A_{\mu(z)} A_{\varphi(z)} A_{\theta(y)} \vec{G}_{R0} \end{aligned} \right\}, \quad \left. \begin{aligned} g_x &= -\cos\varphi \sin\theta \\ g_y &= \sin(\mu + \varphi) \sin\theta \end{aligned} \right\}.$$

На рисунках 6 в качестве примеров представлены зависимости распределения погрешностей ТАД.

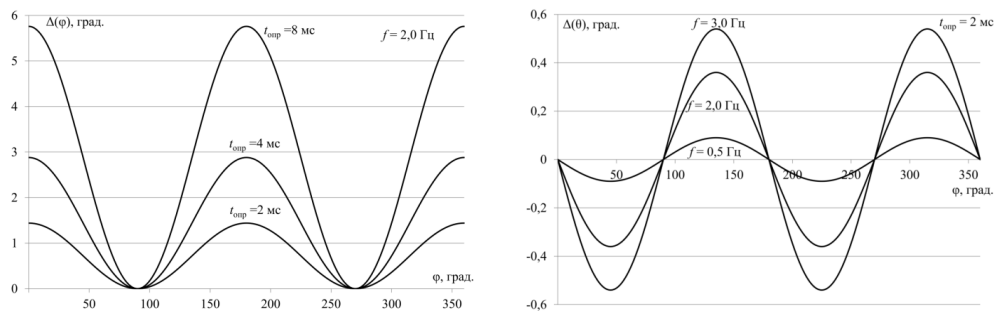


Рисунок 6 - Графики распределения погрешностей $\Delta(\varphi)=F(\varphi)$ и $\Delta(\theta)=F(\varphi)$ при $f = 2,0$ Гц.

Аналогичный подход используется и при анализе ТФД, входящего в состав ФПА, и второе ВМУ системы (1) должно быть представлено в следующем виде

$$\vec{M}_{Rk} = A_{\mu(z)}A_{\varphi(z)}A_{\theta(y)}A_{\alpha(z)}\vec{M}_{R0}.$$

Здесь дополнительно введена матрица направляющих косинусов $A_{\mu(z)}$, характеризующая поворот корпуса вокруг оси OZ на угол μ . Выражения для сигналов с феррозондов F_x и F_y имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} m_x &= \{-\sin\vartheta\cos\psi\sin\theta + \cos\vartheta[\cos\alpha\cos\theta\cos\psi - \sin\psi\sin\alpha]\} \\ m_y &= [\sin\vartheta\sin\psi\sin\theta - \cos\vartheta[\cos\alpha\cos\theta\sin\psi + \cos\psi\sin\alpha]] \end{aligned} \right\}$$

где $\psi = \varphi + \mu$.

По представленным аналитическим выражениям получены математические модели погрешностей определения азимута при различных частотах f крутильных колебания и времени задержки τ_{xy} , а также и семейство графиков, аналогично рисунку 6. Совокупность аналитических выражений представляют собой новые математические модели и составляют основу методики адаптивной коррекции динамических погрешностей Ину.

ТРЕТЬЕ ЗАЩИЩАЕМОЕ ПОЛОЖЕНИЕ

Методика адаптивной коррекции измеряемых сигналов с акселерометров и феррозондов, включающая процесс верификации численных значений корректирующих параметров и программно - алгоритмический комплекс, обеспечивающий уменьшение динамических погрешностей Ину.

Разработана методика идентификации корректирующих параметров, включая верификацию их численных значений для различных вариантов последовательностей опросов измеряемых сигналов с акселерометров и

феррозондов (таблица 1), которая включает несколько этапов для ТАД и ТФД. Для первого варианта последовательности на первом этапе из системы скалярных трансцендентных уравнений ТАД

$$\left. \begin{aligned} g_x &= -\cos\varphi\sin\theta \\ g_y &= (\sin\varphi\cos\mu + \cos\varphi\sin\mu)\sin\theta \\ g_z &= \cos\theta \end{aligned} \right\} \text{ и критерия } \sqrt{[\bar{g}_x^2 + \tilde{g}_y^2 + \bar{g}_z^2]} = 1,$$

ограничиваясь первым порядком малости с учетом допущения $\cos\mu \rightarrow 1$ и $\sin\mu \rightarrow \mu$, определяют скорректированное значение \tilde{g}_y и малый угловой параметр $\mu_h = \frac{1 - [\bar{g}_x^2 + \bar{g}_y^2 + \bar{g}_z^2]}{2\bar{g}_x}$ («грубо»). На втором этапе путем варьирования

полученного μ_h выполняют процесс верификации его численного значения («точно») путем инкрементирования (или декрементирования) до достижения

условия критерия минимума модуля $\left| 1 - \sqrt{[\bar{g}_x^2 + \tilde{g}_y^2 + \bar{g}_z^2]} \right|$. По

полученным уточненным значениям \tilde{g}_y выполняют вычисление искомого зенитного и визирного углов θ_h ; φ_h .

На следующем этапе для ТФД по измеренным сигналам с феррозондов для первого варианта таблицы 1 с учетом уточненного параметра μ_h после верификации его численного значения для ТАД, ограничиваясь первым порядком малости, определяют величины сигналов с феррозондовых датчиков $\tilde{m}_x = \bar{m}_x - 6\mu_h\bar{m}_y$ и $\tilde{m}_y = \bar{m}_y + 8\mu_h\bar{m}_x$ («грубо»). На последующем этапе также путем варьирования μ_h выполняют верификацию его численного значения («точно»), но уже применительно к ТФД до достижения критерия

минимума модуля разницы $\left| 1 - \sqrt{[\tilde{m}_x^2 + \tilde{m}_y^2 + \bar{m}_z^2]} \right|$. На завершающем

этапе выполняют вычисление искомого азимута по математической модели

$$\alpha_k = \arctg \frac{-\tilde{m}_x \sin(\varphi_h) - \tilde{m}_y \cos(\varphi_h)}{[-\tilde{m}_x \cos(\varphi_h) + \tilde{m}_y \sin(\varphi_h)] \sin\theta_h + \bar{m}_z \cos\theta_h}.$$

Аналогичный подход к формированию этапов и реализации методики идентификации корректирующих параметров μ_h и процессов верификации численных значений μ_h , \tilde{g}_y для ТАД и значений \tilde{m}_x и \tilde{m}_y для ТФД применим

и всех остальных вариантов опроса информационных сигналов с акселерометров и феррозондов, приведенных в таблице 1. При этом учитываются соответствующие кратные коэффициенты при параметре μ_h .

На основе предложенной адаптивной методики разработано соответствующее программно-алгоритмическое обеспечение, применение которой позволяет осуществлять коррекцию измеряемых сигналов с акселерометров и феррозондов и снизить в конечном итоге динамические погрешности ИнУ, обусловленные влиянием низкочастотных крутильных возмущений.

В работе также разработано соответствующее программно-алгоритмическое обеспечение, которое было применено и реализовано при постановке и проведении имитационного моделирования на ЭВМ. В результате этого вычислительного эксперимента в рамках имитационного моделирования была подтверждена адекватность разработанных и предложенных математических моделей ТАД и ТФД в ИнУ. Структуры разработанных алгоритмов приведены в тексте диссертационной работы.

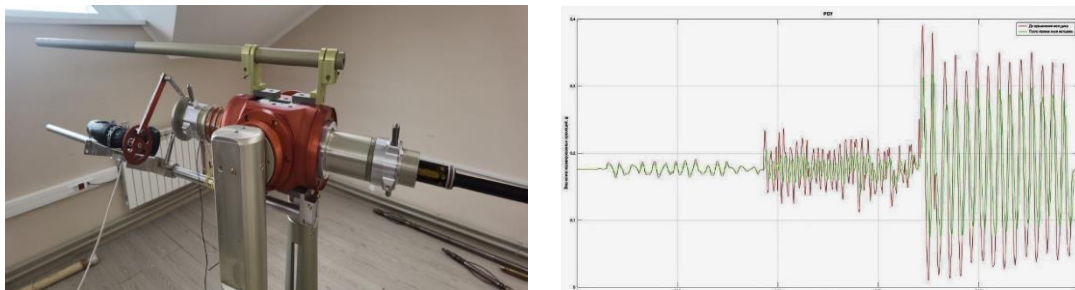


Рисунок 7 Внешний вид установки и графическая интерпретация результатов экспериментальных исследований

На рисунке 7 показан внешний вид разработанной специализированной экспериментальной установки, позволяющей выполнять исследования динамических характеристик ИнУ в условиях низкочастотных крутильных колебаний. Основу данной установки составляет поворотный инклинометрический стол, обеспечивающий контролируемые задания углов пространственной ориентации скважинному прибору. Традиционная компоновка подобного рода поворотного стола дополнена кинематическим узлом с электроприводом на постоянном токе и обеспечивающим задаваемые

значения визирного угла, а также и крутильные колебания вокруг него с конкретной частотой и амплитудой.

По результатам проведенных экспериментальных исследований было установлено, что применение разработанного программно-алгоритмического комплекса при обработке численных значений измеряемых сигналов с феррозондовых и акселерометрических датчиков с учетом корректирующих параметров удалось уменьшить динамические погрешности определения искомых углов пространственной ориентации не менее, чем на 10-15 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате обзора и критического анализа известных работ и публикаций в области разработки и создания инклинометрической аппаратуры установлено, что в современном развитии инклинометрии сохраняется тенденция в традиционном применении в ИнУ трехкомпонентных геомагнитометров и трехкомпонентных акселерометрических датчиков. Выявлено, что между замерами в открытом стволе при традиционном каротаже ГИС и замерами забойными ИнУ при геофизическом сопровождении проводки скважин могут проявляться существенные расхождения по азимуту и зенитному углу, обусловленные воздействием на скважинный прибор внешних механических возмущений, достигающих единиц градусов и более. При анализе источников динамических погрешностей ИнУ выявлено, что доминирующее влияние на точностные показатели оказывают внешние воздействия в виде низкочастотных крутильных возмущений.

2. На основе анализа известных методов математического моделирования ИнУ установлено, что в плане теоретических исследований достигнуты фундаментальные и основополагающие результаты, позволяющие выполнять математическое моделирование различных вариантов компоновки скважинных приборов с феррозондовыми и акселерометрическими датчиками путем применения классических основ векторно-матричного математического аппарата и общей теории кватернионов. Установлено, что базовые положения в математическом описании трехкомпонентных акселерометрических датчиков и трехкомпонентных феррозондовых датчиков могут составить основу и быть применимы в моделировании и исследовании динамических погрешностей.

3. На основе анализа принципа структурного построения ИиУ и формирования алгоритмов функционирования выявлено, что при организации последовательных опросов информационных сигналов с феррозондов и акселерометров имеют место временные задержки, обусловленные рядом факторов, включая постоянные времени измерительных каналов, аналого-цифрового преобразования и др. Предложено суммарные временные задержки в опросах сигналов с датчиков ИиУ при проведении скважинных геофизических исследований в открытом стволе и при геофизическом сопровождении проводки скважин идентифицировать в виде дополнительного угла поворота базиса корпуса скважинного прибора вокруг продольной оси на величину μ . Разработаны новые математические модели ТАД и ТФД, учитывающие малый угловой параметр μ , и выполнен их анализ, который позволил произвести количественную оценку дополнительных динамических погрешностей ИиУ при различных сочетаниях времени задержки и частоты крутильных колебаний, а также наглядно представить характер распределения погрешностей искомых углов по диапазонам измерений.

4. Выполнен анализ динамических погрешностей ИиУ, обеспечивающий оценку их численных значений в функциях частоты крутильных возмущений и временной совокупной задержки для различных последовательностей опросов измеряемых сигналов, а также позволяющий исследование характера распределений этих погрешностей по диапазонам искомых углов. Разработана методика идентификации параметров динамических погрешностей ТАД и ТФД для различных вариантов последовательного опроса информационных сигналов с феррозондов и акселерометров. Разработана методика адаптивной коррекции динамических погрешностей ТАД и ТФД, основанная на верификации численных значений малого углового параметра μ .

5. Разработано алгоритмическое обеспечение и выполнено имитационное моделирование на ЭВМ, в результате которого подтверждена адекватность разработанных математических моделей ИиУ. Разработана специализированная установка и проведены экспериментальные исследования динамических погрешностей ИиУ. При этом показано, что предложенная методика адаптивной алгоритмической коррекции позволяет уменьшить динамические погрешности на 10-15 %.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах из перечня ВАК:

1. **Ардаширов, А.Р.** О применении кватернионов в математическом моделировании трехкомпонентных векторно-измерительных преобразователей / Е.С. Морозова, Д.Г. Миловзоров, А.С. Дьячков, А.Р. Ардаширов // Информационно-измерительные и управляющие системы. - 2012.- №12.- С.42-47 (личный вклад автора 25%).

2. **Ардаширов, А.Р.** Автономная геофизическая система «Горизонталь» с доставкой на бурильных трубах / Р.Д. Ахметсафин, А.А. Булгаков, И.Р. Габдрахманов, В.И. Дворкин, В.Я. Иванов, М.А. Сулейманов, В.Н. Служаев, А.Р. Ардаширов, А.Р. Лаздин // Научно-технический вестник «Каротажник». 2005. №10-11(137-138). - С. 39-46 (личный вклад автора 11%).

3. **Ардаширов, А.Р.** Анализ динамических погрешностей забойных инклинометрических систем в условиях внешних крутильных возмущений / А.Р. Ардаширов, Г.В. Миловзоров, А.Г. Миловзоров // Научно-технический вестник «Каротажник». 2023. Вып. 1(321). - С.95-105 (личный вклад автора 33 %).

Патент РФ

4. Пат. 2433262 Российская Федерация, МПК С1 Е21 В 47/022, G01V3/00, G01C25/00. Способ контроля азимутальной направленности скважины с использованием GPS (варианты) и поверочная инклинометрическая установка для реализации способа контроля азимутальной направленности скважины с использованием GPS [Текст] / В.М. Коровин, И.Т. Галимов, А.Р. Ардаширов, А.А. Шилов, Г.З. Валеев; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Башнефтегеофизика» RU.- № 2010115943/03; заявл. 21.04.2010; опубл. 10.11.2011, Бюл. №31. – 10 с.: ил.

В других изданиях

5. **Ардаширов, А.Р.** Анализ влияния разброса коэффициентов передачи акселерометров на точность измерения зенитного и визирного углов в инклинометрах / Г.В. Миловзоров, С.Ф.Султанов, А.Р. Ардаширов // Проблемы нефтегазового комплекса России: Материалы международной науч. -техн. конф. - Уфа, 1998. - Т1-С.46 — 50 (личный вклад автора 33 %)..

6. **Ардаширов, А.Р.** Новые разработки геонавигационных систем для процесса бурения / А.Р. Ардаширов // Новые достижения в технике и технологии геофизических исследований скважин. Тезисы докладов Секции «В» VIII Конгресса нефтегазопромышленников России. Уфа, 26-29 мая 2009. Уфа: Изд-во «НПФ Геофизика». 2009. С.36-38 (личный вклад автора 100 %).

7. **Ардаширов, А.Р.** Малогабаритный трёхкомпонентный магнитометр с произвольно ориентированными феррозондами / Д.Г. Миловзоров, А.Р.

Ардаширов, Р.Р. Садрутдинов // Приборостроение в XXI веке – 2012. Интеграция науки, образования и производства: материалы VIII Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, посвященной 60-летию Ижевского государственного технического университета имени М.Т.Калашникова (Ижевск, 14-16 ноября 2012г.). Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2012. С.313-315 (личный вклад автора 33 %).

8. **Ардаширов, А.Р.** О построении преобразователей параметров наклона с акселерометрическими датчиками / Д.Г. Миловзоров, А.Р. Ардаширов, А. С. Дьячков // Измерение, контроль, информатизация (ИКИ – 2013): материалы XIV международной научно-технической конференции. Том 2 / под ред. Л.И. Сучковой. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2013. С. - 128-133 (личный вклад автора 33 %).

9. **Ардаширов, А.Р.** Сравнительный анализ технических характеристик забойных инклинометрических систем с гидравлическим каналом связи / А.Д. Миронов, А.Г. Миловзоров, А.Р. Ардаширов // Новая техника и технологии для геофизических исследований скважин. Тезисы докладов конференции в рамках XXI Международной специализированной выставки «Газ. Нефть. Технологии-2013». Уфа: Изд-во «НПФ Геофизика». 2013. С.185-190 (личный вклад автора 33 %).

10. **Ардаширов, А.Р.** О применении инклинометрического модуля в скважинной геофизической аппаратуре / А.Р. Ардаширов // Актуальные проблемы науки и техники: матер. I Междунар. науч.-техн. конф. (Сарапул, май 2021 г.) / [Электронный ресурс]. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М.Т.Калашникова, 2021. С.265-269 (личный вклад автора 100 %).

11. **Ардаширов, А.Р.** О динамических погрешностях инклинометрических систем / А.Р. Ардаширов, Г.В. Миловзоров // Актуальные проблемы науки и техники: матер. II Междунар. науч.-техн. конф., посв. 70-летию ИМИ - ИжГТУ и 60-летию СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т.Калашникова» (Сарапул, 19-21 мая 2022 г.) / [Электронный ресурс]. – Ижевск: Изд-во УИР ИжГТУ имени М.Т.Калашникова, 2022. С.497-501.

12. **Ардаширов, А.Р.** Особенности функционирования инклинометров в условиях воздействия низкочастотных крутильных колебаний / Г.В. Миловзоров, А.Р. Ардаширов, Д.Г. Миловзоров // Приборостроение в XXI веке - 2022. Интеграция науки, образования и производства: сборник материалов XVIII Всероссийской научно-технической конференции (Ижевск, 23-25 нояб. 2022 г.). – Ижевск: Изд-во УИР ИжГТУ имени М.Т.Калашникова, 2023. С.218-222 (личный вклад автора 33 %).