

Федеральное агентство железнодорожного транспорта
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Петербургский государственный университет путей сообщения Императора
Александра I»

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет

На правах рукописи

Волков Никита Викторович



**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ
ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ НА
ПОДРАБАТЫВАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЯХ НЕФТЕГАЗОВЫХ
КОМПЛЕКСОВ**

Специальность 25.00.32 – Геодезия

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ -
доктор технических наук,
профессор М.Я. Брынь

Санкт-Петербург - 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 СУЩЕСТВУЮЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ЗАДАЧИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИЗУЧЕНИЯ СОВРЕМЕННОЙ ГЕОДИНАМИКИ И ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛИГОНАХ НЕФТЕГАЗОВЫХ КОМПЛЕКСОВ.....	10
1.1 Анализ опыта изучения геомеханических и геодинамических процессов геодезическими методами на месторождениях нефти и газа	10
1.2 Современное состояние решения геодинамических и геомеханических задач геодезическими методами на геодинамических полигонах месторождений углеводородов	16
Выводы по главе 1.....	22
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ПОСТАНОВКИ ПОВТОРНОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ НА ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛИГОНАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ.....	24
2.1 Научно-техническое обоснование подхода к постановке повторного нивелирования на ГДП месторождений углеводородов.....	24
2.2 Предложения по выбору исходных и контрольных нивелирных пунктов ГДП нефтегазовых месторождений	26
2.3 Пространственно-временные аспекты постановки повторных геодезических наблюдений на ГДП НГМ.....	33
2.4 Методика оценки значимости результатов повторного нивелирования...	42
Выводы по главе 2.....	45
ГЛАВА 3 РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ВЛИЯНИЯ ПРИРОДНЫХ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ПОВТОРНОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ	47

3.1 Постановка проблемы влияния природных геомеханических процессов на результаты повторного нивелирования	47
3.2 Исследование и физико-математическое моделирование воздействий геотемпературного поля на устойчивость нивелирных пунктов.....	53
3.3 Исследование механизма и разработка методов исключения воздействий морозного пучения грунтов на устойчивость нивелирных пунктов	67
3.3.1 Исследование механизма и разработка метода исключения воздействия морозного пучения на нивелирные пункты в сезонно промерзающих грунтах	67
3.3.2 Исследование механизма и разработка метода исключения воздействий морозного пучения на нивелирные пункты в многолетнемерзлых грунтах ...	74
Выводы по главе 3	77
ГЛАВА 4 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	79
4.1 Характеристика полученных результатов исследований	79
4.2 Внедрение результатов исследований на ГДП Ямбургского НГКМ	80
Выводы по главе 4.....	92
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	94
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	96
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Конструкция трубчатого грунтового нивелирного пункта Тип 150.....	109
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Акт внедрения НПО «ЭНЕРГОГАЗИЗЫСКАНИЯ».....	110

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Повышение интенсивности долговременной добычи углеводородов и усложнение технологических процессов на нефтегазовых объектах при значительном увеличении размеров территорий месторождений отразились в виде проблем, относящимся к маркшейдерско-геодезическим наблюдениям, выполняемым на геодинимических полигонах (ГДП) нефтегазовых месторождений (НГМ). Результаты геодезических наблюдений, выполняемых на созданных ГДП, должны обеспечить решение геомеханических, геодинимических и маркшейдерско-геодезических задач путем раздельного определения пространственно-временных параметров деформаций земной поверхности, горных массивов и коллекторов.

На современном этапе основным методом определения количественных характеристик геомеханических и геодинимических деформационных процессов на ГДП является повторное высокоточное нивелирование, которое обладает наряду с громоздкостью и значительной трудоемкостью, высокой приборной точностью. При этом точность повторного нивелирования зависит от протяженности линий нивелирования и устойчивости опорных и контрольных нивелирных пунктов к воздействиям экзогенных геомеханических процессов природного и техногенного происхождения. Присущие повторному нивелированию недостатки не позволяют эффективно решать поставленные маркшейдерско-геодезические задачи на ГДП НГМ, большинство из которых расположены в труднодоступных районах Западной Сибири и Крайнего Севера на труднопроходимых и неблагоприятных для повторного высокоточного нивелирования значительных по размерам территориях.

Существующий нормативно-детерминистский подход к постановке повторных геодезических наблюдений на техногенных ГДП предусматривает проложение линий повторного нивелирования, пересекающих многократно вдоль и вкрест значительные по размерам территории месторождений. Закрепление линий нивелирования осуществляется типовыми нивелирными пунктами без учета влияния на их устойчивость многочисленных экзогенных факторов. Такая

постановка повторного нивелирования на ГДП НГМ не позволяет оценить точность, репрезентативность и релевантность результатов повторного нивелирования, что исключает возможность обеспечения надежного решения поставленных задач.

Дальнейший прогресс в области геодезических наблюдений на ГДП НГМ за деформационными процессами связан с необходимостью совершенствования их методов, разработкой научно обоснованных теоретических основ постановки повторного высокоточного нивелирования и их практической реализацией. Разрабатываемые методы, в отличие от традиционных, должны основываться на развернутой комплексной программе с четко намеченными целями и вытекающими из них задачами по выработке конкурирующих мер и средств, обеспечивающих контроль требуемого уровня точности, значимости и репрезентативности результатов повторного нивелирования на всех стадиях его постановки.

Все изложенное выше, а также необходимость повышения эффективности получаемых результатов, обусловили актуальность данной работы, связанную с разработкой современных подходов к постановке повторного нивелирования на ГДП НГМ и решению проблемы влияния экзогенных факторов на его результаты.

Степень разработанности темы. Значительный вклад в развитие и совершенствование геодезических методов изучения деформационных процессов на ГДП внесли отечественные ученые, такие, как Буланже Ю.Д., Волков В.И., Герасименко М.Д., Каленецкий А.И., Кафтан В.И., Колмогоров В.Г., Кузьмин Ю.О., Мазуров Б.Т., Панжин А.А., Панкрушин В.К., Певнев А.К., Шестаков Н.В., Ямбаев Х.К. и др., а также зарубежные ученые: Bluntzer L., Hoggerl N., Holzer T., Viscocil P., Yerkes R. и др.

Результаты выполненных большинством ученых исследований показывают, что основным препятствием на пути повышения эффективности результатов повторных геодезических наблюдений является наличие в них компонентов различной природы, осложняющих их интерпретацию. При этом отсутствуют методы и средства повторных геодезических наблюдений, позволяющие

достигнуть требуемой точности и репрезентативности результатов, полученных на ГДП НГМ.

Цель исследований. Совершенствование геодезических методов решения геомеханических и геодинамических задач на подрабатываемых территориях нефтегазовых комплексов на базе постановки повторного нивелирования с учетом пространственно-временной структуры измеряемых величин деформаций и разработок новых подходов к организации геодезических работ, методов и средств геодезических наблюдений, обеспечивающих выполнение требований к точности, репрезентативности и значимости результатов.

Идея работы – при постановке повторного нивелирования на ГДП НГМ увязывать процесс обоснования проектных решений по длинам линий, периодичности, точности и продолжительности нивелирования с выработкой мер и обоснованием средств, обеспечивающих требуемую точность и репрезентативность результатов повторного нивелирования.

Основные задачи исследований:

1. Анализ существующего опыта изучения геомеханических и геодинамических процессов геодезическими методами на месторождениях углеводородов;
2. Совершенствование методов постановки повторного нивелирования на ГДП месторождений углеводородов;
3. Разработка алгоритма площадного интерполирования скоростей вертикальных смещений земной поверхности, установленных по результатам повторного нивелирования государственной высотной основы;
4. Разработка математических моделей воздействий геотемпературного поля на устойчивость нивелирных пунктов;
5. Исследование механизма влияния морозного пучения сезонно промерзающих и вечномёрзлых грунтов на устойчивость нивелирных пунктов;
6. Разработка и совершенствование методов исключения воздействия геотемпературного поля и морозного пучения на устойчивость нивелирных пунктов;

7. Разработка методов оценки значимости результатов повторного нивелирования, выполняемых на геодинимических полигонах.

Научная новизна:

1. Разработаны методы повышения точности, значимости и репрезентативности результатов выполняемого на ГДП НГМ повторного нивелирования, основанная на программно-целевом подходе организации повторных геодезических наблюдений;

2. Разработаны и реализованы методы постановки повторных геодезических наблюдений, выполняемых на ГДП НГМ, основанные на анализе соотношения параметров повторного нивелирования;

3. Предложены совершенствования методов геодезических исследований деформационных процессов, учитывающие математические, геомеханические и геодинимические аспекты определяемых на ГДП количественных деформационных показателей, способствующие повышению точности, репрезентативности и практической значимости результатов повторного нивелирования;

4. Разработаны методы оценки значимости результатов повторного нивелирования, позволяющие повысить точность и практическое значение полученных результатов повторных геодезических наблюдений;

5. На основе физико-математического моделирования влияний геотемпературного поля на устойчивость нивелирных пунктов, построенного на положениях математической физики, разработаны алгоритм оценки и учета влияния температурных деформаций для условий закрытого гидротермического режима. Разработан способ учета, основанный на измерениях интегральной температуры конструктивных элементов нивелирных пунктов;

6. На основе исследования механизма воздействия морозного пучения сезонно промерзающих и многолетнемерзлых грунтов, разработаны методы для расчета конструктивных элементов и глубин закладки устойчивых к морозному пучению нивелирных пунктов.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке теоретических основ повторного нивелирования и оценке влияния повсеместно распространенных природных экзогенных факторов на устойчивость нивелирных пунктов, применение которых позволяет создавать научно обоснованную базу для организации геодинамических полигонов на нефтегазовых месторождениях.

Практическая значимость работы заключается в том, что усовершенствованные методы повторного нивелирования и оценки устойчивости нивелирных пунктов дают возможность для разработки технических проектов повторных геодезических наблюдений, обосновывающие оперативное получение количественных характеристик техногенных и геодинамических процессов, протекающих на разрабатываемых ГДП НГМ.

Методология и методы исследования. При выполнении диссертационных исследований использовались: теория ошибок измерений, программно-целевой метод, методы математического моделирования с использованием элементов математической физики, структурно-генетический анализ и синтез методов реализации результатов измерений, а также экспериментальный метод.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанные методы создания локальных и точечных систем повторного высокоточного нивелирования на ГДП НГМ обеспечивают, при значительном сокращении объемов повторного нивелирования, отдельное определение значимых с позиций точности и репрезентативности величин скоростей вертикальных деформаций земной поверхности, коллекторов и залегающих над ними горных массивов.
2. Постановка и решение задач количественного прогнозирования и учета сезонных тепловых деформаций приповерхностных слоев земной коры и закладываемых в них нивелирных пунктов, повышают точность повторного нивелирования.
3. Размещение опорных нивелирных пунктов вне интегрального контура добычи углеводородов по вертикали, исключаящее влияние на их устойчивость процессов, связанных с изучаемым фактором – отработкой залежей углеводородов,

совместно с расчётом конструктивных элементов и глубин закладки контрольных нивелирных пунктов, устойчивых к морозному пучению, повышают точность и репрезентативность повторного нивелирования.

Достоверность и обоснованность научных положений и разработок обеспечена обоснованностью применения методов исследования и подтверждением результатов теоретических исследований экспериментальными данными, полученными на геодинамическом полигоне Ямбургского нефтегазового месторождения.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на кафедре «Инженерная геодезия» ФГБОУ ВО ПГУПС, научных конференциях различного уровня, в числе которых: международных конференциях «РИ-2016» (г. Санкт-Петербург, 2016 г.), «Наука настоящего и будущего» (г. Санкт-Петербург, 2016 г.), «Науки о Земле: вчера, сегодня, завтра» (г. Казань, 2018 г.), на «69-й и 70-й международных научно-технических конференциях молодых ученых» (г. Санкт-Петербург, 2016-2018 гг.) , на производственных совещаниях маркшейдеров ОАО «Газпром Нефть», на заседаниях научно-технических советов ООО «Научно-Производственное Объединение «Энергогазизыскания».

Публикации. Основное содержание диссертационной работы отражено в 7 научных статьях, из них 5 - в периодических научных изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, 1 - в журнале, входящем в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus.

Внедрение. Усовершенствованы методы построения систем повторного нивелирования на ГДП НГМ, внедрены в «ООО «НПО «Энергогазизыскания» г. Санкт-Петербург (акт внедрения № 018/77–3 от 05.09.2018)

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 111 страницах и включает введение, четыре главы, заключение и список использованной литературы из 119 наименований, в числе которых 18 на английском языке, двух приложений.

ГЛАВА 1 СУЩЕСТВУЮЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ЗАДАЧИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИЗУЧЕНИЯ СОВРЕМЕННОЙ ГЕОДИНАМИКИ И ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛИГОНАХ НЕФТЕГАЗОВЫХ КОМПЛЕКСОВ

1.1 Анализ опыта изучения геомеханических и геодинамических процессов геодезическими методами на месторождениях нефти и газа

В настоящее время в связи с повышением интенсивности долговременной добычи углеводородов, усложнением технологических процессов на нефтегазовых объектах и значительном увеличении территорий, которые частично распространяются на населенные пункты, превратившихся из вахтовых поселков в города (Новый Уренгой, Нижневартовск, Нефтеюганск, Губкинский и другие), перед специалистами нефтегазодобывающей отрасли и учеными встают проблемы геомеханического и геодинамического характера [49]. Техногенные воздействия на горные массивы, обусловленные отбором углеводородов из пластов – коллекторов, протекают на фоне их тектонической жизни, проявляющейся в природных деформационных процессах массива. Взаимодействие разрабатываемых пластов-коллекторов с вмещающим горным массивом проявляется в деформациях приповерхностных слоев земной коры (индикатором их являются смещения земной поверхности), в возбуждении сейсмодеформационных процессов, приуроченных к зонам разломов, и в изменениях эксплуатационных показателей разрабатываемых пластов-коллекторов [2, 52]. Геодинамические последствия разработки нефтегазовых месторождений, такие как аномальные деформации земной поверхности и проявления индуцированной сейсмичности на территориях приуроченных к добыче углеводородов сопровождаются значительным экономическим ущербом, неблагоприятными воздействиями на окружающую среду, недра и социально-экономическую сферу.

В соответствии с законом РФ «О недрах» при разработке нефтегазовых месторождений должна быть обеспечена безопасность выполнения работ на основе результатов маркшейдерско-геодезических и геофизических повторных измерений, объем, содержание и значимость которых позволяют прогнозировать

неблагоприятные ситуации, обусловленные развитием геодинамических и геомеханических процессов техногенного происхождения.

На современном этапе основными методами наблюдений за геомеханическими и геодинамическими деформационными процессами, осуществляемых на нефтегазовых месторождениях в целях обеспечения охраны недр согласно нормативным документам [43, 44, 74, 75], являются геодезические, которые за редким исключением совмещаются со спутниковыми геодезическими, гравиметрическими и сейсмологическими наблюдениями [107, 108, 109, 110, 111]. Сложившаяся ситуация объясняется тем, что значительная часть месторождений находится в платформенных, слабосейсмических регионах [10, 47, 48, 112], а наиболее опасными геодинамическими процессами и явлениями являются осадки территорий месторождений и деформационные процессы в зонах разломов земной коры, что и определяет доминирующую роль методов прямого изучения деформаций, к которым относятся геодезические методы (в первую очередь повторное нивелирование) [28]. Геодезические наблюдения на нефтегазовых месторождениях, согласно требованиям Инструкции [44], выполняются в создаваемых системах наблюдений. По результатам геодезических наблюдений, реализуемых в рамках геодинамических полигонов (ГДП) нефтегазовых месторождений должны быть решены основные маркшейдерско-геодезические задачи, связанные с установлением количественных характеристик сдвижений земной поверхности и параметров деформаций пластов-коллекторов, процессов современной геодинамики в зонах разломов, а также установления границ возможного проявления опасных и экзогенных процессов [44].

К уникальности геодезических наблюдений, выполняемых на ГДП НГМ, следует отнести тот факт, что они выполняются в рамках фундаментальной научной проблемы изучения современных движений земной коры, и их результаты используются как в практических целях, так и в научных [10]. Поэтому проводя геодезические измерения в системах наблюдений ГДП НГМ, следует учитывать, что использование полученных результатов в будущем может оказать существенное влияние на итоги фундаментальных исследований при решении

важных научно-практических задач и проблем, имеющих теоретическое и народнохозяйственное значение.

Начало изучению современных вертикальных движений земной поверхности (СВДЗП), связанных с отработкой нефтегазовых месторождений, положено на Апшеронском полуострове, где в период с 1912 по 1974 гг. при широкомасштабной разработке месторождений углеводородов были заложены линии повторного нивелирования общей протяженностью около 500 км. Эти линии пресекали тектонические нарушения и территории месторождений, по результатам повторного нивелирования контролировались вертикальные смещения грунтовых нивелирных пунктов (реперов). При этом по линиям нивелирования повторно выполнялось высокоточное и точное нивелирование без научно-технического обоснования его точности и периодичности [47].

Аналогичные геодезические работы по контролю за вертикальными смещениями нивелирных пунктов по инициативе маркшейдерских служб выполнялись на других более чем десяти разрабатываемых нефтегазовых месторождениях [49]. В состав работ, включалось повторное нивелирование, которое выполнялось в соответствии с нормативными материалами Главного управления геодезии и картографии при СМ СССР, предназначенных для нивелирования в государственной нивелирной сети СССР [47].

Разрушительные землетрясения XX века и проявляющиеся повсеместно негативные геомеханические и геодинамические последствия разработки месторождений нефти и газа, выражающиеся в аномальных деформациях земной поверхности и проявлениях сейсмичности, вызвали активизацию интереса со стороны научной общественности в сфере наук о Земле и специалистов нефтегазовой отрасли к вопросам изучения современных вертикальных и горизонтальных движений земной коры [47, 48, 87].

Начало широкомасштабного изучения геодезическими методами геодинамических деформационных процессов, проявляющихся на месторождениях нефти и газа в виде вертикальных деформаций земной поверхности, положено в 1970-х годах. В этот период в Главном управлении

геодезии и картографии при СМ СССР после разрушительного Ташкентского землетрясения были подготовлены «Основные положения по работам на геодинамических полигонах» [87]. Применительно к геодезическому обеспечению работ на прогностических и техногенных геодинамических полигонах ЦНИИГАиК в 1975-1978 гг. разработаны и утверждены в ГУГК руководящие технические материалы (РТМ) по приведению геодезических работ на геодинамических полигонах (ГДП), которые предопределили нормативно-детерминистический подход к постановке геодезических работ на ГДП [80, 83]. Согласно руководящим техническим материалам, действующим по настоящее время, целью устройства ГДП является «изучение смещений геодезических знаков и колебаний земной поверхности на территориях, эксплуатируемых месторождений, которые устанавливаются по результатам повторного нивелирования II класса «геодезических полигонов» [47, 83]. Руководящий технический материал [83] устанавливает противоречивые требования, которым должны удовлетворять месторождения для «возможностей» постановки на них повторных геодезических работ, а именно: месторождение должно иметь небольшой срок эксплуатации, должно быть обособленно от смежных эксплуатируемых месторождений, должно интенсивно эксплуатироваться, территория месторождения должна отвечать условиям удобства выполнения нивелирования II класса. При этом основным методом изучения техногенных деформаций, согласно требованиям руководящих технических материалов [83], является повторное нивелирование II класса, выполняемое по линиям, пересекающим вдоль и вкрест месторождения. На концах этих линий, протяженностью 25-50 км и более, закладываются исходные нивелирные пункты, удаленные от границы месторождения на расстоянии большем 6-8 кратной глубины залегания нижних эксплуатируемых пластов, но во всех случаях не менее 6 км. Закрепление линий нивелирования должно производиться грунтовыми нивелирными пунктами, типы которых предусмотрены действующими инструкциями [43, 76]. Стандартная периодичность повторного нивелирования составляет 3-4 года [35].

За период с 1978 по 2002 гг. в районах интенсивной разработки нефтегазовых месторождений создано более 16 техногенных ГДП [49, 76, 99]. Среди которых следует отметить геодинамический полигон, организованный в районе города Нефтеюганска для установления природы нефтеюганских землетрясений, произошедших в 1984-1988 гг. Результаты повторного нивелирования II класса на Нефтеюганском ГДП из 12 циклов, как и результаты повторного нивелирования на других 15 техногенных ГДП выявили сложнодифференцированные, проявляющиеся периодически с размахом значений от - 20 мм до + 20 мм вертикальных смещений нивелирных пунктов, не нашедших объяснения с позиций современной геодинамики и геомеханики. Результаты многократного нивелирования показали, что типовые нивелирные знаки [76] испытывали сезонные оседания 10-20 мм, которые сменялись поднятиями такого же размера, затем опять оседаниями и т.д. [49]. В отчетах о выполненных повторных геодезических наблюдениях не приводятся сведения о типах заложенных нивелирных знаков, способах, глубинах и инженерно-геологических условиях их закладки [49], что исключает возможность интерпретации их результатов [28]. На большинстве ГДП, созданных в этот период, выполнено не более 2-3 циклов повторных геодезических наблюдений, вычислены смещения геодезических пунктов, которые отождествлялись на завершающем этапе наблюдений с деформациями земной поверхности без какого-либо научно-технического подхода к выявлению причин их проявлений в пространстве и во времени.

Введение в действие инструкции по производству маркшейдерских работ [44] в 2003 г. в значительной степени активизировало проведение геодезических работ на ГДП и привело к увеличению их объема. Эти наблюдения предназначены для количественной оценки горизонтальной и вертикальной составляющих векторов техногенных смещений земной поверхности, а также выявления наличия и определения кинематических характеристик современной геодинамики, получившей развитие на нефтегазовых месторождениях в связи с их разработкой на фоне природной геодинамической обстановки.

Инструкцией [44] предусматривается разработка технического проекта выполнения комплекса маркшейдерских работ включающего обоснования и технические решения по созданию системы наблюдений (ГДП) за геомеханическими, геодинамическими и геокриологическими (в необходимых случаях) процессами.

Проектная документация на организацию ГДП согласно [44], создаваемая на основе горно-геологического обоснования (ГГО), должна обеспечивать количественную оценку смещений земной поверхности, обусловленные деформированием пластов-коллекторов и горных массивов над ними.

При этом в части постановки повторных геодезических наблюдений используются методические подходы, заложенные в «традиционных» нормативных материалах [35, 43, 83], которые исключают программно-целевой подход к организации повторных геодезических наблюдений на ГДП НГМ и носят строго нормативно-детерминистический характер в отношении назначения точности, периодичности и методики повторных геодезических наблюдений, структурного построения геодезических сетей ГДП и типового подхода к их закреплению [29, 62].

Обобщение и систематизация информации по накопленным результатам повторных геодезических наблюдений на ГДП НГМ, а также обзор опубликованных работ по итогам выполненных на ГДП геодезических наблюдений [1, 11, 29, 47, 49, 62, 99] показали, что даже при наличии результатов более 10 циклов повторного нивелирования, получить достоверные, репрезентативные и релевантные количественные характеристики техногенных вертикальных смещений земной поверхности, деформаций пластов-коллекторов и горных массивов, залегающих над ними, в настоящее время оказалось весьма проблематичной и практически не решаемой задачей.

Анализ современного состояния геодезических наблюдений за геомеханическими и геодинамическими процессами, выполняемых, в соответствии с нормативно-методическими документами [35, 43, 44, 76, 80, 83], на техногенных ГДП месторождений углеводородов показывает, что маркшейдерские задачи по

установлению количественных характеристик современной геодинамики, техногенных сдвижений земной поверхности и деформаций пластов-коллекторов и толщи горных массивов, залегающих над залежью, по результатам повторных геодезических наблюдений, за редким исключением, решаются лишь частично [11, 39, 49]. Такую эффективность повторных геодезических наблюдений можно объяснить с позиций их постановки. Разработка проектов геодинамических полигонов выполняется на большинстве геодинамических полигонов в соответствии с требованиями нормативных технических документов, но при этом построение и закрепление сетей повторных геодезических наблюдений производится, в большинстве случаев, без учета природно-климатических, инженерно-геологических, криогенных условий и научно обоснованного подхода к назначению структурных элементов повторного нивелирования, обработке и интерпретации его результатов.

1.2 Современное состояние решения геодинамических и геомеханических задач геодезическими методами на геодинамических полигонах месторождений углеводородов

В настоящее время наметилась тенденция к сближению точек зрения геоморфологов, геофизиков, геологов и геодезистов [4, 10, 12, 26, 38, 39, 46, 47, 90], изучающих современные движения земной коры и техногенные геомеханические процессы, о необходимости пересмотра организации повторного нивелирования. Новый подход к организации повторного нивелирования на ГДП должен позволить с достаточной точностью и репрезентативностью выполнять интерпретацию наблюдающегося многообразия установленных из сопоставления результатов повторного нивелирования смещений нивелирных пунктов как во времени, так и в пространстве. Следует отметить, что существующий подход к постановке повторных геодезических измерений не изменяется на протяжении последних ста лет по причине его изолирования от научно-практических достижений в областях прикладной геомеханики и геодезии, гидротермии, геофизики, механики грунтов многолетнего научно-исследовательского опыта совершенствования геодезических методов и

средств изучения современных вертикальных движений земной коры (СВДЗК) [47]. В связи с этим, в геодезии отсутствует научно-обоснованный подход к проектированию повторных геодезических наблюдений на ГДП, который радикально отличается от проектирования государственных и инженерных сетей с программно-целевых позиций [25]. Очевидным является то, что качество результатов повторного нивелирования зависит от увязки точностных характеристик нивелирования в циклах с периодичностью повторного нивелирования и размерами наблюдательной сети, а также от устойчивости нивелирных пунктов к экзогенным геомеханическим процессам, не имеющим отношения к изучаемым деформационным процессам на ГДП.

Практически на всех действующих прогностических и техногенных (локальных) ГДП по результатам повторного нивелирования выявлена неравномерность скоростей современных вертикальных движений земной поверхности (СВДЗП) и техногенных сдвижений земной поверхности в пространстве и во времени. При этом в большинстве случаев на ГДП проявляется колебательный, короткопериодический характер СВДЗП и техногенных деформаций земной поверхности [4, 10, 12, 26, 27, 29, 47, 53, 90]. Такие явления невозможно объяснить с позиций тектоники и прикладной геомеханики в связи с тем, что современные колебательные движения земной коры происходят медленно и проявляются на земной поверхности на протяжении большого временного периода (столетий), чаще со скоростями несколько миллиметров в год [88]. Поэтому, соглашаясь с позицией геофизиков, геологов и геоморфологов [3, 4, 10, 12, 90], следует осторожно относиться к данным о короткопериодическом характере СВДЗК, установленным по геодезическим данным в асейсмичных регионах. Колебательные короткопериодические сезонные вертикальные смещения нивелирных пунктов с периодом в 1 год установлены повсеместно на геодинамических полигонах, где выполняются многократно повторные нивелирования (4 и более раз) в год. Большинство исследователей объясняет [10, 12, 15, 34, 42, 47, 72, 93] такую сложнодифференцированную структуру сезонных колебательных вертикальных смещений нивелирных пунктов,

установленную на ГДП Донбасса, Кривого Рога, Крыма, Гарма, Лишова (Чехия), с позиций экзогенной геомеханики тем, что фиксируемые повторным нивелированием вертикальные смещения нивелирных пунктов вызваны многочисленными факторами различного происхождения (тектонического, экзогенного природного и техногенного, погрешностями нивелирования и его постановки), которые в различных климатических и инженерно-геологических условиях закладки реперов проявляются в результатах повторного нивелирования по-разному [12, 22, 30].

При изучении геодезическими методами современных вертикальных движений земной коры, вертикальных движений земной поверхности и деформационных процессов на ГДП следует учитывать, что первичным материалом при решении задач, связанных с исследованием современной геодинамики и техногенных геодинамических процессов для получения данных о количественных параметрах (смещениях и их скоростях) и характере проявления современных тектонических и техногенных процессов в пространстве и во времени, являются вертикальные смещения нивелирных пунктов, полученные на основе сопоставления результатов повторного нивелирования. Исходя из этого, можно заключить, что из-за неоднозначности интерпретаций вертикальных смещений нивелирных пунктов, вызываемых многочисленными геомеханическими процессами природного и техногенного происхождения, повторное нивелирование, как основной метод изучения современной геодинамики и техногенных вертикальных смещений земной поверхности, на современном этапе имеет существенные недостатки, с которыми на геодинамических полигонах нельзя не считаться.

Общеизвестно [10, 12, 26, 27, 29, 55, 90, 93], что геодезические пункты [43, 94, 95], закладываемые в приповерхностном слое земной коры на незначительную, по отношению к области возможного проявления экзогенных геомеханических процессов [98], глубину, получают смещения, не имеющие отношения к изучаемым геодинамическим и техногенным деформационным процессам. Данное обстоятельство поставило задачи [47], связанные с изучением экзогенной

геодинамики для целей интерпретации результатов повторных геодезических и геофизических наблюдений, в ряд первостепенных.

В геодезии изучение экзогенной геодинамики и ее влияния на устойчивость геодезических пунктов проводилось в основном при решении инженерно-динамических задач [6, 26, 42, 86, 101] и технологических задач по закреплению государственной нивелирной сети [5, 94, 95] в незначительных объемах. При этом используются способы анализа накопления разности превышений, инструментально-натурной, инженерно-геоморфологической и аналитической оценки, а также анализа математических моделей смещений нивелирных знаков.

В основу инструментально-натурной оценки устойчивости нивелирных знаков [10, 43, 95] положено изучение сезонной стабильности нивелирных пунктов всех конструкций, нашедших применение на геодинамических полигонах, относительно векового (глубинного) нивелирного пункта. Данный способ позволяет дать лишь точечные количественные характеристики сезонных вертикальных смещений нивелирных пунктов, влияющих на результаты повторного нивелирования. Применение этого способа, как средство натурального моделирования экзогенных геомеханических процессов, с позиции неоднородности и многообразности самих экзогенных процессов и их проявлений по территории полигона [98], обусловленных изменчивостью инженерно-геологических и природно-техногенных условий в местах закладки нивелирных пунктов [83], неприемлемо на геодинамических полигонах с позиций научной корректности и практической пользы.

В основу аналитического способа исследования устойчивости нивелирных пунктов [47, 77] положен математический аппарат дисперсионного и корреляционного анализов, позволяющий по уравненным значениям скоростей СВДЗК, установить значение составляющих этих скоростей, вызванных факторами экзогенного характера и исключить нивелирные пункты со значительными вертикальными смещениями, не изучив их природу и механизм проявления в пространстве и во времени, что является спорным по отношению к локальным аномальным проявлениям.

Инженерно-геоморфологический способ оценки устойчивости нивелирных знаков [4] предусматривает полевое обследование мест закладки с позиций геолого-морфологического положения, ландшафтных, грунтовых и гидрогеологических условий и других видов визуального анализа. На основании обследований производится оценка репрезентативности результатов повторного нивелирования, а также геолого-геоморфологическая фильтрация и выбраковка их для целей комплексного изучения современной геодинамики. Субъективность и обзорный характер, с позиций геодезии, ограничивает его применение на геодинамических полигонах.

Анализ графиков накопления разностей превышений [83, 35, 61], позволяет изучать изгибы и переломы накоплений и делать выводы о наличии подвижек нивелирных пунктов экзогенного характера. Такой анализ можно рекомендовать в качестве дополнения к вышеперечисленным не нашедшим применения на ГДП методикам.

В геофизике для решения задач оценки экзогенных смещений приповерхностных слоев земной коры [54] используется два метода. Один из них основан на статистическом сопоставлении показателей деформирования земной поверхности с метеопараметрами, выявления корреляционных связей, и, в случае достаточной тесноты связи, последовательное исключение экзогенных воздействий на результаты геофизических наблюдений. Второй метод основан на модельном решении задачи в рамках деформирования твердого тела, определении масштабного коэффициента влияния экзогенного фактора на выявленные деформации приповерхностных слоев земной коры с последующей оценкой влияния данного фактора на результаты определения наклонов земной коры.

Деформации приповерхностных слоев земной коры [8] – многофакторное явление, поэтому воздействие различных экзогенных факторов в различные периоды времени в разных точках приповерхностных слоев земной коры, неоднородной по строению и физическому состоянию, искажает значения коэффициента корреляции, рассчитанного в предположении влияния только одного из факторов. Тот факт, что коэффициент корреляции, претерпевающий

изменения во времени и пространстве, является лишь статистической мерой линейной связи между величинами и не несет сведений об однозначной обусловленности изменений одного из исследуемых параметров под воздействием другого, делает невозможным применения статистического метода для учета влияний экзогенных факторов на результаты геодинамических исследований.

Второй подход [98] строится на фундаментальных положениях и общих уравнениях механики сплошных сред. Однако для решения конкретных задач учета деформаций оснований геодезических знаков и геофизических приборов общие уравнения механики деформируемого твердого тела будут необходимыми, но недостаточными. Это связано с тем, что деформации пород (оснований), знание которых позволяет вести учет влияния экзогенных факторов на деформации земной коры, не могут быть определены без экспериментальных данных о соотношении между экзогенными факторами (внешними силами) и вызываемыми ими смещениями конкретных нивелирных пунктов (деформациями). К уравнениям механически сплошных сред (условия равновесия и математического соотношения) следует добавить физические уравнения (уравнения состояния), экспериментально устанавливающие зависимость между напряжениями и скоростями деформаций для конкретных пород, соответствующие состоянию конкретных пород.

Применяемые в геофизике методы оценки влияния экзогенных факторов на современные движения земной коры базируются на хорошо обоснованных закономерностях механики деформируемого твердого тела, но для несплошных тел, какими являются трещиновато-блочные скальные, рыхлые и им подобные горные породы, требуется иной подход, учитывающий их раздробленность и неоднородность [70], который в настоящее время не разработан и не может найти широкого применения на ГДП НГМ.

На основании вышеизложенного можно заключить, что только при программно-целевом, комплексном подходе [4, 10, 28, 29] к постановке геодезических работ по изучению современных движений земной коры и техногенных деформаций земной поверхности на ГДП НГМ появляется

возможность выделить разные генетические составляющие вертикальных смещений нивелирных пунктов, зафиксированных в результатах повторного нивелирования с целью их последующего изучения или исключения как помех при интерпретации полученных пространственно-временных параметров деформационных процессов.

Выводы по главе 1

Разработанный в 70-х годах подход к постановке повторного нивелирования на ГДП [47], применяемый в геодезическом производстве в настоящее время, предусматривает соблюдение нормативных требований государственного нивелирования и единства технических решений при построении сетей повторного нивелирования и технологии его производства. Итоги последних десятилетних повторных геодезических наблюдений показали, что величины деформаций, порождаемых геомеханическими и геодинамическими процессами, получающих развитие на ГДП НГМ, лежат значительно ниже уровня точности, выполняемого согласно нормативным материалам, повторного нивелирования и в значительной мере искажаются контрастными экзогенными геомеханическими процессами, не имеющими отношения к изучаемым деформационным процессам, связанным с разработкой НГМ. Проблема диагностики проявлений геомеханических и геодинамических деформационных процессов на разрабатываемых НГМ по результатам повторного нивелирования с позиций их релевантности, репрезентативности и точности считается нерешенной, о чем свидетельствуют заключения и выводы, обширно представленные в литературных источниках [4, 10, 11, 12, 15, 22, 34, 47].

В связи с этим, одной из главных задач текущего этапа изучения современной геодинамики и техногенных деформаций земной поверхности, пластов-коллекторов и лежащих над залежью горных массивов, является решение проблемы влияния экзогенных факторов на устойчивость нивелирных пунктов [47] наряду с разработкой, на уровне теории повторных геодезических измерений, теоретических основ постановки повторного нивелирования на ГДП НГМ. При этом подлежат решению следующие задачи:

- разработка теоретических основ постановки повторного нивелирования на ГДП НГМ;
- изучение влияния экзогенных процессов на результаты повторного нивелирования;
- разработка методов исключения влияния экзогенных процессов природного происхождения на результаты повторного нивелирования;
- разработка геодезических методов оперативного изучения геомеханических процессов, сопровождающих разработку нефтегазовых месторождений.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ПОСТАНОВКИ ПОВТОРНОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ НА ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛИГОНАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ

2.1 Научно-техническое обоснование подхода к постановке повторного нивелирования на ГДП месторождений углеводородов

Специфика повторного нивелирования на геодинамических полигонах нефтегазовых месторождений заключается в необходимости отдельного определения пространственно-временных параметров векторов сдвижений земной поверхности, деформаций пластов-коллекторов и горных массивов, залегающих над залежью и кинематических характеристик современной геодинамики. При этом необходимо решать задачу исключения из установленных параметров составляющих [28], не относящихся к исследуемым векторам сдвижений земной коры, деформационным характеристикам и кинематическим параметрам современной геодинамики. На ГДП НГМ должна быть реализована возможность расчленить суммарный эффект (смещения геодезических пунктов), зафиксированный в результатах повторных геодезических наблюдений, на разные генетические составляющие с оценкой их релевантности и репрезентативности, а также установить взаимосвязь современных геодинамических процессов с техногенными геомеханическими процессами имеющую важное научно-практическое значение.

Так как в настоящее время повторные геодезические наблюдения выполняются в строгом соответствии с нормативно-техническими материалами [35, 43, 44, 76, 80, 83], не всегда отражающими существующую специфику [25] требований к их постановке с позиций инженерно-динамических наблюдений, возможности практического использования их результатов для решения маркшейдерско-геодезических задач [44], за редким исключением, незначительные. Такая ситуация сложилась из-за отсутствия возможности оценки точности, репрезентативности и релевантности полученных результатов повторных геодезических наблюдений, подменяемых на практике оценками технических характеристик применяемых приборов, оборудования и алгоритмов

обработки первичных материалов геодезических измерений, что характерно как для наземных, так и для космических геодезических методов [38, 39].

В связи с этим предлагается новый научно-технический подход к изучению геодинамических и техногенных геомеханических процессов на ГДП разрабатываемых нефтегазовых месторождений, в основу которого положен программно-целевой подход [115, 116, 119] к постановке повторного нивелирования в создаваемых системах наблюдений (ГДП), сущностью которого является комплексный анализ, постановка целей, выработка мер и обоснование средств, обеспечивающих повышение и контроль точности, надежности и репрезентативности результатов повторного нивелирования на всех стадиях постановки повторных геодезических наблюдений. При этом возникают задачи выбора не одного, а комплекса наиболее эффективных мероприятий из нескольких возможных. Предлагается решать задачи в два этапа, в соответствии с принципом «разумной достаточности» [29], а именно:

1. Оценивать эффективность обеспечения конкурирующими мероприятиями требуемого уровня надежности и формировать комплекс мероприятий, удовлетворяющих ограничениям их реализации для ГДП конкретного месторождения;

2. Из сформированного комплекса мероприятий выбирать такие, затраты и технические сложности по реализации которых являются минимальными.

Точность и эффективность результатов решения маркшейдерско-геодезических задач на ГДП НГМ можно оценить с помощью критериев надежности, то есть способности метода повторных геодезических наблюдений обеспечить верное решение поставленных задач [7]. При разработке критериев для оценки надежности метода повторного нивелирования [7], главное внимание должно уделяться изучению факторов, искажающих его результаты, и техническим возможностям повторного нивелирования в конкретно сложившихся природно-техногенных условиях нефтегазового месторождения.

К основным факторам, влияющим на надежность решения маркшейдерско-геодезических задач на ГДП НГМ по результатам повторного нивелирования, можно отнести:

1. Корректность постановки цели и задач повторных геодезических наблюдений, определяемых горно-геологическим обоснованием, с позиций геодезии [28, 29, 30];
2. Проектирование и организация повторных геодезических наблюдений на основе программно-целевого подхода, предусматривающего структурно-геологическое обоснование размещения нивелирных пунктов систем наблюдений ГДП, выбор способов закрепления нивелирных пунктов, разработку проекта повторных геодезических наблюдений. Актуальность, достоверность, информативность и достаточность геолого-геофизической информации необходимой для составления карты современной геодинамической обстановки, на основе которой разрабатывается схема сети повторного нивелирования ГДП;
3. Точность и достоверность прогноза уплотнения коллекторов и оседаний земной поверхности;
4. Особенности природных условий ГДП;
5. Точность методов повторных геодезических наблюдений и надежности средств закрепления геодезических пунктов ГДП в отношении их устойчивости к воздействиям повсеместно распространенных экзогенных геомеханических процессов природного и техногенного происхождения;
6. Подход к интерпретации результатов повторных геодезических наблюдений.

Перечисленные факторы, влияющие на качество результатов геодезических наблюдений, являются составными частями диссертационных исследований.

2.2 Предложения по выбору исходных и контрольных нивелирных пунктов ГДП нефтегазовых месторождений

Как упоминалось ранее, основной целью создания и функционирования ГДП на территориях разрабатываемых нефтегазовых месторождений является выявление, натурное измерение и исследование пространственно-временных

характеристик современных аномальных деформационных процессов природного и техногенного происхождения, развитие которых обусловлено сложившимися природно-техногенными условиями.

На современном этапе на ГДП натурные измерения пространственно-временных параметров деформационных процессов представлены повторными геодезическими наблюдениями, в которые традиционно включается, как основной метод, повторное высокоточное нивелирование [18, 43, 44, 74].

Согласно нормативным требованиям [43, 44, 52, 83] по результатам повторного нивелирования в границах месторождения устанавливаются (контролируются) вертикальные составляющие векторов движения, величины, характеризующие скорости деформации скелета коллектора и вмещающих его пород, толщи горного массива, залегающего над залежью, земной поверхности, а также проявления современной геодинамики в зонах глубинных разломов.

Для контроля современных геодинамических и техногенных геомеханических процессов традиционно [43, 44] предусматривается создание систем наблюдений в виде линий повторного нивелирования, с привязкой их к нивелирным пунктам государственной нивелирной сети [76], принимаемых за исходные. Нивелирные пункты государственной нивелирной сети безосновательно «считаются неподвижными» [43], не учитывая то, что устойчивость этих пунктов только лишь к природным экзогенным факторам соблюдается за редким исключением в пределах ± 2 мм [5, 29, 68, 71, 94, 95].

Значительная протяженность линий повторного нивелирования, обусловленная размерами территорий нефтегазовых месторождений и рекомендуемая Инструкциями [35, 43] приводит к недопустимому снижению точности определения параметров деформационных процессов на ГДП. Так при общей протяженности линий повторного нивелирования 900 км на Уренгойском ГДП, длины поперечных профильных линий (ПЛ) составляют $L'_{nl} \geq 55$ км и продольной профильной линии $L''_{nl} > 100$ км. Следовательно, на Уренгойском ГДП точность определения смещений нивелирных пунктов, при применении

повторного нивелирования II класса [49] в условиях тундры Западной Сибири, соответственно составляет:

$$m'_{\Delta H} = M_{II \text{ кл}} \sqrt{2L'} \approx 2 \text{ мм} \sqrt{2 \cdot 55} = 21 \text{ мм} - \text{поперечные ПЛ};$$

$$m''_{\Delta H} \approx 2 \text{ мм} \sqrt{2 \cdot 100} = 28 \text{ мм} - \text{продольная ПЛ},$$

где $M_{II \text{ кл}}$ – средняя квадратическая ошибка нивелирования II класса на 1 км хода, L – длина линии нивелирования в км [29, 43].

Точности повторного нивелирования $m'_{\Delta H} \approx 21$ мм и $m''_{\Delta H} \approx 28$ мм при краткосрочном режиме повторного нивелирования (периодичность $T = 1-2$ года), выполняемого согласно рекомендациям Инструкции [43], неприемлема, так как прогнозные годовые смещения земной поверхности 5-10 мм/год [49] значительно меньше ошибок их определения.

Поэтому важнейшей проблемой создания систем геодезических наблюдений за техногенными геомеханическими и современными геодинамическими процессами на подавляющем большинстве ГДП НГМ, являются значительные размеры территорий нефтегазоносности, расположенных в труднодоступных для нивелирования I и II классов районах. Создание традиционных сетей повторного нивелирования [43] с выбором местоположения исходных нивелирных знаков профильных линий за границей месторождения получившее широкое применение на ГДП НГМ [49], – дорогостоящее, громоздкое, трудноосуществимое и малоэффективное с позиций точности, достоверности и оперативности получения сведений о кинематических параметрах деформационных процессов мероприятие.

В целях оперативного получения достаточной по точности и репрезентативности информации о характере развития техногенных геомеханических и геодинамических процессов, сопровождающих разработку нефтегазового месторождения, в диссертации разработана и адаптирована к условиям ГДП Западной Сибири технология повторных геодезических наблюдений, основанная на максимально возможном использовании существующих законсервированных разведочных и наблюдательных скважин в качестве исходных и контрольных (деформационных) нивелирных знаков,

реализация которой позволяет сократить в десятки раз объемы длительных, трудноосуществляемых и дорогостоящих повторных нивелирований I и II классов и выполнять интерпретацию их результатов по каждому из изучаемых факторов. Данная технология в части использования скважин в качестве нивелирных знаков частично одобрена Инструкцией [43].

В соответствии с усовершенствованной автором технологией повторного высокоточного нивелирования [28, 29], устойчивые к воздействиям экзогенных геомеханических процессов исходные нивелирные пункты располагаются вне интегрального контура разрабатываемых залежей углеводородов по вертикали или горизонтали. Такое размещение исходных нивелирных пунктов исключает влияние на их устойчивость техногенных деформационных процессов, связанных с изучаемым фактором – отработкой залежей углеводородов. При этом следует учитывать наличие контура разработок на одном и том же участке недропользования нескольких залежей углеводородов, расположенных на разных глубинах и смещенных одна относительно другой. В качестве исходных глубинных нивелирных пунктов (реперов-скважин) используются законсервированные разведочные и наблюдательные скважины в бетонное тело контура которых заложены стенные нивелирные знаки, а их основание расположено ниже деформируемых коллекторов и горных массивов, залегающих над ними, или вне интегрального контура добычи углеводородов по латерали.

Для измерения деформаций коллекторов используются законсервированные разведочные и наблюдательные репера-скважины, расположенные внутри интегрального контура разрабатываемой залежи углеводородов, а их основания размещены непосредственно над ней.

Общей целью повторных геодезических наблюдений, выполняемых на ГДП НГМ геодезические наблюдения за деформациями коллекторов и земной поверхности проводятся в местах разработки лишь тех залежей, для которых расчетные (прогнозные) значения, полученные на стадии разработки горно-геологического обоснования создания ГДП НГМ, могут достигнуть критического значения. Другие обособленные не подлежат геодезическому контролю.

Для контроля за деформациями земной поверхности и коллекторов на ГДП НГМ оборудуются наблюдательные системы, состоящие из исходных глубинных реперов-скважин, контрольных глубинных реперов-скважин и грунтовых фундаментальных нивелирных пунктов, закладываемых на удалении L . Глубина закладки грунтовых фундаментальных нивелирных пунктов в приповерхностные слои земной коры должна превышать границы возможных проявлений природных экзогенных факторов (10-15 м в условиях Западной Сибири) [28] и обеспечивать их устойчивость в многолетнемерзлых грунтах.

Максимальная плотность наблюдательных систем достигается на участках, где есть данные о потенциальной неустойчивости недр (аномальный подъем газоводяного контакта, максимальные падения пластового давления и другие) [29]. Кроме того, густота систем наблюдений и места их размещения определяются из геолого-структурных соображений и должны быть достаточными для мониторинга деформационных процессов, получивших развитие на разрабатываемом месторождении.

Измеряя вертикальные смещения контрольных нивелирных пунктов относительно опорного нивелирного пункта (репера-скважины) получаем информацию о развитии деформационных процессов, достоверность и репрезентативность которой определяется устойчивостью исходного нивелирного пункта.

Экспериментальные исследования устойчивости разведочных и наблюдательных скважин, переоборудованных под репер-скважину (исходный нивелирный пункт) выполнены на двух техногенных геодинамических полигонах, расположенных в двух климатических зонах: Западной Сибири (Ямбургский ГДП) и юг Украины (Криворожский ГДП).

В наблюдательных системах Ямбургского ГДП, расположенных внутри тектонических блоков и вне зон влияния техногенных геомеханических процессов на протяжении трех лет выполнено три цикла повторного нивелирования исходных нивелирных пунктов (реперов-скважин) и расположенных на расстоянии не более 100 м от них трубчатых грунтовых нивелирных пунктов (см. Приложение А), якоря

которых заложены на глубинах 15 м и более. Обсадная реперная труба грунтового нивелирного пункта и глубина его закладки, научно обоснованная автором в работе [28], полностью исключили влияние на его устойчивость природных экзогенных геомеханических процессов. Нивелирование выполнялось цифровым нивелиром DiNi03, укомплектованного кодовыми инварными рейками, по программе I класса с одной станции при длине расстояний от нивелира до рейки 40-50 м. Предельная погрешность нивелирования на станции составляла 0,05 – 0,07 мм. По результатам измерения температуры термокосой в реперных трубах нивелирных знаков вычислялись поправки в отметки нивелирных пунктов за температурные деформации реперных труб. Результаты нивелирования I класса, выполненные на контрольных площадках, представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Изменения превышений между исходными реперами-скважинами и грунтовыми нивелирными пунктами на площадках ГДП Ямбургского НГКМ

Номер контрольного участка	Номер нивелирного пункта	Превышения, м			Изменения превышений, мм	
		I цикл	II цикл	III цикл	II-I циклы	III-I циклы
ККР-1	РО 4440	-1,1477	-1,148	-1,1479	-0,3	-0,2
	РФ 4440					
ККР-4	РО 128	-0,7159	-0,7164	-0,7161	-0,5	-0,2
	РФ 128					
ККР-5	РО 146	0,5776	0,5777	0,5776	0,1	0
	РФ 146					
ККР-7	РО П-1	-1,4641	-1,4645	-1,4644	-0,4	-0,3
	РФ П-1					
ККР-10	РО 101	0,1494	0,1497	0,1493	0,3	-0,1
	РФ 101					
ККР-11	РО 21606	-1,2124	-1,2123	-1,2126	0,1	-0,2
	РФ 21606					
ККР-14	РО 169	0,5713	0,5712	0,5715	-0,1	0,2
	РФ 169					
ККР-16	РО 121	0,7905	0,7905	0,7902	0	-0,3
	РФ 121					
ККР-20	РО 27	1,7718	1,7718	1,7722	0	0,4
	РФ 27					

Результаты экспериментальных наблюдений (таблица 2.1) показывают, что превышения между репером-скважиной и грунтовым репером на протяжении трёхгодичного периода изменялись в пределах точности повторного

нивелирования и учета температурных деформаций трубчатых нивелирных пунктов, а именно:

$$\delta h \leq m_{\text{ст}} \sqrt{2n} + 2m_{\delta H_t} = 0,1 \text{ мм} \cdot 1,4 + 2 \cdot 0,08 \text{ мм} = 0,3 \text{ мм},$$

где $m_{\text{ст}} = 0,1 \text{ мм}$ – средняя квадратическая погрешность определения превышения h на станции [61]; $n = 1$ – количество станций; $m_{\delta H_t} = 0,08 \text{ мм}$ – средняя квадратическая погрешность определения поправки δH_t в высоту нивелирного пункта за температуру $\Delta t^\circ\text{C}$ [30].

На Криворожском ГДП экспедицией «Кривбассгеология» выполнены исследования устойчивости грунтовых нивелирных пунктов, по конструкции соответствующих грунтовому реперу Тип 150 [76], относительно глубинного нивелирного пункта, оборудованного на базе гидронаблюдательной скважины 13663. Обсадная труба скважины, используемая согласно рекомендациям Инструкции [43] в качестве реперной трубы, перекрывает всю толщу рыхлых отложений и закреплена в кристаллической породе башмаком (якорем) на глубине 1200,5 м. На расстоянии 1,2 м от опорного нивелирного пункта 13663 заложен грунтовый нивелирный пункт Рп-1 на глубину 2,3 м. На протяжении двух лет выполнено с интервалом 1 месяц 10 циклов повторного нивелирования I класса репера-скважины и грунтового нивелирного пункта Рп-1. Превышения определялись по результатам нивелирования I класса, выполненного на одной станции при постоянной длине визирного луча 15 м. Нивелирование в циклах выполнялось высокоточным нивелиром Ni007 при двух горизонтах инструмента с применением инварных штриховых трехметровых реек с поправочным коэффициентом к средней длине реек за компарирование 0,01 мм.

Точность определения превышений в рассматриваемый период наблюдений, характеризуемая средней квадратической ошибкой нивелирования, вычисленной по разности превышений, составляет $m_h = 0,05 \text{ мм}$. При этом средняя квадратическая ошибка определения изменений превышений характеризуется величиной $m_{\Delta h} \leq 0,08 \text{ мм}$, что подтверждает высокое качество определения

изменений превышений между исходным репером-скважиной 13663 и грунтовым нивелирным пунктом Рп-1 [13].

Изменение измеренных в 10 циклах превышений характеризуется величинами, изменяющимися в диапазоне от -0,3 до 0,3 мм [13], что подтверждают стабильность во времени рассматриваемых нивелирных пунктов и, в частности, нивелирного пункта, представленного репером-скважиной 13663.

Устойчивость законсервированных скважин к воздействиям техногенных геомеханических процессов, получающих развитие в коллекторе и горном массиве над залежью в неравномерном поле сжимающих напряжений, подтверждается исследованиями [40, 78], выполненными на объектах нефтегазовых месторождений Западной Сибири. Результаты исследований показали, что в условиях техногенных оседаний горных массивов, деформаций скелета коллекторов и заполняющих пород, конструктивные элементы законсервированных скважин могут подвергаться воздействиям, порождающим увеличение длин колоны на участках от земной поверхности до основания коллектора и возникновение в горных массивах дополнительных напряжений, оказывающих влияние на обсадные трубы скважин. Выполненное моделирование и расчет дополнительных нагрузок на конструктивные элементы скважин Ямбургского НГКМ показали, что уровень напряжений, возникающих в горных массивах не оказывает влияния на устойчивость скважин, так как он уменьшает запас прочности разведочной скважины не более чем на 4%.

2.3 Пространственно-временные аспекты постановки повторных геодезических наблюдений на ГДП НГМ

Общеизвестно, что достоверность определения скоростей современных вертикальных движений земной коры (поверхности) определяется точностью результатов нивелирования в циклах, регламентируемой неравенством [29, 58]:

$$v = \frac{\Delta H}{T} \geq m_v \varepsilon = 4m_v, \quad (2.1)$$

где ΔH - изменение высот (H), повторно наблюдаемых нивелирных пунктов через интервал времени T ; $m_v \varepsilon$ - произведение, характеризующее доверительный

интервал в виде $(-t_\beta m_v; t_\beta m_v)$, ширина которого при значениях доверительной вероятности $\beta = 0,955$ и нормированного коэффициента $t_\beta = 2$, принимаемых при проведении геодезических работ, равна $2t_\beta m_v = 4m_v$ [29].

Предельная средняя квадратическая ошибка (СКО) определения СВДЗК по результатам повторного нивелирования m_v находится в зависимости от средней квадратической ошибки нивелирования на 1 км хода M (мм/км) (величины приведены в инструкции [43]), длины L (км) нивелирного хода и промежутка времени между повторными циклами нивелирования T (год) [29], а именно:

$$m_{v\text{ пред}} = \frac{1}{T} M \sqrt{2L}. \quad (2.2)$$

При этом предельное значение ошибки m_v определения вертикальных смещений земной поверхности следует назначать с позиций ответственности проведения геодезических работ, значений прогнозных вертикальных смещений земной поверхности $v_{\text{прогн}}$ и назначенной периодичностью повторного нивелирования в соответствии с выражениями τ :

$$v_{\text{прогн}} = \frac{\Delta H_{\text{прогн}}}{\tau} \geq m_v \varepsilon, \quad m_v \leq \frac{v_{\text{прогн}}}{\varepsilon} = \frac{v_{\text{прогн}}}{4}$$

или:

$$m_v \leq \frac{\Delta H_{\text{прогн}}}{\tau \varepsilon} = \frac{\Delta H_{\text{прогн}}}{4\tau}, \quad (2.3)$$

где $\Delta H_{\text{прогн}}$ - прогнозное значение оседания земной поверхности за время τ отбора углеводородов из коллектора [49].

Сравнение выражений (2.1) и (2.2) позволяет получить аналитическое выражение для предрасчета требуемой точности нивелирования в циклах с позиций устанавливаемой достоверности ($\beta=0,955$) результатов повторных наблюдений:

$$M \leq_{\text{пред}} m_v \frac{T}{\sqrt{2L}} = T \frac{v_{\text{прогн}}}{\sqrt{32L}}. \quad (2.4)$$

Результаты такого предрасчета приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Значения предельно допустимых средних квадратических ошибок нивелирования M (мм), выполняемого повторно через $T = 1$ год

$V_{\text{прогн}}$ (мм/год)	Длина линии нивелирования L , км									
	0,5	1	1,5	3	6	10	15	20	30	40
2,5	0,6	0,4	0,4	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
5	1,3	0,9	0,7	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1
7,5	1,9	1,3	1,1	0,8	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2
10	2,5	1,8	1,4	1,0	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,3
12	3,1	2,2	1,8	1,3	0,9	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3
15	3,8	2,7	2,2	1,5	1,1	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4
17,5	4,4	3,1	2,5	1,8	1,3	1,0	0,8	0,7	0,6	0,5
20	5,0	3,5	2,9	2,0	1,4	1,1	0,9	0,8	0,6	0,6

Приведенные в Таблице 2.2 значения предельно допустимых СКО нивелирования в циклах показывает, что они значительно меньше предусмотренных Инструкцией [43] предельно допустимых ошибок нивелирования I и II классов ($M_I \leq 0,8$ мм/км и $M_{II} \leq 2$ мм/км), которые не являются критерием качества повторного нивелирования.

При этом данные, приведенные в Таблице 2.2, показывают, что сроки, объемы и класс точности повторных нивелирований за первые 3-5 года, в отличие от требований Инструкции [43], должны устанавливаться исходя из пространственных характеристик сетей повторного нивелирования ГДП (длин линий нивелирования) и с учетом прогнозных значений скоростей техногенных вертикальных смещений земной поверхности и СВДЗК.

В пределах территорий нефтегазовых месторождений прогнозные величины скоростей техногенных вертикальных смещений земной поверхности вычисляются с учетом параметров и сроков разработки месторождения, согласно разработанным в механике горных пород методик [49], а прогнозные значения скоростей СВДЗК устанавливаются в соответствии с данными карт СВДЗК [47, 60] путем аналитического интерполирования по методике [20], содержание которой основывается на следующем.

Прогнозные значения скоростей СВДЗК, установленные по результатам государственного повторного нивелирования I и II классов государственной высотной основы, представлены на картах СВДЗК в виде линий нивелирования, соединяющих нивелирные пункты, для которых установлены скорости СВДЗК. Однако, разрешенная сеть нивелирных пунктов и сложно дифференцированный характер значительно усложняют решение поставленной задачи. Задачу по определению скоростей СВДЗК для территории конкретного ГДП можно решить следующим образом.

Учитывая, что территория Российской Федерации покрыта линиями государственного нивелирования I и II классов, образующими соответственно полигоны с периметром 1200–2000 км и 400–1000 км [43], по которым через 15–25 лет выполняется повторное нивелирование [20], можно устанавливать скорости СВДЗК для нивелирных пунктов государственной нивелирной сети и составлять карты СВДЗК на территории Российской Федерации [60].

Для установления региональной составляющей скоростей $v_{\text{прогн}}$ СВДЗК на район заложения геодинимического полигона необходимо выполнить интерполирование имеющихся для государственной нивелирной сети значений скоростей с оценкой точности площадного интерполирования [20].

При интерполировании скоростей СВДЗК по площади S задается структура СВДЗК и точность их получения по результатам повторного нивелирования, а интерполяционные веса назначаются с учетом данных о статистической структуре скоростей и значений средних квадратических ошибок их определения по результатам повторного нивелирования, которые должны быть минимальными по отношению к их значениям в случае назначения других весов P [20].

Допуская, что значения скоростей СВДЗК в рассматриваемых точках $i = \overline{1, n}$ с фиксированными координатами (x_i, y_i) имеют нулевые значения, можно утверждать, что установленные по результатам повторного нивелирования скорости v_i' характеризуют лишь отклонения от истинных значений скоростей

СВДЗК [20]. Следовательно, среднее значение скоростей СВДЗК v_{cp} для изучаемой территории можно установить исходя из следующего уравнения [20]:

$$v_{cp} = \frac{1}{S(s)} \iint v'(x, y) dx dy, \quad (2.5)$$

которое можно представить в линейном виде [37]:

$$v_{cp} = \sum_{i=1}^n p_i v_i. \quad (2.6)$$

В уравнении (2.6) веса p_i назначаются с учетом ошибок нивелирования m_i и минимального значения средней квадратической ошибки замены значений скоростей v_{cp} , установленных по формуле (2.5), на значения, вычисленные по формуле (2.6), а именно [20]:

$$M^2 = \sum_{i=1}^n \left(p_i (v_i' + m_i) - v_{cp} \right)^2. \quad (2.7)$$

Черта сверху в формуле (2.7) указывает на вероятностное усреднение на некоторой ограниченной выборке.

Исходя из свойств случайных ошибок и факта применения структурной функции, можно сделать следующий вывод: средние квадратические ошибки определения скоростей СВДЗК m_v в точках (x_i, y_i) не коррелированы как с истинными значениями скоростей СВДЗК, так и между собой [20]:

$$m_v(x_i, y_i) m_v(x_j, y_j) \neq 0,$$

или при $d_{i,j} = 0$:

$$m_v(x_i, y_i) m_v(x_j, y_j) = m_v^2(x_i, y_i), \quad (2.8)$$

где $d_{i,j}$ - расстояние между точками i и j .

Поскольку на картах СВДЗК [60] представлены уравненные значения скоростей, то можно получить случайную ошибку определения скоростей по результатам повторного нивелирования [20].

Для ряда результатов определений структурная функция скоростей СВДЗК v может быть представлена в следующем виде [20]:

$$F_v(x_i, y_i; x_{i+1}, y_{i+1}) = \overline{\sum_{i=1}^n \left(\left(v'_i - \frac{[v']}{n} \right)^2 - \left(v'_{i+1} - \frac{[v']}{n} \right)^2 \right)}. \quad (2.9)$$

Структурная функция F_v зависит от суммы квадратов ошибок в точках. Это справедливо во всех точках, за исключением точек, расположенных на расстоянии $d=0$ при котором $F_v=0$ [20]:

$$F_{v'}(x_i, y_i; x_{i+1}, y_{i+1}) = F_v(x_i, y_i; x_{i+1}, y_{i+1}) + m_v^2(x_i, y_i) + m_v^2(x_{i+1}, y_{i+1}),$$

$$F_{v'}(x_i, y_i; x_{i+1}, y_{i+1}) = 0, \text{ при } d = 0. \quad (2.10)$$

Принимая во внимание свойство (2.9), экстраполируя $F_{v'}$ на $d_{i,i+1} \approx 0$, получаем $2m_v^2$. Исходя из определения ковариационной функции и свойства (2.8), можно записать [20]:

$$M = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_i p_j t_v(x_i, y_i; x_j, y_j) + \sum_{i=1}^n p_i m_v^2(x_i, y_i) -$$

$$- 2 \sum_{i=1}^n p_i t_v(x_i, y_i; x_0, y_0) + D_v(x_0, y_0). \quad (2.11)$$

Принимая следующие обозначения:

$t_v(x_i, y_i; x_j, y_j) = t_{i,j}$ - ковариационная функция для точек i и j ;
 $m_v^2(x_i, y_i) = m_{v,i}^2$ - среднеквадратическая ошибка; $D_v(x_0, y_0) = E$ - дисперсия
 среднего значения скоростей СВЗДК по площади S , вычисляемая по формуле [20]:

$$E = \left[\frac{1}{P(s)} \iint v'(x, y) dx dy \right]^2, \quad (2.12)$$

перепишем уравнение (3.11) в следующем виде:

$$M = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_i p_j t_{i,j} + \sum_{i=1}^n p_i m_v^2 - 2 \sum_{i=1}^n p_i k_i + E. \quad (2.13)$$

В формуле (2.13) коэффициенты k_i представляются в виде взаимной ковариационной функции, характеризующие статистическую связь значений скоростей в отдельных точках с усредненным значением скоростей по площади, при этом веса p_i определяются при соблюдении условия минимальных значений

M , что достигается назначением производных от M по весам p_i равными нулю [20]. В результате допущенных преобразований получим систему из n линейных уравнений.

Согласно изложенному выше можно принять, что дисперсия вычисляется по формуле:

$$E = \frac{1}{S} \iint_{(S)} \iint_{(S)} t(x, y; x', y') dx dy dx' dy'. \quad (2.14)$$

Значения взаимной ковариационной функции определяются согласно выражению:

$$k_i = \frac{1}{S} \iint_{(S)} t(x, y; x_i, y_i) dx dy. \quad (2.15)$$

Разделяя район размещения наблюдательных систем ГДП на прямоугольники и используя свойства однородности и изотропности ковариационной функции, в формулах (2.5) и (2.15), могут быть вычислены соответствующие значения искомых параметров. В случае определения величин $v_{\text{ср}}$, E и k_i могут быть вычислены искомые значения скоростей СВДЗК для полигонов $v_{\text{прогн}}$ целесообразно пользоваться формулами, представляющими величины $v_{\text{ср}}$, E и k_i в виде линейных алгебраических уравнений (2.6), (2.12) и (2.13).

Используя значения величин k и t , можно показать наличие связи между значениями $v_{\text{ср}}$ с точечными значениями скоростей СВДЗК [20].

В последующее время, сроки, объемы и класс точности повторного нивелирования, следует назначать в соответствии с выражением (2.4), согласно установленным скоростям техногенных вертикальных смещений земной поверхности и скоростям вертикальных движений отдельных блоков земной коры (СВДЗК).

Поскольку на техногенных геодинамических полигонах нефтегазовых месторождений подлежат изучению (контролю) непрерывно протекающие геодинамические и техногенные геомеханические процессы, отражающиеся в вертикальных смещениях земной поверхности и приповерхностных слоях горных

массивов, а, следовательно, и в смещениях нивелирных костылей и пунктов, то очевидным является факт необходимости установления лимита на продолжительность циклов повторных нивелирований [61] в нивелирной сети ГДП. Лимит времени Δ_τ на протяженность циклов повторного нивелирования получим исходя из выражений (2.2) и (2.4), а именно:

$$\Delta_\tau v_{\text{прогн}} < M\sqrt{2L} \text{ или же } \Delta_\tau < \frac{M\sqrt{2L}}{v_{\text{прогн}}} \quad (2.16)$$

Соблюдение неравенства позволяет исключить накопление систематических погрешностей, образующихся из-за перемещения костылей и нивелирных пунктов, заложенных на линии повторного нивелирования под воздействием СВДЗК и техногенных сдвижений земной поверхности.

При соблюдении условия (2.16) на геодинимических полигонах, где длина линии нивелирования менее 100 км, точность результатов нивелирования определяется его случайной СКО m_L , вычисляемой по формуле $m_L = M\sqrt{L}$, что вытекает из общеизвестной [61] формулы Лаллемана.

При этом точность повторного нивелирования на ГДП регламентируется допустимым значением, устанавливаемым выражением (2.4). Из выражения (2.4) следует, что при определенных значениях $v_{\text{прогн}}$, не подлежащих корректированию, и установленной периодичности T , предельные длины линий повторного нивелирования на ГДП строго регламентируется неравенством [29]:

$$L_{\text{доп}} \leq \frac{v_{\text{прогн}}^2 T^2}{32M^2}, \quad (2.17)$$

где $L_{\text{доп}}$ - длина линий в км.

Выражение (2.17) синтезирует пространственные, точностные и временные параметры повторного нивелирования с изучаемыми кинематическими характеристиками деформационных процессов. Из неравенства (2.17) следует, что по результатам повторного нивелирования I класса, выполняемого через $T = 1$ год с точностью, регламентируемой инструкцией [43] $M = 0,8$ мм/км, при длине линий

повторного нивелирования $L_{\text{доп}} \leq \frac{25 \cdot 1}{32 \cdot 0,64} = 1,22$ км можно установить значимые

по величине вертикальные смещения нивелирных пунктов, характеризующиеся скоростями более 5 мм/год и более [29], а в случае применения нивелирования II класса [43] $M = 2$ мм/км, указанные значимые смещения (скорость 5 мм/год и более)

при $T = 1$ год можно надежно ($\beta = 0,955$) установить при $L_{\text{доп}} \leq \frac{25 \cdot 1}{32 \cdot 4} = 0,2$ км [29],

что расходится с рекомендациями Инструкции [43]. Инструкция вне зависимости от величины определяемых скоростей вертикальных смещений земной поверхности и вертикальных движений отдельных блоков земной коры рекомендует повторно нивелировать линии длиной более 10 км по программе нивелирования II класса с периодичностью от 1 до 1,5 лет.

Важную роль при организации повторного нивелирования на ГДП НГМ также необходимо отводить назначению периодичности T нивелирования в циклах геодезических наблюдений, так как ее величина прямо зависит от длины линий повторного нивелирования и величины скоростей протекания изучаемых деформационных процессов. Из выражения (2.1) следует, что периодичность повторного нивелирования должна назначаться в соответствии с неравенством:

$$T > \frac{M \sqrt{2L}}{\text{пред } m_v} = \frac{M \sqrt{2L}}{0,25v} = \frac{4M \sqrt{2L}}{v_{\text{прогн}}} = \frac{m_{\text{ст}} \sqrt{\frac{L}{D}}}{v_{\text{прогн}}}, \quad (2.18)$$

где $m_{\text{ст}}$ - СКО определения превышения на станции; D – длина визирного луча.

Из неравенства (2.18) следует, что периодичность повторного нивелирования, являющаяся важным фактором надежности установления таких численных характеристик деформационных процессов, как вертикальные деформации (смещения) и их скорость, должна устанавливаться на стадии проектирования повторного нивелирования, а не регламентироваться нормативными материалами топографо-геодезического производства.

На ГДП НГМ предопределяющими характеристиками являются длины линий повторного нивелирования, устанавливаемые в соответствии с

техногенными условиями и геодинамической обстановкой, и скорости протекания изучаемых деформационных процессов, прогнозируемые на стадии организации ГДП, в зависимости от которых назначаются точность повторного нивелирования и его периодичность, что следует учитывать при разработке технических проектов ГДП.

При этом нормативные материалы [43, 44], регламентирующие работы по повторному нивелированию на техногенных ГДП, вне зависимости от прогнозных величин скоростей вертикальных сдвижений земной поверхности, тектонических движений отдельных блоков земной коры и протяженности линий нивелирования, назначают периодичность повторного нивелирования три раза за первые 3-5 лет проведения геодезических работ на ГДП. Такой подход к постановке повторного нивелирования является научно необоснованным и противоречит принципу разумной достаточности, положенного в основу программно-целевого подхода к постановке повторных геодезических наблюдений, что подтверждается расчетами по формулам (2.18), при прогнозном значении скорости $v_{\text{прогн}} \leq 5 \text{ мм}$ и проектной длине линий нивелирования $L \geq 2,5 \text{ км}$, назначая повторное нивелирование I и II класса, периодичность наблюдений должна составлять соответственно:

- $T \geq \frac{0,8\sqrt{2 \cdot 2,5}}{0,25 \cdot 5} = 2,4 \text{ года (I класс нивелирования);}$
- $T \geq \frac{2\sqrt{2 \cdot 2,5}}{0,25 \cdot 5} = 6 \text{ лет (II класс нивелирования).}$

2.4 Методика оценки значимости результатов повторного нивелирования

Значимость результатов повторного нивелирования определяется с учетом специфики решаемых геомеханических и геодинамических задач [18]. Так на ГДП разрабатываемых нефтегазовых месторождений геодезическому контролю подлежат [43, 49, 53] пространственно-временные характеристики вертикальных движений отдельных блоков земной коры, являющихся результатом проявления эндогенных процессов, кинематические характеристики суперинтенсивной деформационной активности разломных зон, индуцированной природными и (или)

техногенными воздействиями, а также скорости вертикальных техногенных деформаций коллектора и покрывающих его горных массивов, проявляющихся совместно в вертикальных смещениях земной поверхности. При этом значимость результатов повторного нивелирования, наряду с другими факторами, определяется их релевантностью и репрезентативностью, обеспечиваемых раздельным изучением эндогенных и всех техногенных геомеханических процессов.

С позиций точности и надежности, значимость определяемых скоростей $V_{\text{зн}}$ деформационных процессов обеспечивается научно обоснованным подходом к назначению длин линий повторного нивелирования, его точности и периодичности выполнения, что подтверждается аналитическим выражением (2.17). Из аналитического выражения (2.17) следует, что значимые величины скоростей $V_{\text{зн}}$ протекания деформационных процессов, определяемые по результатам повторного нивелирования [18] устанавливаются в соответствии с неравенством:

$$v_{\text{зн}} \geq M \sqrt{32L} \cdot \frac{1}{T}, \quad (2.19)$$

которое указывает на необходимость синтеза процесс получения величин значимых скоростей $V_{\text{зн}}$ (достоверность $\beta = 0,955$) с назначением, на стадии проектирования повторного нивелирования, его периодичности, точности и длин линий нивелирования.

Рассмотрим значимость скоростей вертикальных движений земной поверхности на техногенных ГДП при рекомендуемых Инструкцией [43] параметрах повторного нивелирования. Так Инструкцией устанавливаются периметры полигонов повторного нивелирования 40 и 20 км соответственно при I и II классах нивелирования, выполняемого с точностью $M_I \leq 0,8$ мм/км и $M_{II} \leq 2$ мм/км через промежуток времени $T = 1$ год на протяжении первых 3-5 лет. Согласно выражению (2.19), при таких постановках повторного нивелирования I и II классов, могут быть установлены значимые величины скоростей вертикальных деформаций земной поверхности, приведенные в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Проектные величины значимых скоростей вертикальных сдвижений земной поверхности (мм/год)

Класс нивелирования	Периодичность повторного нивелирования T , год				
	1 год	2 года	3 года	6 лет	10 лет
I ($M = 0,8$ мм/км; $L = 40$ км)	29	14,6	9,8	4,9	3
II ($M = 2$ мм/км; $L = 20$ км)	51	26	17,3	8,6	5,1

Результаты многолетних теоретических и экспериментальных исследований оседаний земной поверхности при разработке месторождений углеводородов [49] показывают, что, в целом, скорости оседания поверхности составляют на месторождениях Западной Сибири 5-10 мм/год, если не принимать во внимание такое явление как просадки земной поверхности на участках пониженной прочности [59], которые, как правило, на современном этапе выявляются на стадии проектирования нефтегазовых месторождений подробными геомеханическими расчетами деформирования коллектора.

Приведенные в таблице 2.3 результаты расчетов свидетельствуют о том, что если следовать рекомендациям Инструкции [43] по постановке повторного нивелирования на техногенных ГДП НГМ Западной Сибири, то значимые величины скоростей деформаций земной поверхности будут получены лишь в 25% случаев при повторном нивелировании I класса, периодичность которого составляет $T > 3$ года и при повторном нивелировании II класса, выполняемого с периодичностью $T > 5$ лет.

Приведенные результаты исследований показывают, что при вычислении по результатам повторного нивелирования скоростей СВДЗП и СВДЗК следует оценивать их значимость. При этом следует использовать значения случайных средних квадратических ошибок нивелирования, полученных по результатам оценки точности результатов нивелирования, выполненного в циклах [43]:

$$\eta^2 = \frac{1}{4n} \left[\frac{d^2}{r} \right], \quad (2.20)$$

где $d = h_{\text{пр}} - h_{\text{обр}}$; $h_{\text{пр}}$ и $h_{\text{обр}}$ - превышения по секциям, полученные соответственно в прямом и обратном ходах; r - длины секций; n – число секций.

Формула (2.19) при использовании величины η принимает следующий вид:

$$v_{\text{зн}} \geq \frac{1}{T} \sqrt{32L(\eta_i^2 + \eta_j^2)}, \quad (2.21)$$

где η_i и η_j - случайные средние квадратические ошибки, полученные в i -ом и j -ом циклах повторного нивелирования; i и j – номера циклов нивелирования.

Выводы по главе 2

В ходе разработки и исследования теоретических основ постановки повторных геодезических наблюдений на ГДП НГМ, были получены следующие научно-технические результаты:

- Научно-технически обоснована организация повторного нивелирования на геодинамических полигонах разрабатываемых месторождений углеводородов, предусматривающая комплексный анализ, определение целей, выработку мер и обоснование средств, обеспечивающих повышение и контроль точности, надежности и репрезентативности результатов повторного нивелирования, на основе которых решаются геомеханические и геодинамические задачи;
- разработаны и научно обоснованы подходы к выбору исходных и контрольных нивелирных пунктов с учетом прогнозных вертикальных скоростей движения земной поверхности и особенностей постановки повторного нивелирования на ГДП НГМ, получено аналитическое выражение для расчета необходимой устойчивости нивелирных пунктов к экзогенным процессам, не имеющим отношения к изучаемым процессам, обеспечивающей нормативную точность результатов наблюдений;
- исследованы пространственно-временные аспекты повторного нивелирования, с учетом которых разработаны аналитические выражения для расчета требуемой точности нивелирования в циклах, его периодичности и длин линий нивелирования в создаваемых системах наблюдений с учетом кинематических характеристик изучаемых деформационных процессов, а также получена формула для аналитического интерполирования скоростей СВДЗК в местах закладки исходных нивелирных пунктов;

– разработана методика оценки значимости результатов повторного нивелирования, используемых для определения количественных характеристик деформационных процессов, протекающих на ГДП НГМ, получена формула для расчета значимых скоростей вертикальных сдвижений земной поверхности, учитывающая длины линий, периодичность и точностные характеристики повторного нивелирования.

ГЛАВА 3 РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ВЛИЯНИЯ ПРИРОДНЫХ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ПОВТОРНОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ

3.1 Постановка проблемы влияния природных геомеханических процессов на результаты повторного нивелирования

Исследованиям по важнейшей фундаментальной проблеме современных движений земной коры и техногенных сдвижений земной поверхности, на нынешнем этапе характерна тенденция повышения требований к репрезентативности и информативности результатов повторных геодезических наблюдений [10]. Основным предназначением выполняемого на ГДП НГМ повторного нивелирования является получение кинематических количественных характеристик современной геодинамики и техногенных геомеханических процессов, получивших развитие на разрабатываемых месторождениях углеводородов, с целью их использования в качестве контролирующих показателей технологических процессов добычи углеводородов и их влияния на окружающую среду. Накопленная информация о вертикальных смещениях земной поверхности, представленная продолжительными циклами повторного нивелирования нивелирных пунктов ГДП в подавляющем большинстве не позволяет решать поставленных маркшейдерско-геодезических задач [10, 47, 11] из-за противоречивости сведений о скоростях СВДЗП, не согласующихся с результатами геофизических, геологических, геоморфологических и других наблюдений. Повышение точности и частоты повторного нивелирования на ГДП повсеместно привело к получению короткопериодичных и сложнодифференцированных по амплитуде вертикальных смещений нивелирных пунктов, не имеющих объяснений с позиций техногенной геомеханики и тектоники [10, 26, 28, 47]. Повсеместно распространенные в приповерхностных слоях земной коры природные экзогенные процессы воздействуют на результаты повторного нивелирования косвенно, через смещения нивелирных пунктов [28]. Экзогенные геомеханические процессы, обусловленные изменениями геотемпературного поля приповерхностных слоев земной коры нарушают устойчивость нивелирных пунктов, из-за тепловых

деформаций их конструктивных элемент и оснований, а также их морозного выпучивание [5, 47, 53].

Известно [10, 47], что неустойчивость нивелирных пунктов является одной из основных причин искажения результатов повторного нивелирования [28], а проблема влияния экзогенных факторов на результаты определения движений земной коры (поверхности) остается, на настоящее время, окончательно нерешенной, что повсеместно [47] снижает качество результатов повторного нивелирования. Объясняется это зависимостью качества результатов повторного нивелирования от точности определения вертикальных смещений ΔH контрольных (деформационных) нивелирных пунктов ГДП. Эта зависимость определяется как ошибками нивелирования $m_{\text{нив}}$, так и ошибками, обусловленными нарушениями устойчивости исходных ($m_{\text{исх}}$) и контрольных ($m_{\text{контр}}$) нивелирных пунктов, вызываемыми воздействиями на них экзогенных факторов за период времени T между их повторным нивелированием [28]. При этом должно соблюдаться условие:

$$m_{\text{исх}}^2 + m_{\text{контр}}^2 \leq m_{\text{нив}}^2 \quad (3.1)$$

Установим в соответствии с аналитическими выражениями (2.1) и (3.1) требования, предъявляемые к устойчивости исходных и контрольных нивелирных пунктов к воздействиям экзогенных факторов, искажающих результаты повторного нивелирования через смещения пунктов, не имеющие отношения к изучаемым техногенным и геодинамическим деформационным процессам.

Применяя принцип равного влияния источников ошибок повторного нивелирования, порождаемых дестабилизацией (неустойчивостью) исходных и контрольных нивелирных пунктов, принимаем [29]: $m_{\text{исх}} = m_{\text{контр}} = m_{\text{дест}}$. Тогда

$$2m_{\text{дест}}^2 \leq m_{\text{нив}}^2 \text{ и } m_{\text{дест}} \leq \frac{m_{\text{нив}}}{\sqrt{2}}.$$

При этом, с учетом формулы (2.2) значения дестабилизаций исходных и контрольных нивелирных пунктов ГДП при доверительной $\beta = 0,955$ ($\varepsilon=4$) назначается в соответствии с неравенством:

$$m_{\text{дест}} \leq M \sqrt{L_{\text{доп}}}. \quad (3.2)$$

Подставив в формулу (3.2) значения предельно допустимых длин линий повторного нивелирования (2.17), получим:

$$m_{\text{дест}} \leq M \sqrt{\frac{v_{\text{прогн}}^2 T^2}{32M^2}} = \frac{v_{\text{прогн}} T}{\sqrt{32}} \quad (3.3)$$

На ГДП НГМ Западной Сибири для которых, в среднем, $v_{\text{пр}} = 5$ мм/год в соответствии с неравенством (3.3) можно сделать заключение, что техногенные сдвигения земной поверхности могут быть установлены с доверительной вероятностью $\beta=0,955$ по результатам повторного нивелирования при $T = 1$ год, если соблюдаются условия устойчивости исходных и контрольных нивелирных пунктов в пределах $m_{\text{дест}} \leq 0,9$ мм .

Исследования устойчивости нивелирных пунктов [5, 10, 12, 22, 26, 47, 72, 77, 90, 93], выполненные на протяжении последних шестидесяти лет, показывают, что рекомендуемые нормативными документами [43, 76] конструкции и глубины закладки нивелирных знаков не во всех случаях обеспечивают их устойчивость к многочисленным природным геомеханическим процессам. Проявление и интенсивность этих процессов в горных массивах сложно дифференцировано в зависимости от их расположения на территории геодинамического полигона, инженерно-геологических условий, гидротермических условий и времени их фиксации [28, 29, 30].

Развитие этих процессов в приповерхностных слоях земной коры на глубинах закладки нивелирных пунктов осложнено многообразием и изменчивостью в пространстве и во времени температурных, влажностных и силовых полей в неоднородных по физико-механическим свойствам грунтах.

Как природные, так и техногенные экзогенные факторы оказывают воздействия на устойчивость нивелирных пунктов, которые можно подразделить на следующие виды [27]:

– Физические, вызывающие изменение физического состояния конструктивных элементов нивелирных пунктов или их основания;

- Механические, оказывающие силовые воздействия на конструктивные элементы нивелирных пунктов или их основание;
- Геомеханические, приводящие к изменению состава или структуры основания нивелирных пунктов.

В зависимости от масштаба проявления в пространстве экзогенные процессы, оказывающие воздействия на нивелирные пункты и нарушающие их устойчивость, можно по аналогии с геодинамическими процессами [73] подразделить на региональные (100-1000 км²), локальные (менее 100 км²) и точечные. При этом экзогенные процессы проявляются в приповерхностных слоях земной коры, являющейся средой размещения нивелирных пунктов, как нерегулярно, так и периодически на протяжении суток (суточные), сезонов (сезонные) и многих лет (многолетние), что приводит к накладыванию их эффектов проявления друг на друга, усложняя задачи распознавания вертикальных смещений нивелирных пунктов и интерпретации результатов повторного нивелирования. Экзогенные геомеханические процессы оказывают обратимые, частично обратимые и необратимые воздействия на устойчивость нивелирных пунктов [27].

Систематизация и обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований воздействий экзогенных геомеханических процессов на устойчивость нивелирных пунктов, представлены в таблице 3.1. Оценка результатов исследований влияния неустойчивости нивелирных пунктов на результаты решения геодинамических задач геодезическими методами приведена в фундаментальных работах [10, 47, 27], в которых сформулирована актуальная нерешенная проблема влияния экзогенных факторов на результаты определения движений земной коры. Основу такой проблемы [10, 47, 27, 71] составляет разработка методов прогноза и исключения влияний экзогенных процессов природного и техногенного происхождения на устойчивость нивелирных пунктов.

Таблица 3.1 – Оценка воздействий экзогенных факторов и процессов на устойчивость нивелирных пунктов (НП)

№	Экзогенный		Вид воздействия	Характер и размер воздействия на нивелирный пункт, литературный источник
	фактор	процесс		
1	Геотемпературное поле	Изменение температуры НП и горных пород	- Региональное, локальное и точечное; - Суточное и сезонное; - Физическое; - Обратимое.	- Установлены короткопериодичное, суточное и сезонное изменения высот НП с амплитудой [6, 15, 47, 72, 118]: - грунтовых 0,4 - 8,8 мм; - скальных 0,4 - 7 мм; - глубинных 1,0 и 1,6 мм. - Отсутствует алгоритм учета смещений.
2	Атмосферное давление	Деформации основания НП	- Точечное - Нерегулярное; - Механическое; - Обратимое.	- Установлено нерегулярное колебательное изменение высот НП 0,1мм на 1мм рт. ст. [27, 47, 100]. - Разработан алгоритм прогноза и учета смещений НП
3	Сезонное промерзание глинистых пород	Выпучивание НП силами пучения	- Точечное; - Сезонное; - Механическое; - Частично обратимое.	- Установлены сезонные колебательные смещения с преобладанием их остаточного выпучивания со скоростью до 25 см/год [5, 47, 93]. - Отсутствуют методы их полного исключения из результатов повторного нивелирования.
4	Термокарстовые явления в районах вечной мерзлоты	Просадка НП из-за деформации его основания	- Точечное в районах распространения подземных льдов; - Необратимое	- Просадка НП в результате протаивания подземного льда - основания НП от нескольких дц/год до м/год [47]. - Исключается за счёт выбора места закладки НП
5	Термовлагоперенос в набухающих грунтах	Объемные деформации набухающего глиняного основания НП	- Точечное; - Сезонное и нерегулярное; - Механическое; - Обратимое.	- Короткопериодичные сезонные изменения высот НП с амплитудой до 15 мм/год. Просадки НП в лёссовидных [15, 47, 86, 91]. - Исключается за счёт выбора места и глубины закладки НП.
6	Изменение уровня грунтовых вод и влажности грунтов растительностью	Дегидротационное оседание основания НП	- Точечное и локальное; - Сезонное; - Механическое; - Обратимое.	- Сезонное изменение высот НП с амплитудой до 12 мм/год [16, 19, 47]. - Исключается за счёт выбора места и глубины закладки НП.

Продолжение таблицы 3.1

7	Изменение уровня подземных вод под воздействием метеорологических факторов	Осадка или подъем горных пород основания НП	•Локальное; •Нерегулярное; •Механическое; •Обратимое.	•Изменение высот НП с амплитудами 0,25-2,5 мм на 1 м изменения уровня подземных вод [42, 47, 93, 98].
8	Механическая суффозия	Опускание горных пород основания НП	•Точечное; •Нерегулярное; •Механическое; •Необратимое.	•Изменение высот НП со скоростью 0,10 мм/год [27].
9	Изменение уровня подземных вод в связи с гидрологическим режимом реки водоемов	Осадка или подъем горных пород основания НП	•Локальное и точечное; •Нерегулярное; •Механическое; •Обратимое.	•Изменение высот НП теоретически и экспериментально не исследованно
10	Нагрузка на земную поверхность от веса зданий и сооружений	Деформации горных пород основания НП	•Точечные; •Длительное; •Механическое; •Необратимое.	•Изменение высот НП от 0,2мм/год до 1,5мм/год в зависимости от размещения НП в зоне мульды проседания [31, 84]
11	Изменение объема воды водохранилищ	Деформации горных пород основания НП	•Локальное и точечное; •Длительное и кратковременное •Квазиобратимое и необратимое; •Механическое.	•В зоне оседания гидросооружений установлены вертикальные смещения НП порядка 10-20 мм/год [41, 47].
12	Техногенное изменение геотемпературного поля	Термопросадка горных пород основания НП	•Точечное; •Длительное; •Механическое; •Необратимое.	•Просадка НП в южной геокриозоне на величину от 0,5 до 1% мощности протаивания многолетнемерзлых пород [68]
13	Техногенное понижение уровня подземных вод	Гидростатическое и деструкционное оседание горных пород основания НП	•Локальное; •Длительное; •Механическое; •Необратимое.	•Осадка НП на величины от миллиметров до метров [27, 101].

Продолжение таблицы 3.1

14	Промышленная и транспортная вибрация	Оседание НП из-за нарушения устойчивости горных пород основания НП	• Точечное; • Длительное; • Механическое; • Необратимое.	• Осадка грунтовых НП в зависимости от уровня транспортной вибрации и удаленности от его источника составляет 0,1 - 0,3 мм/год. • Влияние промышленной вибрации на устойчивость НП экспериментально не исследовалось [21, 56, 77].
15	Извлечение углеводородов из недр	Сдвигание горных пород в толще составляющих НП	• Локальное и точечное; • Длительное; • Механическое; • Необратимое.	• Осадка НП со скоростью 5-10 мм/год и более в зависимости от размера и скорости понижения пластового давления [24, 49].

Результаты теоретических и экспериментальных исследований по оценке воздействий экзогенных геомеханических процессов на устойчивость нивелирных пунктов подтверждают актуальность необходимости учета влияния экзогенных факторов на результаты повторного нивелирования путем исключения из них экзогенной составляющей, не имеющей отношения к контролируемым (изучаемым) природным геодинамическим и техногенным геомеханическим процессам.

3.2 Исследование и физико-математическое моделирование воздействий геотемпературного поля на устойчивость нивелирных пунктов

Известно [6, 22, 26, 28, 47], что точность и репрезентативность результатов повторного нивелирования в значительной степени (3.3) определяется ошибками, обусловленными нарушением устойчивости исходных и деформационных (контрольных) нивелирных пунктов к экзогенным геомеханическим процессам, не имеющим отношения к изучаемым деформационным процессам, на протяжении времени, отведенного для постановки повторных геодезических наблюдений.

Одним из таких повсеместно распространенных экзогенных факторов, влияющих на результаты повторного нивелирования, является изменение температуры на земной поверхности в суточном и годовом ходах и связанные с ними температурные деформации нивелирных знаков и горных пород, составляющих их основания. Такие деформации приводят к суточным и сезонным

изменениям высот марок нивелирных знаков. Поэтому при постановке повторных геодезических наблюдений за деформациями зданий и сооружений на промплощадках устанавливают глубинные нивелирные пункты, конструкции которых обладают минимальной чувствительностью к изменениям температуры или позволяют учитывать их тепловые деформации. Это достигается следующими способами [8, 58]:

- Применением конструктивных материалов с низким коэффициентом теплового линейного расширения;
- Определением тепловых деформаций нивелирного пункта при помощи принципа биметалла;
- Определением тепловых деформаций нивелирного пункта по результатам непосредственного инженерного измерения температуры в скважине нивелирного пункта.

Первый и второй способы редко применяются на промплощадках и не нашли применения на ГДП по причинам громоздкости, сложности обустройства нивелирных пунктов и неэкономичности [22].

Третий способ трудно осуществить по причине отсутствия доступа в скважины и котлованы нивелирных знаков, закладываемых согласно общеобязательным нормативным требованиям [43, 76], предъявляемым к типовым конструкциям вековых трубчатых, фундаментальных, грунтовых и вековых скальных реперов. В сложившейся ситуации рассмотрим влияние суточных и годовых колебаний температуры земной поверхности на устойчивость нивелирных знаков, которые, как известно [2, 10, 47, 54], в значительной мере искажают наклономерные и деформографические измерения, выполняемые в глубоких штольнях с целью изучения современных вертикальных движений земной коры.

Колебание суточных температур на земной поверхности распространяются в горные массивы на глубину около 1–1,5 м, тогда как в годовом ходе глубина проникновения сезонных колебаний достигает величин 12–25 м [96, 118]. Деформации могут быть обусловлены такими факторами как инженерно-геологические условия, теплофизические свойства пород и степень заполнения их

пор различными газообразными веществами и водой, рельеф, цвет нагреваемой поверхности и наклон ее к лучам Солнца и многих других.

Приведенные факторы вызывают в свою очередь и дифференциацию в деформациях горных пород и связанных с ними смещениями всех типов нивелирных пунктов. Следовательно, суточный и сезонный ход смещений нивелирных пунктов до определенной степени должен быть уникальным для любого места закладки нивелирного пункта.

Какова глубина проникновения тепловых деформаций в приповерхностные слои земной коры, утверждать однозначно пока затруднительно из-за отсутствия достаточного числа наблюдений за колебаниями термических напряжений в горных породах. Однако при проведении измерений деформации земной коры деформографами в штольнях горных массивов на глубинах 30-40 м, выявлены сезонные изменения деформаций в пределах от 10^{-4} до 10^{-6} м имеющие периодический характер [70].

Рассмотрим процесс суточных и сезонных изменений высот нивелирных пунктов с точки зрения деформаций в геотемпературном поле приповерхностных слоев земной коры.

К основным факторам распределения температурного поля приповерхностных слоев земной коры относятся молекулярный перенос теплоты (теплопроводность), конвекция и тепловое излучение.

В зависимости от гидрогеологических параметров приповерхностных слоев земной коры, выделяется два типа гидротермического режима - закрытый (характерен водоупорный и слабо проницаемый состав залегающих горных пород) и открытый (характерна бóльшая амплитуда и глубина колебания температур) [96] (рисунок 3.1).

Для закрытого гидротермического режима характерен молекулярный перенос теплоты, а для открытого, при наличии молекулярного переноса теплоты, характерно повышенное влияние конвективного теплообмена на изменение температурного поля.

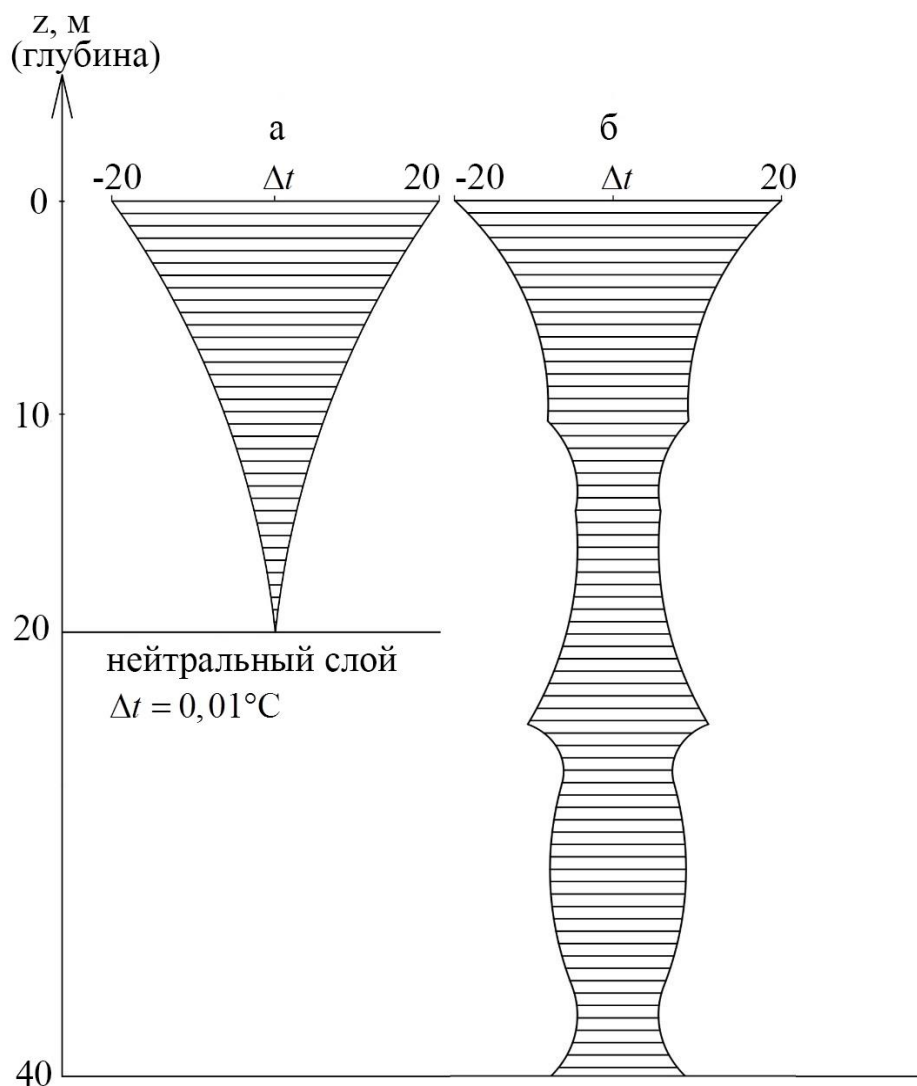


Рисунок 3.1 – Годовые колебания температуры в зависимости от глубины и гидротермических условий, а – закрытый гидротермический режим; б – открытый гидротермический режим

Оценка соотношения молекулярной и конвективной составляющих теплообмена индивидуальна в каждом конкретном случае и зависит от геофизических, географических, геологических и множества других факторов [96]. На текущий момент отсутствует научная и инструментальная базы для повсеместного расчета и моделирования распределения температуры в условиях открытого гидротермического режима.

В отличие от открытого, условия закрытого гидротермического режима позволяют пренебречь конвективной составляющей переноса теплоты в приповерхностных слоях земной коры и производить теоретическую оценку колебаний температуры Δt_i на глубине z на основе данных о колебаниях

температуры на земной поверхности, теплофизических характеристик пород, слагающих приповерхностные слои земной коры.

Рассмотрим геотемпературное поле закрытого гидротермического режима.

Известно [96], что количественные параметры теплового потока (Q , Вт), самопроизвольно переносящегося в сторону убывания температуры, согласно законам Фурье, пропорциональны градиенту температурного поля $grad(t)(^{\circ}\text{C}/\text{м})$, площади поверхности теплообмена (S , м^2) и коэффициенту теплопроводности наблюдаемой среды a ($\text{Вт} / \text{м}^{\circ}\text{C}$):

$$Q = -a \cdot grad(t) \cdot S. \quad (3.4)$$

В случае широко распространенного закрытого гидротермического режима, при предположении однородности и изотропности верхних приповерхностных слоев земной коры, может быть оценен вертикальный (по направлению нормали к земной поверхности) тепловой поток проникновения суточных и сезонных температур.

Пусть на поверхности земли амплитуда колебаний температуры Δt_0 . Принимаем, что температура земной поверхности изменяется по закону [30]:

$$t(\tau, 0) = \Delta t_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\Delta T} \tau\right), \quad (3.5)$$

где - ΔT период колебаний температуры на земной поверхности; τ - время.

Тогда решение уравнения теплопроводности [96] при этом граничном условии, в предположении независимости коэффициента температуропроводности горных пород a от глубины z на момент времени τ , будет иметь следующий вид [30]:

$$t(\tau, z) = \Delta t_0 e^{-zK} \cdot \cos\left[\frac{2\pi}{\Delta T} \left(\tau - \frac{K\Delta T}{2\pi} z\right)\right], \quad (3.6)$$

где $K = \sqrt{\frac{\pi}{a\Delta T}}$ - коэффициент затухания колебаний температуры, амплитуда

которых уменьшается с глубиной по первому закону Фурье $\Delta t_z = \Delta t_0 e^{-zK}$.

При этом происходит запаздывание фазы изменения температуры согласно второму закону Фурье на величину $\tau_{\phi}(z) = z \sqrt{\frac{\pi}{a\Delta T}}$ [30].

Повсеместно в приповерхностных слоях земной коры происходят годовые колебания температуры, амплитуда которых с глубиной убывает, а фазы смещения пропорциональны глубинам. Так при температуропроводности $a = 0,01 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{сек}$ и $2\Delta t_0 = 50^\circ \text{ С}$, на глубине 10,4 м фаза изменения температуры будет обратной, т.е. зимой температура максимальная, а летом минимальная. При этом следует отметить, что затухание поверхностных годовых синусоидальных колебаний $\Delta t = 0,1^\circ \text{ С}$ в водоупорных породах произойдет на глубинах около 20 м [30].

Таким образом, в течение года слои переменных температур будут одновременно сжиматься и расширяться с разными фазами и амплитудами на различных глубинах. Величины сжатия (расширения) приповерхностного слоя земной коры толщиной dz , залегающего в условиях закрытого гидротермического режима и сложенного водоупорными породами с коэффициентом теплового линейного расширения α для каждого момента времени t выразится величиной $\alpha \cdot t(\tau, z) dz$ [30].

Величина сжатия (расширения) для всего приповерхностного слоя земной коры или опускания (подъёма) земной поверхности определяется из решения уравнения [30, 96]:

$$\Delta H_t = \alpha \cdot \int_0^{+\infty} t(\tau, z) dz = \alpha \cdot \Delta t_0 \cdot \int_0^{+\infty} e^{-zK} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\Delta T} \tau - zK\right) dz. \quad (3.7)$$

В отсутствие каких-либо данных исследований о глубине проникновения термоупругих деформаций в породы земной коры, практика многочисленных наклономерных наблюдений [54] косвенно показывает, что эта глубина во много раз превышает мощность самого слоя сезонных переменных температур [30].

Для расчета величины ΔH_t с использованием уравнения (3.5) рассмотрим решение интеграла из формулы (3.6):

$$I = \int_0^{+\infty} e^{-zK} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\Delta T} \tau - zK\right) dz. \quad (3.8)$$

Дважды интегрируя I по частям

$$\begin{aligned} \int_0^{+\infty} e^{-zK} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\Delta T} \tau - zK\right) dz &= -\frac{e^{-zK}}{K} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\Delta T} \tau - zK\right) \Big|_0^{+\infty} - \int_0^{+\infty} e^{-zK} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\Delta T} \tau - zK\right) dz = \\ &= -\frac{e^{-zK}}{K} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\Delta T} \tau - zK\right) \Big|_0^{+\infty} - \left[-\frac{e^{-zK}}{K} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\Delta T} \tau - zK\right) \Big|_0^{+\infty} - \int_0^{+\infty} -e^{-zK} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\Delta T} \tau - zK\right) dz \right]. \end{aligned}$$

и, упрощая, с последующим применением формулы $\sin(x) - \cos(x) = \sqrt{2} \sin\left(x - \frac{\pi}{4}\right)$

, получаем выражение [30]:

$$I = \frac{\sqrt{2}e^{-zK}}{2K} \cdot \left[\sin\left(\frac{2\pi}{\Delta T} \tau - zK - \frac{\pi}{4}\right) \right] \Big|_0^{+\infty}. \quad (3.9)$$

Подставив в выражение (2.9) краевые значения, вычислим значение интеграла:

$$I = \frac{\sqrt{2}e^{-\infty}}{2K} \cdot \left[\sin\left(\frac{2\pi}{\Delta T} \tau - (+\infty) \cdot K - \frac{\pi}{4}\right) \right] - \frac{\sqrt{2}}{2K} \cdot \left[\sin\left(\frac{2\pi}{\Delta T} \tau - \frac{\pi}{4}\right) \right].$$

Как известно, первое слагаемое обращается в 0, поэтому вернувшись к исходному уравнению (3.7), получаем деформации ΔH_t приповерхностных слоев земной коры:

$$\Delta H_t = -\alpha \Delta t_0 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2K} \cdot \left[\sin\left(\frac{2\pi}{\Delta T} \tau - \frac{\pi}{4}\right) \right] = -\alpha \Delta t_0 \sqrt{\frac{a \Delta T}{2\pi}} \cdot \left[\sin\left(\frac{2\pi}{\Delta T} \tau - \frac{\pi}{4}\right) \right]. \quad (3.10)$$

Следовательно, тепловые деформации скальных приповерхностных слоев земной коры, вызывают изменения высотных отметок скальных реперов на протяжении года.

Переменное геотемпературное поле нарушает устойчивость грунтовых и вековых (глубинных) нивелирных пунктов из-за тепловых деформаций их конструктивных элементов [30]. Такие тепловые деформации конструктивных

элементов нивелирных пунктов можно определить из решения следующего уравнения [30]:

$$\delta H_t = \alpha_{\text{ст}} \cdot \int_0^z t(\tau, z) dz + \alpha_{\text{гп}} \cdot \left(\int_0^{+\infty} t(\tau, z) dz - \int_0^z t(\tau, z) dz \right) = \alpha_{\text{ст}} \Delta t_0 \int_0^z e^{-zK} \cos\left(\frac{2\pi}{\Delta T} \tau - zK\right) dz + \\ + \alpha_{\text{гп}} \Delta t_0 \left[\int_0^{+\infty} e^{-zK} \cos\left(\frac{2\pi}{\Delta T} \tau - zK\right) dz - \int_0^z e^{-zK} \cos\left(\frac{2\pi}{\Delta T} \tau - zK\right) dz \right],$$

где z – глубины закладки нивелирного пункта, $\alpha_{\text{ст}}$ и $\alpha_{\text{гп}}$ – коэффициенты теплового линейного расширения стали и горной породы.

Подставив краевые значения в соответствующие интегралы (3.10), и применяя формулу (3.9), получим рабочую формулу для определения вертикальных смещений марки нивелирного пункта [30]:

$$\delta H_t = \alpha_{\text{ст}} \Delta t_0 \sqrt{\frac{a \Delta T}{2\pi}} \cdot \left[e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{a \Delta T}}} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\Delta T} \tau - z \sqrt{\frac{\pi}{a \Delta T}} - \frac{\pi}{4}\right) - \sin\left(\frac{2\pi}{\Delta T} \tau - \frac{\pi}{4}\right) \right] - \\ - \alpha_{\text{гп}} \Delta t_0 \sqrt{\frac{a \Delta T}{2\pi}} \cdot e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{a \Delta T}}} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\Delta T} \tau - z \sqrt{\frac{\pi}{a \Delta T}} - \frac{\pi}{4}\right) = \\ = \Delta t_0 \sqrt{\frac{a \Delta T}{2\pi}} \cdot \left[(\alpha_{\text{ст}} - \alpha_{\text{гп}}) e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{a \Delta T}}} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\Delta T} \tau - z \sqrt{\frac{\pi}{a \Delta T}} - \frac{\pi}{4}\right) - \alpha_{\text{ст}} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\Delta T} \tau - \frac{\pi}{4}\right) \right]. \quad (3.11)$$

Теплофизические параметры горных пород и минералов, составляющих приповерхностные слои земной коры, в местах закладки нивелирных пунктов, различаются в зависимости от их вида, механического состава и физического состояния. При этом их значения в природных условиях изменяются в пределах [30, 36, 81, 96]:

- Коэффициент температуропроводности a ($\text{м}^2/\text{с}$) от 10^{-5} до 10^{-7} ;
- Коэффициент теплового линейного расширения α ($1/^\circ\text{C}$) от 10^{-4} до 10^{-6} .

Анализ полученных формул показывает, что тепловые деформации оснований нивелирных пунктов в условиях повсеместно распространенной геологической неоднородности [56] могут приводить к сложнодифференцируемым

вертикальным смещениям нивелирных пунктов, изменяющихся в следующих пределах (закрытый гидротермический режим) [30]:

- При закладке нивелирных пунктов в грунтах - $\Delta H_t = (0,5 \div 4,1)$ мм;
- При закладке скальных нивелирных пунктов - $\Delta H_t = (0,4 \div 39)$ мм.

Эти значения подтверждаются результатами повторного нивелирования, выполненного профессором А.К. Певневым на Баскунчакском ГДП.

Исходя из полученных результатов следует, что при закладке нивелирных пунктов на ГДП необходимо оценивать возможные сезонные тепловые дестабилизации нивелирных пунктов с использованием формулы (3.10) с целью их дальнейшего учета (исключения) из результатов повторного нивелирования по данным инженерно-геологических изысканий и сведениям о теплофизических свойствах залегающих горных пород [30].

Рассмотрим геотемпературное поле открытого гидротермического режима.

Для открытого гидротермического режима характерна более глубокая зона фактических сезонных и нерегулярных изменений температуры, которая превышает глубину залегания «нейтрального слоя» закрытого гидротермического режима.

В случаях открытого гидротермического режима величина и глубина затухания температурных амплитуд, в отличие от закрытого гидротермического режима, зависит не только от температуропроводности и периода колебаний, но в значительной степени от скорости инфильтрации подземных вод. Особенно выраженной скоростью инфильтрации подземных вод является вблизи поверхностных водоемов и водотоков. Как показывают результаты многолетнего изучения режима температуры верхних слоев земной коры в натурных условиях, в районах, сложенных от поверхности земли водопроницаемыми породами, мощность слоя годовых переменных температур существенно возрастает и не увязывается с данными, получаемыми на базе решений, учитывающих передачу тепла лишь молекулярной теплопроводностью (3.11).

В условиях открытого гидротермического режима используется уравнение Фурье-Кирхгофа [96], описывающее передачу тепла молекулярным путем и конвекции, при некоторых допущениях:

- температура земной поверхности изменяется по гармоническому закону;
- скорость вертикальной фильтрации постоянна;
- теплофизические свойства горных пород не зависят от температуры.

$$t(z, \tau) = t_z + \sum_{i=1}^2 \Delta t_i e^{-Kz} \cdot \cos\left(2\pi \frac{\tau}{\tau_i} - Bz + \varphi\right), \quad (3.12)$$

где Δt_1 , Δt_2 - суточные и годовые амплитуды колебания температуры поверхности соответственно; t_z - среднегодовая температура приповерхностного слоя на глубине z ; φ - фаза колебаний температуры.

Коэффициенты K и B вычисляются по формулам:

$$B = \sqrt{\sqrt{M^2 + \frac{N^4}{4}} - \frac{N^2}{2}};$$

$$K = \sqrt{\sqrt{\frac{N^4}{4} + \left(\frac{\pi}{a\tau}\right)^2} + \frac{N^2}{2} - N},$$

где $M = \frac{\pi c_{\text{гп}} \rho_{\text{гп}}}{\lambda \tau}$; $N = \frac{v c_{\text{в}} \rho_{\text{в}}}{2\lambda}$; v – скорость фильтрации (м/с); $c_{\text{в}}, \rho_{\text{в}}$ - объемная теплоемкость и плотность подземных вод; $c_{\text{гп}}, \rho_{\text{гп}}$ - объемная теплоемкость и плотность водосодержащей породы; λ - теплопроводность породы.

Для определения фазы колебания температуры, воспользуемся уравнением

$$t(z, 0) = t_z, \text{ т.е. } t(z, 0) = t_z + \sum_{i=1}^2 \Delta t_i e^{-Kz} \cdot \cos(\varphi - Bz) = t_z, \text{ или же } \varphi - Bz = \frac{\pi}{2}.$$

На поверхности $t(0, 0) = t_0$, а $\varphi = \frac{\pi}{2}$.

$$t(z, \tau) = t_z + \sum_{i=1}^2 \Delta t_i e^{-Kz} \cdot \cos\left(2\pi \frac{\tau}{\tau_i} - Bz + \frac{\pi}{2}\right) = t_z + \sum_{i=1}^2 \Delta t_i e^{-Kz} \cdot \sin\left(Bz - 2\pi \frac{\tau}{\tau_i}\right) \quad (3.13)$$

Распределение температурного поля нивелирного пункта отражает не только естественное геотемпературное поле за пределами скважины, но и результат

влияния конвективного теплообмена и затрубной циркуляции, вариации δH на временном интервале $[\tau_1, \tau_n]$ следует находить по интегральному приращению температуры, которое должно быть свободно от вариаций спорадического характера, а именно:

$$\delta H_i[t(\tau_n), t(\tau_1)] = \frac{\alpha}{\tau_n - \tau_1} \int_{z_{i-1}}^{z_i} \int_{\tau_1}^{\tau_n} t(z, \tau) dz d\tau \quad (3.14)$$

$$\delta H = \sum_{i=1}^n \delta H_i \quad (3.15)$$

Подставив в уравнение (3.14) выражение (3.15) и выполнив интегрирование, получим:

$$\begin{aligned} \delta H_i[t(\tau_1), t(\tau)] = & \frac{\alpha}{2\pi(\tau_n - \tau_1)} \sum_{i=1}^2 \Delta t_i \cdot \\ & \cdot \sum_{j=1}^n \left[\frac{X(\tau_1, \tau)}{K_j^2 + B_j^2} \left\{ e^{-(K_j z_j + w_{j-1})} (-K_j \cos B_j z_j + B_j \sin B_j z_j) - \right. \right. \\ & \left. \left. e^{-(K_j z_{j-1} - w_{j-1})} (-K_j \cos B_j z_{j-1} + B_j \sin B_j z_{j-1}) \right\} + \right. \\ & \left. + \frac{Y(\tau_1, \tau)}{K_j^2 - B_j^2} \left\{ e^{-(K_j z_j + w_{j-1})} (K_j \cos B_j z_j + B_j \sin B_j z_j) - \right. \right. \\ & \left. \left. - e^{-(K_j z_{j-1} - w_{j-1})} (K_j \cos B_j z_{j-1} + B_j \sin B_j z_{j-1}) \right\} \right], \end{aligned} \quad (3.16)$$

где $X(\tau_1, \tau) = \tau \cdot \sin B_j z_{j-1} - \tau_1 \sin 2\pi \frac{\tau}{\tau_i}$; $Y(\tau_1, \tau) = \tau \cdot \cos 2\pi \frac{\tau_1}{\tau_i} - \tau_1 \cdot \cos 2\pi \frac{\tau}{\tau_i}$;

$$w_{j-1} = K_1 z_1 + K_2 (z_2 - z_1) + \dots + K_{j-1} (z_{j-1} - z_{j-2}).$$

Формула справедлива для однородного слоя, $\Delta t = \Delta t_0$ – амплитуда колебаний температуры на поверхности 1 – 20 метрового слоя за период τ_i . Чтобы найти температуру в j-ом слое мощностью $z_j - z_{j-1}$, необходимо знать амплитуду Δt_{j-1} на нижней границе предыдущего слоя с номером j-1:

$$\Delta t_{j-1} = \Delta t_{j-2} e^{-K_{j-1} z_{j-1}},$$

последовательно исключая $\Delta t_{j-2}, \Delta t_{j-3}, \dots$, найдем:

$$\Delta t_{j-1} = \Delta t_0 e^{-w_{j-1}},$$

откуда

$$\Delta t_j = \Delta t_0 e^{-K_j z_j - w_{j-1}}.$$

Параметры K_j и B_j вычисляются по физико-механическим и теплофизическим параметрам горных пород [96]. Для этого при бурении скважины под нивелирный пункт необходимо определять глубины границ раздела слоев, минералогический состав и теплофизические свойства пород, что значительно осложняет процесс закладки нивелирных знаков. При этом следует учитывать, что только в отдельных случаях использование алгоритма (3.16) позволяет лишь приближенно оценить вертикальные смещения глубинных (вековых) и грунтовых нивелирных пунктов, обусловленных периодическими и нерегулярными колебаниями геотемпературного поля сформированного в условиях открытого гидротермического режима. Однако в большинстве случаев на территории Российской Федерации нивелирные пункты государственной нивелирной сети геодинимических полигонов и промышленных площадок закладываются в условиях открытого геотермического режима.

Для учета температурных деформаций конструкций глубинных нивелирных пунктов Тип 175к [43], закладываемых в условия открытого гидротермического режима, вызывающих изменение отметки реперной головки, предлагается способ интегрального учета температуры реперной трубы нивелирного пункта следующим образом (рисунок 3.2).

На поверхности реперной трубы, перед ее опусканием в скважину, по всей ее длине размещается двухжильный медный кабель. Длина $L_{пр}$ кабеля диаметром d_i подбирается с учетом характеристик выбранного в качестве эталонного термодатчика ТСМ согласно аналитическому выражению:

$$L_{пр} = L_{эт} \left(\frac{d_i}{d_{эт}} \right) \text{ или } L_{пр} = 25,8 \left(\frac{d_i}{0,1} \right), \quad (3.17)$$

где $d_{эт} = 0,1$ мм – диаметр и $L_{эт} = 25,8$ м – длина выпускаемого серийного термодатчика сопротивления ТСМ.

В нижней части реперной трубы концы двух медных проводов диаметра d_i соединяются, а в верхней части выводятся к электротермометру. При этом к

одному из верхних концов провода припаиваются два спаренных выводных медных провода. К трем проводам припаивается разъем для подключения к электротермометру [97], основные характеристики которого: пределы измеряемой температуры (интегральной) – $[-50^{\circ}\text{C}; +100^{\circ}\text{C}]$, погрешность измерения $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$, потребляемая мощность 3 Вт при габаритах 120·110·40 мм.



Рисунок 3.2 – Принципиальная схема размещения медного провода на реперной трубе

По результатам эталонирования медного провода определяется его конечная длина $L_{\text{пр}} = L_{\text{эт}} + \Delta L$. Эталонирование выполняется одновременным измерением температуры одной и той же среды эталонным (стационарным) термодатчиком и медным проводом. Из эталонирования получается величина ΔL , на которую следует изменить длину медного провода $L_{\text{пр}}$, а именно:

$$\Delta L = - \left(\frac{d_i}{0,1} \right)^2 (R_i - R_0) \frac{25,8}{R_i}, \quad (3.18)$$

где $R_i = 53 + 0,226 t_i$ - сопротивление медного провода (Ом); $R_0 = 53 + 0,226 t_0$ - сопротивление эталонного термодатчика (Ом); t_0 и t_i - температура среды, измеренная соответственно эталонным и медным термодатчиками.

Из формулы (3.18) следует, что путем подбора диаметра d_i медного провода можно изменять длину провода $L_{пр}$ согласно установленной глубине закладки нивелирного пункта z , так как $L_{пр} = 2z$.

В таблице 3.2 приведены результаты измерения интегральной температуры тела трубчатого глубинного нивелирного пункта №100, расположенного на ГДП Воронежской атомной станции теплоснабжения, и данные одновременного измерения температуры воздуха в его скважине (в реперной трубе) [45]. Глубина закрепления нивелирного пункта – 83,5 м. Как видно из данных таблицы 3.2, за период экспериментальных исследований температура конструкций нивелирного пункта не всегда находится в строгом соответствии с температурой воздуха в скважине реперной трубы. Разница между наименьшей и наибольшей средними температурами воздуха в скважине составила $-2,2^{\circ}\text{C}$, а между среднеинтегральными значениями температуры конструкции нивелирного пункта $-1,4^{\circ}\text{C}$. Максимальное отклонение $t_{\text{возд}}$ от $t_{\text{ср.инт}}$ составила $1,5^{\circ}\text{C}$ в марте 1988 г.

Таким образом, несоответствие температуры воздуха в скважине с температурой тела нивелирного пункта приводит к необходимости введения в высотное положение нивелирных пунктов поправок, которое тем больше, чем больше глубина закрепления якоря нивелирного пункта.

Таблица 3.2 – Значения температуры воздуха в скважине глубинного нивелирного пункта, полученных с помощью термокосы и среднеинтегральной температуры реперной трубы нивелирного пункта РП 100 Воронежского ГДП

Глубина измерени й (м)	Измеренные значения температуры воздуха в скважине нивелирного пункта №100 и среднеинтегральное значение температуры тела нивелирного пункта									
	12.12		18.03		02.04		14.05		21.06	
	$t_{\text{возд}}$	$t_{\text{ср.инт}}$	$t_{\text{возд}}$	$t_{\text{ср.инт}}$	$t_{\text{возд}}$	$t_{\text{ср.инт}}$	$t_{\text{возд}}$	$t_{\text{ср.инт}}$	$t_{\text{возд}}$	$t_{\text{ср.инт}}$
0,5	-2,4	10,4	-0,8	9,8	12,6	9,3	18,9	9,0	24,1	9,8
1,0	4,0		5,0		6,6		13,0		18,7	
2,0	6,6		6,8		6,0		6,2		11,7	
3,0	20,0		8,4		6,9		6,1		8,8	

Продолжение таблицы 3.2

4,0	12,5		6,4		6,0		6,2		7,4	
5,0	12,9		7,0		6,0		6,0		7,1	
6,0	13,7		8,6		7,4		7,0		7,3	
7,0	12,2		9,6		8,6		8,0		7,8	
8,0	11,6		10,2		9,4		8,8		8,4	
9,0	11,0		10,5		9,9		9,4		9,0	
10,0	10,6		10,6		10,2		9,8		9,4	
11,0	10,3		10,6		10,1		10,0		9,7	
12,0	10,1		10,0		10,0		10,1		9,9	
13,0	9,9		10,0		10,0		10,1		10,0	
17,0	9,9		9,9		9,9		10,0		10,0	
20,0	9,9		9,9		9,9		10,0		10,0	
Среднее значение	9,6		8,3		9,1		9,3		10,5	

Примечание: температура воздуха в скважине глубинного (83,5 м) нивелирного пункта измерена термокосой до глубины 20 м, при ее постоянстве на глубине $z > 12$ м.

3.3 Исследование механизма и разработка методов исключения воздействий морозного пучения грунтов на устойчивость нивелирных пунктов

3.3.1 Исследование механизма и разработка метода исключения воздействия морозного пучения на нивелирные пункты в сезонно промерзающих грунтах

Сезонное промерзание глинистых, суглинистых, пылеватых, водонасыщенных супесчаных грунтов, залегающих над поверхностью грунтовых вод, приводит к их морозному пучению. Морозное пучение нивелирного пункта обусловлено увеличением объема грунта, смерзавшегося с его конструктивными элементами. При этом нивелирные пункты выпучиваются со скоростью до 250 мм/год [5]. С 1955 г. по настоящее время при разработке конструкций нивелирных пунктов [43, 76] для закрепления государственной нивелирной сети и нивелирных сетей ГДП в условиях сезонного промерзания грунтов, применяются приближенные расчеты конструктивных элементов нивелирных пунктов и глубин

их закладки [32, 33, 68, 94, 95], которые повсеместно не обеспечивают устойчивости грунтовых нивелирных пунктов [5, 12, 33, 47, 77]. В связи с этим возникает научно-техническая задача по разработке алгоритма для расчета конструктивных элементов грунтовых нивелирных пунктов, устойчивых к воздействиям морозного пучения. Разработанная ранее [29] и широко используемая на техногенных ГДП конструкция нивелирного пункта Тип 162, в соответствии с рекомендациями Инструкции [43], без какой-либо оценки его устойчивости в сложившихся климатических и инженерно-геологических условиях места закладки. При этом не учитывается, что устойчивость грунтовых нивелирных пунктов Типа 162, в условиях сезонного промерзания грунтов и воздействия морозного пучения на конструктивные элементы нивелирного пункта обеспечивается при соблюдении условия [5, 29, 95]:

$$P_{\text{уд}} \geq P_{\text{п}} \times K_{\text{н}}, \quad (3.19)$$

где $P_{\text{уд}}$ и $P_{\text{п}}$ – сила, удерживающая нивелирный пункт от морозного выпучивания и сила морозного пучения, воздействующая на конструктивные элементы нивелирного пункта соответственно [29]; $K_{\text{н}} = 1,2$ – коэффициент надежности, устанавливаемый для нивелирного пункта Тип 162 по аналогии со свайными и трубчатыми фундаментами [29, 85].

Известно [5], что смерзание грунтов с поверхностями конструктивных элементов нивелирных пунктов и пучение грунтов у границы их сезонного промерзания сопровождается возникновением реактивных сил R (рисунок 3.3) [29]. Реактивные силы, равные сопротивлению вышележащих смерзшихся с боковыми поверхностями нивелирного пункта грунтов, по величине приравниваются к силам морозного пучения $P_{\text{п}}$. Через незамерзший слой грунта реактивные силы оказывают давление на верхнюю поверхность выступающей части якоря (основания) нивелирного пункта [29]. Величина, удерживающая нивелирный пункт от морозного выпучивания, кроме реактивной силы, состоит из сил сопротивления грунтов сдвигу по его боковой поверхности (сил трения) $F_{\text{тр}}$, веса нивелирного пункта $G_{\text{рп}}$ и веса слоя грунта, расположенного между нижней

границей сезонного промерзания грунта и верхней поверхностью якоря нивелирного пункта $G_{гр}$ [5, 29, 69] (рисунок 3.3).

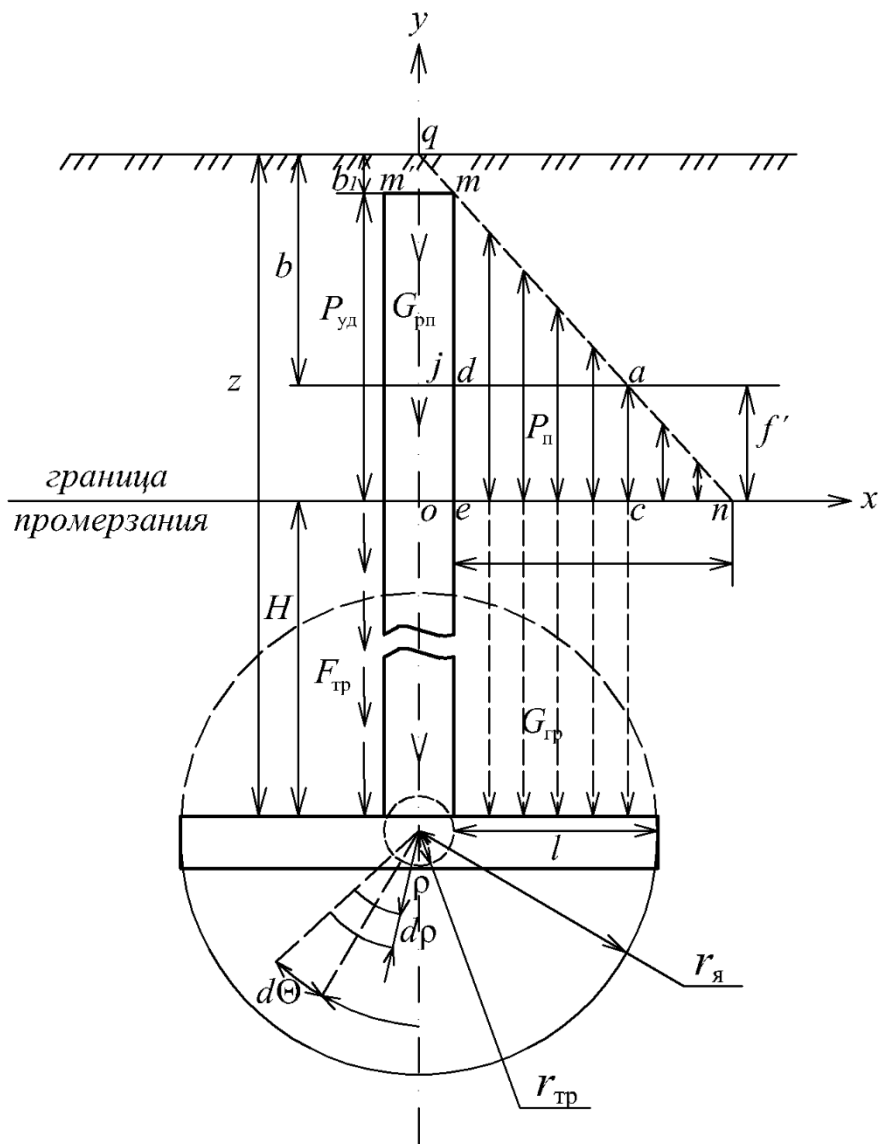


Рисунок 3.3 – Схема к расчету конструктивных элементов репера Тип 162 на воздействие сил морозного пучения

Приравнивая нивелирный пункт к свайным фундаментам ненагруженных сооружений [85], можно по аналогии с известными схемами [5, 69], выполнить расчеты на действия выдергивающих нагрузок на реперную трубу [29].

Согласно [5, 69], расчетное значение силы, выпучивающей нивелирный пункт Тип 162, определяется формулой:

$$P_{п} \leq \frac{P_{уд}}{K_{н}} = \frac{1}{K_{н}} (R + F_{тр} + G_{рп} + G_{гр}). \quad (3.20)$$

Нивелирный пункт Тип 162, имеющий простую конструкцию, позволяющую снижать стоимость работ по его закладке, отличается повышенной устойчивостью к морозному пучению от остальных конструкций нивелирных пунктов, предусмотренных нормативными материалами [44, 76], что убедительно можно обосновать применением неравенства (3.20), позволяющего осуществить выбор глубины закладки и конструктивных элементов на основе теоретических расчетов, учитывающих соотношение сил морозного пучения с силами, удерживающими нивелирный пункт от выпучивания [29].

Известно [68], что сила морозного пучения $P_{\text{п}}$ распределяется по треугольной эпюре oqn (рисунок 3.3) с длиной катета, равного глубине сезонного промерзания слоев грунта $on = f$ и высотой треугольника etn , равной удельной силе морозного излучения $P_{\text{уп}}$ [29].

Часть реактивной силы R , удерживающей нивелирный пункт от морозного пучения $R_{\text{уд}} = P_{\text{п}}$, действует на верхнюю поверхность якоря нивелирного пункта длиной $r_{\text{як}} - r_{\text{тр}} = l$ и изменяется по закону [29]:

$$R = \alpha \rho + b, \quad (3.21)$$

где $\alpha = -\frac{P_{\text{уп}}}{f}$ – коэффициент, характеризующий наклон прямой tn к оси oX ;

$b = P_{\text{уп}} \left(\frac{r_{\text{як}} - r_{\text{тр}}}{f} \right)$ – отрезок, отсекаемый по оси симметрии репера прямой tn от

начала координат точки $t.O$; ρ – расстояние от вертикальной оси симметрии нивелирного пункта (оси oy) [29].

Рассмотрим эпюры реактивной силы от пучения $R = P_{\text{п}}$. На верхнюю часть якоря нивелирного пункта действуют суммарная «реактивная» нагрузка R , состоящая из треугольной $R_3 (adm)$ и прямоугольной $R_4 (adec)$ нагрузок, которые можно получить путем вычитания из суммы нагрузок $R_3 (ajq)$ и $R_4 (ajoc)$ суммы нагрузок $R_5 (mm'q)$ и $R_6 (mm'oe)$ [29].

Треугольная нагрузка $R_3 (ajq)$ определяется путем интегрирования

$$R_3 = \int_0^{2\pi} \int_0^{r_{як}} R \rho d\rho d\Theta. \quad (3.22)$$

Вычисляя интеграл (3.22), получаем:

$$R_3 = \int_0^{2\pi} \int_0^{r_{як}} (\alpha \rho + b) \rho d\rho d\Theta = \frac{2}{3} \pi \alpha r_{як}^3 + \pi b r_{як}^2. \quad (3.23)$$

Подставляя в уравнение (2.23) значения α и b , получим

$$R_3 = \frac{\pi P_{уп} r_{як}^2}{f} \left(\frac{1}{3} r_{як} - r_{тр} \right) = \frac{\pi P_{уп} r_{як}^2}{f} \left(\frac{r_{як}}{3} - r_{тр} \right). \quad (3.24)$$

Прямоугольная нагрузка R_4 определяется из выражения:

$$R_4 = S \times b'. \quad (3.25)$$

С учетом того, что $S = \pi(r_{як}^2 - r_{тр}^2)$ и $b' = P_{уд} \left(\frac{f - r_{як}}{f} \right)$ выражение (3.25)

принимает вид :

$$R_4 = \pi P_{уд} (r_{як}^2 - r_{тр}^2) \left(\frac{f - r_{як}}{f} \right). \quad (3.26)$$

По аналогии определяем треугольную R_5 (мм'q) и прямоугольную R_6 (мм'ое) нагрузки.

Для треугольной реактивной силы справедливо следующее выражение [29]:

$$R_5 = \int_0^{2\pi} \int_0^{r_{тр}} (\alpha \rho + b_1) \rho d\rho d\Theta = \frac{2}{3} \pi \alpha r_{тр}^3 + \pi b_1 r_{тр}^2. \quad (3.27)$$

Подставляя в выражение (3.27) значение $\alpha = -\frac{P_{уп}}{f}$ и $b_1 = P_{уп} \left(\frac{r_{тр}}{f} \right)$, получим

значение реактивной нагрузки:

$$R_5 = \frac{1}{3} \pi \frac{P_{уп}}{f} r_{тр}^3. \quad (3.28)$$

Значение прямоугольной реактивной нагрузки R_6 можно определить согласно формуле (3.25):

$$R_6 = \frac{1}{2} \pi r_{тр}^2 P_{уп}. \quad (3.29)$$

Реактивная нагрузка R , действующая на выступающую часть якоря как удерживающая сила, с учетом её составляющих (3.24), (3.26), (3.28) и (3.29), определяется из уравнения [29]:

$$R = R_3 + R_4 - R_5 - R_6, \quad (3.30)$$

$$\begin{aligned} R &= \frac{\pi P_{\text{уп}} r_{\text{як}}^2}{f} \left(\frac{r_{\text{як}}}{3} - r_{\text{тр}} \right) + \pi P_{\text{уп}} (r_{\text{як}}^2 - r_{\text{тр}}^2) \left(\frac{f - r_{\text{як}}}{f} \right) - \frac{1}{3} \pi \frac{P_{\text{уп}}}{f} r_{\text{тр}}^3 - \frac{1}{2} \pi r_{\text{тр}}^2 P_{\text{уп}} = \\ &= \frac{\pi P_{\text{уп}}}{f} \left[r_{\text{як}}^2 \left(\frac{r_{\text{як}}}{3} - r_{\text{тр}} \right) + (r_{\text{як}}^2 - r_{\text{тр}}^2) (f - r_{\text{як}}) - \frac{r_{\text{тр}}^3}{3} - \frac{r_{\text{тр}}^2 f}{2} \right]. \end{aligned} \quad (3.31)$$

Согласно выражениям (3.21) и (3.31), неравенство (3.20) запишется в следующем виде [29]:

$$\begin{aligned} P_{\text{п}} \times K_{\text{н}} \leq P_{\text{уд}} &= \frac{\pi P_{\text{уп}}}{f} \left[r_{\text{як}}^2 \left(\frac{r_{\text{як}}}{3} - r_{\text{тр}} \right) + (f - r_{\text{як}}) (r_{\text{як}}^2 - r_{\text{тр}}^2) - \frac{r_{\text{тр}}^3}{3} - \frac{r_{\text{тр}}^2 f}{2} \right] + \\ &+ \pi (r_{\text{як}}^2 - r_{\text{тр}}^2) \gamma + G_{\text{рп}} + F_{\text{тр}} \end{aligned} \quad (3.32)$$

С учетом значений $P_{\text{п}} = 2P_{\text{уп}} \pi r_{\text{тр}} f$ и $K_{\text{н}} = 1, 2$, принятых, согласно рекомендаций СП 24.13330.2011 [85], выражение (3.32) принимает вид кубического неравенства [29]:

$$\begin{aligned} 2, 4 \pi P_{\text{уп}} r_{\text{тр}} f \leq & \frac{\pi P_{\text{уп}}}{f} \left[r_{\text{як}}^2 \left(\frac{r_{\text{як}}}{3} - r_{\text{тр}} \right) + (f - r_{\text{як}}) (r_{\text{як}}^2 - r_{\text{тр}}^2) - \frac{r_{\text{тр}}^3}{3} - \frac{r_{\text{тр}}^2 f}{2} \right] + \\ & + \pi (r_{\text{як}}^2 - r_{\text{тр}}^2) \gamma + G_{\text{рп}} + F_{\text{тр}}, \end{aligned} \quad (3.33)$$

где γ – объемный вес грунта.

Расчетное значение сил $F_{\text{тр}}$, удерживающих нивелирный пункт от выпучивания за счет трения его о грунт, расположенный между нижней границей промерзания и якорем (основанием) нивелирного пункта, определяется по формуле [29, 85]:

$$F_{\text{тр}} = S' \times R_i = 2 \pi r_{\text{тр}} f_i R_i, \quad (3.34)$$

где R_i – расчетное сопротивление грунта сдвигу по боковой поверхности нивелирного пункта (для Тип 162 по боковой поверхности реперной трубы), расположенной ниже глубины промерзания; $S' = 2 \pi r_{\text{тр}} f_i$ – площадь боковой

поверхности нивелирного пункта, расположенной ниже границы промерзания; f_i – толщина грунта между якорем репера и границей промерзания грунта [29].

Общеизвестные решения кубического неравенства (3.33) позволяют определить конструктивные элементы нивелирного пункта Тип 162 и глубину его закладки, обеспечивающие его устойчивость в сложившихся климатических и инженерно-геологических условиях [29].

Приведем пример использования расчета для 2-х нивелирных пунктов, рекомендованных Инструкцией [43] при закладке их в зоне сезонного промерзания (глубина промерзания $f = 1,2$ м) в разных инженерно-геологических условиях [29].

Условия закладки первого нивелирного пункта: конструкция Тип 162 заложен в глине, для которой $\gamma = 2750$ кг/м³; $P_{уп} = 11$ н/см²; $R_i = 0,147$ н/см²; $\gamma_{ст} = 8$ г/см³ и $\gamma_{бет} = 2400$ кг/м³.

Условия закладки второго нивелирного пункта аналогичной конструкции: заложен в суглинках, для которых $\gamma = 2700$ кг/м³; $P_{уп} = 7$ н/см²; $R_i = 0,079$ н/см².

В первом случае учета инженерно-геологических условий глубина закладки нивелирного пункта для грунтового нивелирного пункта Тип 162 Инструкцией [43] при глубине сезонного промерзания $f = 1,2$ м назначается $z_{\phi} = 2350$ мм [29].

С учетом того, что нивелирный пункт заложен в приповерхностный слой земной коры, сложенный глиной, расчетная глубина закладки нивелирного пункта в сильно пучинистый грунт, каким является рассматриваемая глина, согласно неравенству (3.33) при сохраняемых размерах конструктивных элементов пункта должна составлять $z_{\phi} = 3300$ мм [29]. Следовательно, в данных инженерно-геологических условиях нивелирный пункт является неустойчивым к морозному пучению при промерзания грунта на $f = 1,2$ м [29].

Во втором случае для нивелирного пункта, заложенного в суглинках, нормативная глубина закладки $z_{\phi} = 2350$ мм практически равнялась расчетной величине $z_{\phi} = 2300$ мм, что указывает на устойчивость морозному пучению нивелирного пункта, заложенного в таких инженерно-геологических условиях [29].

Достоверность расчетов параметров нивелирных пунктов и их глубин закладки, выполненных в соответствии с уравнением (3.33), подтверждена их применением на Нововоронежском ГДП НВАЭС, где нивелирные пункты Тип 162, заложенные на глубину $z_{\phi} = 4000$ мм все без исключения не испытывали морозного пучения, а нивелирные пункты Тип 162, заложенные на 3200 мм в глинистые грунты, на протяжении 6 лет в переходный период зима-весна испытывали морозное выпучивание [29].

Приведенные выше исследования показывают, что нормативная глубина закладки нивелирных пунктов, рекомендованная Инструкцией [43], не обеспечивает устойчивости нивелирных пунктов в условиях сезонного промерзания грунтов к воздействиям морозного пучения при закладке их в высокопучинистых тонкодисперсных грунтах [29].

3.3.2 Исследование механизма и разработка метода исключения воздействий морозного пучения на нивелирные пункты в многолетнемерзлых грунтах

Учитывая, что большинство нефтегазовых месторождений расположено в северных районах с распространением вечной мерзлоты, рассмотрим вопрос устойчивости нивелирных пунктов, рекомендованных инструкцией [43] для закрепления нивелирных пунктов ГДП в условиях сезонного оттаивания [28].

Устойчивость трубчатых (Тип 150 и других) нивелирных пунктов в условиях вечной мерзлоты нормативно [43] обеспечивается назначением конструкции нивелирного пункта и глубины его закладки [28]. При этом не учитывается, что на трубчатый нивелирный пункт в условиях многолетнемерзлых грунтов в период сезонного промерзания действует выталкивающая касательная сила морозного пучения $P_{\text{пуч}}$ (рисунок 3.4) и, ниже границы оттаивания, удерживающие силы смерзания реперной трубы с вечномерзлым грунтом $P_{\text{смерз}}$ по глубине ее заделки в мерзлоту [28]. В условиях сезонного промерзания (протаивания) нивелирный знак по отношению к морозному пучению будет устойчивым при выполнении неравенства [28]:

$$P_{\text{пуч}} < P_{\text{смерз}} \quad (3.35)$$

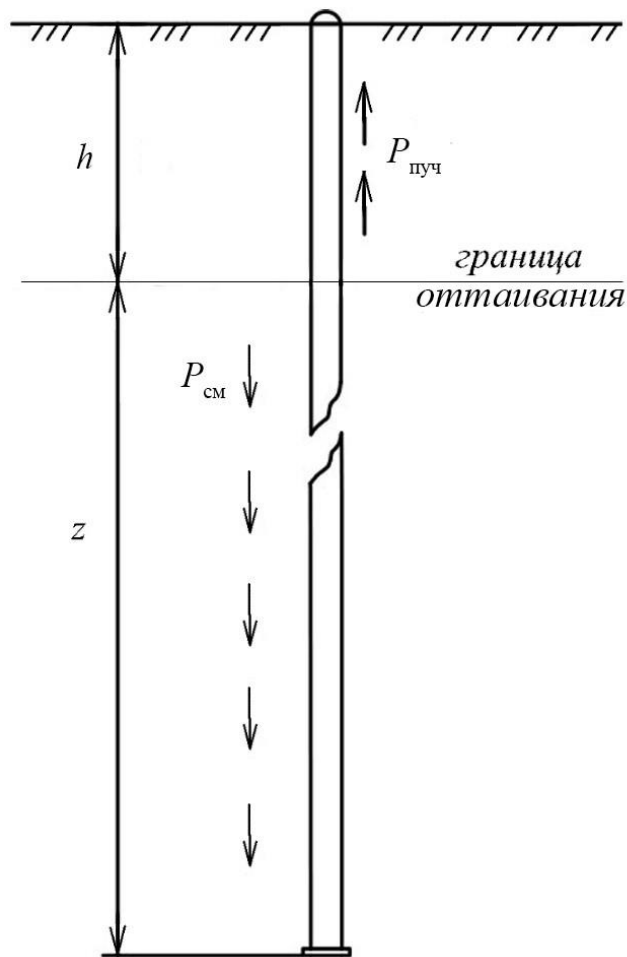


Рисунок 3.4 – Схема к расчету конструктивного элемента трубчатого нивелирного пункта на воздействия сил пучения и смерзания

Подставив в неравенство (3.35) значения $P_{\text{пуч}} = 2P_{\text{уп}}\pi r f$ и $P_{\text{см}} = 2P_{\text{усм}}\pi r z'$ (z' - глубина заделки реперной трубы в вечномерзлый грунт и $P_{\text{усм}}$ - удельная сила смерзания реперной трубы с вечномерзлым грунтом), получим неравенство следующего вида:

$$P_{\text{уп}} f \leq P_{\text{усм}} z'. \quad (3.36)$$

Из неравенства (3.36) после преобразования и применения коэффициента запаса, принимаемого равным 1,4 [28, 69, 85], получим аналитическое выражение для назначения глубины заделки z' в вечномерзлые грунты нивелирного пункта Тип 150, которая обеспечит с необходимым запасом его устойчивость по отношению к морозному пучению, а именно:

$$z' \geq 1,4 f \frac{P_{\text{уп}}}{P_{\text{усм}}} . \quad (3.37)$$

Глубина сезонного промерзания (оттаивания) h , также, как и силы морозного пучения и смерзания, имеет широкий диапазон изменения и зависит от географического и геоморфологического местоположения закладки нивелирного знака и его гидротермических и гидрогеологических условий закладки [28].

Неравенство (3.37) позволяет определить в сложившихся климатических, грунтовых и гидрогеологических условиях минимальную глубину z' закладки (заделки) части трубчатого нивелирного пункта Тип 150 в вечномёрзлые грунты, обеспечивающую его устойчивость в сложившихся природно-технических обстоятельствах ГДП [28].

Приведем пример использования методики расчета глубин закладки двух нивелирных пунктов Тип 150, рекомендованных инструкцией [43] для закладки в областях многолетней мерзлоты [28].

Условия закладки первого нивелирного пункта: Тип 150, заложен в супеси, для которой $f = 3,23$ м (Ямало-Ненецкий АО [92]), $P_{\text{уп}} = 120$ кПа, $P_{\text{усм}} = 80$ кПа.

Условия закладки первого нивелирного пункта: Тип 150, заложен в суглинках, для которых $f = 2,5$ м (Ямало-Ненецкий АО [92]), $P_{\text{уп}} = 90$ кПа, $P_{\text{усм}} = 130$ кПа. В первом и втором случаях реперные трубы нивелирных пунктов, согласно Инструкции [43] заглубляются в многолетнемерзлые породы на глубину 2-3 м [28].

С учетом условий закладки нивелирных пунктов, согласно неравенству (2.37) для первого нивелирного глубина заглубления в многолетнемерзлые породы должны быть $z > 4$ м и во втором случае $z > 2,4$ м [28]. Первый нивелирный пункт, согласно расчету, относится к категории неустойчивые к морозному пучению, а для второго нивелирного пункта расчеты подтверждают его устойчивость к морозному пучению в сложившихся природно-техногенных условиях [28].

Достоверность расчетов глубин заглубления в многолетнемерзлые породы нивелирных пунктов, выполненных в соответствии с неравенством (3.37),

подтверждена их применением на геодинамических полигонах Ямало-Ненецкого АО [24, 117], где нивелирные пункты, заложенные на глубину, полученную с учетом неравенства (3.37) не испытывали морозное пучение, а нивелирные пункты, заложенные на глубину, рекомендованную инструкцией [43], подвергались морозному пучению [5, 24, 28, 117].

При использовании конструкции такого трубчатого нивелирного пункта Тип 150 следует соблюдать следующую технологию: производится расчет длины нивелирного пункта (реперной трубы), в пробуренную скважину, диаметр которой превышает диаметр реперной трубы на 10-20 см, помещают нивелирный пункт. Увеличение сил смерзания на участках заделки реперной трубы в вечномерзлые грунты можно достичь созданием рифлёной (шероховатой) поверхности, применением растворов для заполнения пространства между реперной трубой и стенками скважины, которая при замерзании (затвердевании) имеют более высокую прочность.

Использование нивелирного пункта допускается после вмерзания его нижней части в вечномерзлый грунт. Время вмерзания зависит от температуры вечномерзлого грунта, сезона закладки нивелирного пункта, климатических условий района работ и способа бурения скважины. Ориентировочно, для лета и осени - это время при бурении ударно-канатным способом и температуре вечномерзлого грунта $-1,5^{\circ}\text{C}$ составляет не менее 25 суток, а при температуре -3°C равняется 12 суткам. Для зимы и весны при этих же температурах время соответственно составляет 15 и 8 суток. Время вмерзания более точно определяется опытным путем.

Выводы по главе 3

На основе систематизации и обобщения результатов теоретических и экспериментальных исследований экзогенных геомеханических процессов, повсеместно получающих развитие в приповерхностных слоях земной коры, и оценки существующих результатов исследований устойчивости грунтовых нивелирных пунктов, сформулирована актуальная нерешенная проблема влияния экзогенных факторов на устойчивость нивелирных пунктов. Для решения

проблемы необходимы разработка методов прогноза и исключения влияний экзогенных факторов на устойчивость скальных, грунтовых и глубинных нивелирных пунктов. В рамках решения проблемы получены следующие результаты:

- выполнены исследования и физико-механическое моделирование воздействий геотемпературного поля на устойчивость нивелирных пунктов в условиях открытого и закрытого гидротермических режимов;
- разработан способ учета тепловых деформаций конструктивных элементов нивелирных пунктов на основе измерения интегральных значений их температуры на момент повторного нивелирования;
- исследован механизм воздействия морозного пучения на устойчивость нивелирных пунктов;
- разработан алгоритм для расчета параметров грунтовых нивелирных пунктов, устойчивых к морозному пучению в условиях сезонного промерзания грунтов;
- разработан алгоритм для расчета глубин закладки устойчивых к морозному пучению грунтовых нивелирных пунктов для условий многолетнемерзлых грунтов.

ГЛАВА 4 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Характеристика полученных результатов исследований

Результаты прикладных теоретических и экспериментальных исследований, представленных в диссертационной работе, в основном имеют экономическую ценность и направлены на получение научно-обоснованных технических и технологических решений в области геодезического производства.

При этом весь комплекс научных исследований и разработок направлен на разработку программно-целевого подхода к организации повторных геодезических наблюдений и поиск путей эффективного применения повторного нивелирования как метода для решения задач горной геомеханики и современной геодинамики на ГДП разрабатываемых нефтегазовых месторождений.

К научно-практическим разработкам, получившим внедрение на ГДП НГМ следует отнести (Приложение Б):

- созданный на основе законов Фурье расчетный математический аппарат и реализованные на его основе технические решения, обеспечивают оценку и учет дестабилизаций нивелирных пунктов, обусловленных тепловыми деформациями его конструктивных элементов и оснований;
- разработанная на основе теоретико-экспериментальных исследований методика для расчета конструктивных элементов и глубин закладки нивелирных пунктов, устойчивых к морозному пучению в условиях сезонного промерзания грунтов и вечной мерзлоты;
- разработанный на основе теоретических исследований, математический аппарат для расчета параметров сетей повторного нивелирования и его технологии с позиций программно-целевого подхода к его постановке на техногенных и прогностических геодинамических полигонах;
- разработанный алгоритм оценки значимости результатов повторного нивелирования.

Внедрение результатов исследований и разработок показали, что они имеют народно-хозяйственное значение, экономическую эффективность, и способствуют

повышению оперативности повторных геодезических наблюдений, надежности и репрезентативности их значимых результатов, а также экономической эффективности их производства на геодинамических полигонах, разрабатываемых месторождений углеводородов.

4.2 Внедрение результатов исследований на ГДП Ямбургского НГКМ

На одном из крупнейших в мире Ямбургском нефтегазовом месторождении в соответствии с требованиями закона «О недрах» и других законодательных и нормативных актов [44, 64] для целей обеспечения промышленной безопасности и охраны недр возникла необходимость создания геодинамического полигона для контроля за геомеханическими и геодинамическими деформационными процессами, получивших развитие в процессе разработки месторождения. Уникальность разработки проекта систем наблюдений и организации на значительной по размерам территории (120x150 км) с сложными природными условиями повторных геодезических наблюдений на ГДП состояла в том, что результаты повторного нивелирования были призваны обеспечить отдельную пространственно-временную оценку кинематических характеристик техногенных вертикальных сдвижений земной поверхности, проявлений современной геодинамики, деформаций коллекторов и горных массивов, залегающих над залежью, а также скоростей изменений этих величин [18].

Ямбургское НГКМ, площадь лицензионного участка которого составляет 8218,292 км², расположено в природной зоне северной тундры и распространения многолетней мерзлоты мощностью от 300 до 400 м, для которой характерно повсеместное, сложнодифференцированное в пространстве проявление на глубину до 1,8 м пучение сезонно-талых грунтов, которое, в зависимости от их состава и влажности, изменяется в пределах от нескольких сантиметров до 1 м. При этом для территории месторождения, протяженность которой по долготе и широте соответственно составляет 153,6 и 116,8 км, характерны высокая заозерненность (около 8%) [18] и густота речной сети (около 4 км/км²), сопровождаемых заболоченностью речных долин и прибрежных зон, что значительно затрудняет и,

в большинстве случаев, исключает возможность прокладки линий повторного нивелирования I и II классов значительной протяженности [2 8].

Важнейшей проблемой проектирования и проведения повторных геодезических наблюдений на Ямбургском ГДП, расположенного в труднодоступных районах, на значительной по размеру территории, являлась громоздкость, трудоемкость и высокая стоимость повторного высокоточного нивелирования I и II классов, являющегося на современном этапе в силу точностных характеристик основным методом изучения на ГДП количественных параметров вертикальных сдвижений земной поверхности техногенного происхождения и проявлений современной геодинамики [43, 10, 47, 71]. По оценкам профессора Ю.А. Кашникова [49] и данным карты СВДЗК [84] для Западной Сибири скорость вертикальных сдвижений земной поверхности для техногенных и тектонических проявлений соответственно составляют не более 5 мм/год и 2-3 мм/год.

Для Ямбургского лицензионного участка ООО «Газпром добыча Ямбург» в соответствии с нормативно-техническими документами [43, 76, 83] в 2012 г. в составе горно-геологического обоснования разработано структурное построение ГДП [37]. При использовании традиционного подхода, горно-геологическое обоснование предусматривало закладку линий повторного нивелирования I класса общей протяженностью 360 км, пересекающих вдоль и вкрест лицензионный участок месторождения, залежи углеводородов и тектонические нарушения. В соответствии с горно-геологическим обоснованием на Ямбургском ГДП предполагалось заложить на линиях нивелирования 266 грунтовых нивелирных пункта, повторно нивелируемых через 1-2 года.

Анализ сложившейся ситуации на проектируемом Ямбургском ГДП, основанный на результатах исследований, приведенных в разделе 2, показывал, что при существующем традиционном подходе к постановке повторного нивелирования на техногенных ГДП [29, 49], ошибки определения скоростей и тектонических движений и техногенных сдвижений земной поверхности [18], при периодичности повторных нивелирований 1 год составляли бы, в соответствии с

формулой (2.4), величины 30,6 мм/год и 35,5 мм/год, которые на порядок и более превышали бы значения прогнозируемых скоростей техногенных вертикальных скоростей смещения земной поверхности и современных вертикальных сдвижений земной коры.

В сложившейся ситуации на территории Ямбургского нефтегазового месторождения при проектировании и обустройстве геодинамического полигона в 2014-2016 гг. были реализованы научно-технические разработки диссертанта [20, 23, 30] и усовершенствованный им программно-целевой подход [24, 28, 29, 117] к проектированию сетей повторного нивелирования Ямбургского ГДП, их обустройства и организации работ по прокладке линий повторного нивелирования. При этом наиболее сложную задачу составляло исключение установленных величин техногенных деформаций от природной тектоники и экзогенных процессов.

Для решения поставленных задач на Ямбургском ГДП была создана сеть повторных нивелирований, включающая 29 наблюдательных систем, представленных 22 контрольными площадками, 4 геодинамическими профилями и 3 профильными линиями, закрепленными на местности 33 грунтовыми нивелирными пунктами Тип 150, 19 исходными и 3 контрольными реперами-скважинами. Общая протяженность линий повторного нивелирования I класса составила 23 км.

Обустройство сети повторного нивелирования в виде геодинамических профилей, профильных линий и согласно научно-техническим разработкам диссертанта снизила стоимость геодезических работ на Ямбургском ГДП на 46084 тыс. руб. (таблица 4.1)

Для контроля сдвижений (вертикальных смещений) земной поверхности и техногенных деформаций коллекторов, обусловленных отбором углеводородов из недр, были построены наблюдательные системы двух модификаций [18].

Таблица 4.1 – Стоимость геодезических работ по оборудованию нивелирными пунктами и постановка повторного нивелирования на ГДП Ямбургского НГКМ

Вид геодезических работ	Подход к постановке геодезических работ		Снижение стоимости при внедрении диссертационных разработок
	Согласно требованиям нормативно-технических документов [43,76]	С учетом совершенствований, представленных в диссертации	
Стоимость оборудования ГДП нивелирными пунктами, тыс. руб.	24355	8361	15994
Стоимость повторного нивелирования в одном цикле, тыс. руб.	11105	1075	10030
Стоимость повторного нивелирования в 3-х циклах 2015, 2016 и 2017 гг.	33315	3225	30090
Итого снижение стоимости по состоянию на 01.06.2018 (3 цикла повторного нивелирования), тыс. руб.:			46084

Каждая из наблюдательных систем состояла из исходных и контрольных (деформационных) нивелирных пунктов [18]. В отличие от общепринятого традиционного подхода [43], в качестве исходных нивелирных пунктов выбраны законсервированные разведочные и наблюдательные скважины, основание которых (забой скважины) расположено по вертикали ниже газовых залежей, что исключало влияние на их устойчивость процессов, связанных с изучаемым фактором – оценкой влияния отработки пластов-коллекторов [18]. Скважины, оборудовавшиеся таким образом назывались репером-скважиной.

Для установления количественных характеристик вертикальной компоненты техногенных сдвижений земной поверхности на ГДП были задействованы 22 контрольных площадок (КП), образованных исходным репером-скважиной

(исходным нивелирным пунктом) и удаленными от него на расстояние не более 100 м, двумя трубчатыми грунтовыми реперами Тип 150 [18, 43]. Трубчатые грунтовые нивелирные пункты Тип 150, рекомендуемые инструкцией [43] для областей вечной мерзлоты, с целью исключения воздействия на них морозного пучения, были заложены на глубину z , согласно рекомендациям, приведенным в работе [28], а именно:

$$z = f \left(1 + 1,4 \frac{P_{\text{уп}}}{P_{\text{усм}}} \right), \quad (4.1)$$

где f – глубина сезонного протаивания (промерзания), которая приводится в СП [92], для конкретной климатической зоны; $P_{\text{уп}}$ и $P_{\text{усм}}$ – удельные силы морозного пучения и смерзания реперной трубы нивелирного пункта с многолетнемерзлым грунтом, значения которых для конкретного типа многолетнемерзлого грунта приведены в СП [18, 69, 85].

Для определения и последующей оценки техногенных сдвижений (проседаний) земной поверхности на Ямбургском ГДП было оборудовано восемь контрольных площадок (КП), состоящих из опорного репера-скважины и спаренного с ним грунтового нивелирного пункта, а именно:

1. Контрольная площадка №2 – оборудована исходным нивелирным пунктом на базе наблюдательной скважины 4330 с глубиной закладки 1331 м в паре с контрольным грунтовым нивелирным пунктом и была предназначена для контроля за прогнозируемыми максимальными оседаниями в районе возможного центра мульды проседания на Анарьяхинской площади по результатам повторного нивелирования I класса опорного и контрольного грунтового нивелирных пунктов;

2. Контрольная площадка №8 – оборудована исходным глубинным нивелирным пунктом на базе наблюдательной скважины 304-Н с глубиной закладки 3235 м в паре с контрольным грунтовым нивелирным пунктом и была предназначена для мониторинга и оценки техногенных оседаний земной поверхности в центре Ямбургского купольного поднятия и депрессионной воронки, вызванной пластовым проседанием в неокомских залежах;

3. Контрольная площадка №9 – оборудована исходным глубинным нивелирным пунктом на базе разведочной скважины 105 находящейся в консервации с глубиной закладки 3304 м в паре с контрольным глубинным нивелирным пунктом и была предназначена для мониторинга и оценки техногенных оседаний земной поверхности в центре депрессионной воронки, получившей развитие в результате пластового проседания неокомских залежей;

4. Контрольная площадка №13 – оборудована исходным глубинным нивелирным пунктом на базе наблюдательной скважины 1080 с глубиной закладки 1300 м в паре с контрольным грунтовым нивелирным пунктом и была предназначена для мониторинга и оценки техногенных проседаний земной поверхности в районе максимального расчетного пластового оседания и аномального подъема ГВК в сеноманских залежах;

5. Контрольная площадка №15 – оборудована исходным глубинным нивелирным пунктом на базе законсервированной разведочной скважины 145 с глубиной закладки 3363 м в паре с контрольным грунтовым нивелирным пунктом и была предназначена для мониторинга и оценки техногенных проседаний земной поверхности на юге депрессионной воронки старого добычного «объекта» по неокомским залежам в районе начала интенсивной добычи на «новых» кустах, а также в районе развития потоковой фации высокопроницаемых песчаников в неокомских залежах.

6. Контрольная площадка №18 – оборудована исходным глубинным нивелирным пунктом на базе разведочной скважины Р-31 находящейся в консервации с глубиной закладки 1252 м в паре с контрольным грунтовым нивелирным пунктом и была предназначена для мониторинга и оценки локальных проседаний в районе длительно работающих кустов на севере Харвутинского участка.

7. Контрольная площадка №19 - оборудована исходным глубинным нивелирным пунктом на базе наблюдательной скважины 9223 эксплуатационного куста с глубиной закладки 1265 м в паре с контрольным грунтовым нивелирным

пунктом и была предназначена для мониторинга и оценки техногенных проседаний на восточном фланге контура разработки Харвутинского участка.

8. Контрольная площадка №21 – оборудована исходным глубинным нивелирным пунктом на базе разведочной скважины Р-26 находящейся в консервации с глубиной закладки 1270 м в паре с контрольным грунтовым нивелирным пунктом в районе западного фланга Харвутинского вала на борту Ямбургского разлома в пределах границы возможных проявлений мульд оседаний и была предназначена для мониторинга техногенных проседаний.

Для раздельной оценки деформаций коллекторов сеноманской и неокомской залежей оборудовано три профильных линии (ПЛ), а именно:

1. Профильная линия ПЛ №6 - оборудована двумя парами нивелирных пунктов, удаленных на расстояние 1,4 км друг от друга. Первая пара была представлена исходным глубинным нивелирным пунктом, оборудованном на базе разведочной скважины 125 находившейся в консервации с глубиной закладки 3310 м ниже коллектора сеноманской залежи, и контрольным глубинным нивелирным пунктом. Вторая пара была оборудована контрольным глубинным репером на базе наблюдательной скважины 4160 эксплуатационного куста с глубиной закладки 1301 м над коллектором сеноманской залежи и контрольным грунтовым нивелирным пунктом.

Данная профильная линия была предназначена для:

- контроля и оценки суммарной деформации коллекторов сеноманской и неокомской залежей по результатам повторного высокоточного нивелирования опорного глубинного и контрольного грунтового нивелирного пункта;

- раздельного контроля и раздельной оценки деформации коллектора неокомской залежи по результатам повторного высокоточного нивелирования опорного глубинного нивелирного пункта (совместно с контрольным грунтовым нивелирным пунктом) и контрольного глубинного нивелирного пункта (совместно с контрольным грунтовым нивелирным пунктом). При этом выполнялось повторное нивелирование I класса вдоль профильной линии, длиной 1,4 км.

2. Профильная линия ПЛ №7 оборудована двумя парами нивелирных пунктов, которые удалены друг от друга на расстояние 1,8 км. На базе поисковой скважины П-1 находившейся в консервации был оборудован исходный глубинный нивелирный пункт с глубиной закладки 3170 м ниже коллектора сеноманской залежи, а на базе наблюдательной скважины 3140 эксплуатационного куста был оборудован контрольный глубинный нивелирный пункт с глубиной закладки 1301 м над коллектором сеноманской залежи. Каждый глубинный нивелирный пункт спарен с контрольным грунтовым нивелирным пунктом. Назначение данной контрольной площадки аналогично назначению ПЛ №6, как и методика мониторинга деформаций коллекторов сеноманской и неокомской залежей.

3. Профильная линия ПЛ №10 оборудована, как и контрольные площадки ПЛ №6 и ПЛ №7, двумя парами нивелирных пунктов, удаленных друг от друга на расстояние 1,8 км. Первая пара была представлена исходным глубинным нивелирным пунктом, оборудованном на базе разведочной скважины 101 находившейся в консервации с глубиной закладки 3080 м ниже коллектора сеноманской залежи, и контрольным грунтовым нивелирным пунктом. Вторая пара была оборудована контрольным глубинным нивелирным пунктом на базе наблюдательной скважины 57-Н эксплуатационного куста с глубиной закладки 1308 м над коллектором сеноманской залежи и контрольным грунтовым нивелирным пунктом.

Для оценки кинематических характеристик глубинных природных геодинамических процессов на Ямбургском ГДП было заложено четыре геодинамических профиля (ГП) [18]:

1. Геодинамический профиль ГП №1 – оборудован двумя исходными глубинными нивелирными пунктами, спаренными с контрольными грунтовыми нивелирными пунктами, расположенными по бортам субширотного разрыва Анарьяхинской площади, удаленными друг от друга на расстоянии 2,3 км;

2. Геодинамический профиль ГП №5 – был оснащен двумя исходными глубинными нивелирными пунктами, спаренными с контрольными грунтовыми

нивелирными пунктами, заложенными на расстояние 3,4 км друг от друга с целью контроля зоны предполагаемого субширотного «северного разлома»;

3. Геодинамический профиль ГП №12 – оборудован на базе разведочных скважин 109 и 142, находившихся в консервации, двумя исходными глубинными нивелирными пунктами, спаренными с контрольными грунтовыми нивелирными пунктами тип 150, заглубленными в вечную мерзлоту на глубину z , рассчитанную по формуле (4.1) [32, 33]. Спаренные нивелирные пункты заложены на бортах субмеридиального разрыва для установления наличия и выявления характера тектонических движений в зоне субмеридиального разрыва по сеноманской залежи. между исходными глубинными нивелирными пунктами 109 и 142 был проложен геодинамический профиль №12 длиной 6,3 км, который через 500-1000 м закреплен семью дополнительными грунтовыми контрольными нивелирными пунктами тип 150.

4. Геодинамический профиль ГП №17 – оборудован на базе разведочной скважины 140 находившейся в консервации и наблюдательной скважины 8141 эксплуатационного куста двумя исходными глубинными нивелирными пунктами, спаренными с контрольными грунтовыми нивелирными пунктами, располагавшимися по бортам тектонических разрывов на удалении 4,2 км одной пары относительно другой.

Линии повторного нивелирования ПЛ и ГП были разбиты на нивелирные секции, протяженность которых составляет 500 – 1000 м. При этом протяженность линий нивелирования (таблица 4.2) регламентировалась в соответствии с аналитическим выражением (2.17) с учетом прогнозных значений скоростей аномальных деформаций в зонах разломов (тектонических разрывов) 10 мм/год [51, 113, 114] и скоростей сдвижения и деформации коллекторов 5 мм/год [13, 18, 49].

Промежуток времени между циклами повторного нивелирования, а также точность нивелирования для профильных линий устанавливались в соответствии с их длиной и данными, приведенными в таблице 4.1.

Таблица 4.2 – Значения предельно допустимых длин линий повторного нивелирования Ямбургского ГДП

Класс повторного нивелирования	Нормативное [43] значение СКО нивелирования M , мм/км	Периодичность повторного нивелирования T , год	Предельная длина, км	
			Профильная линия, $v_{прогн} = 5$ мм/год	Геодинамический профиль, $v_{прогн} = 10$ мм/год
I	0,8	1	1,2	4,8
I	0,8	2	4,8	19,3
II	2,0	1	0,2	0,8
II	2,0	2	0,8	3,1

Устойчивость нивелирных пунктов к воздействиям природных экзогенных процессов в пределах, регламентируемых неравенством (3.3), достигается научно обоснованным подходом к выбору конструкций и глубин закладки ($z \geq 10$ м) нивелирных пунктов, устойчивых к морозному пучению в условиях вечномёрзлых грунтов. При этом учет тепловых деформаций нивелирных знаков, вызывающих вертикальные смещения нивелирных знаков на протяжении года δH_t в диапазоне от -0,4 до +0,5 мм, были учтены по методике, приведенной в разделе 3.2 диссертации, по данным термометрических измерений в скважинах нивелирных пунктов, выполненных термокосой ТК 1.15.13.

В 2015, 2016, и 2017 гг. в системах наблюдений Ямбургского ГДП выполнено повторное нивелирование I класса с периодичностью $T = 1$ год [18].

Нивелирование в системах наблюдений выполнялось ежегодно в октябрь-ноябре с применением цифрового нивелира Trimble DiNi 0.3 и кодовых инварных реек LD в строгом соответствии с программой нивелирования I класса [43].

Анализ результатов повторного нивелирования показал, что они являются равноточными, а ряды их погрешностей подчиняются нормальному распределению [18, 79]. При этом точность выполненного на Ямбургском ГДП повторного нивелирования характеризуется следующими средними квадратическими ошибками [18, 79]: на контрольных площадках $m_{ст} \leq 0,1$ мм; на профильных линиях $M_{км} \leq 0,18$ мм/км; на геодинамических профилях $M_{км} \leq 0,55$ мм/км. Оценка

качества нивелирования в каждом цикле выполнена на основе вычисленных разностей превышений $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6$, согласно методике, изложенной в руководстве [61]. При этом для линий ПЛ и ГП установлены накопления разностей d_1, d_2, d_5 , не превышающие величину 0,04 мм/км, а накопления разностей d_3, d_4, d_6 составили не более 0,08 мм/км, что свидетельствует об отсутствии пучения костылей в процессе нивелирования, выполненного в осенне-зимний период в условиях тундры [28].

В соответствии с полученными точностными характеристиками повторного нивелирования на основании разработанной формулы (3.16) для Ямбургского ГДП установлены минимальные величины значимых скоростей ВСЗП и СВДЗК (таблица 4.3), которые достоверно определяются по результатам повторного нивелирования I класса, выполненного в циклах с периодичностью 1 и 2 года [18].

Таблица 4.3 – Величины значимых скоростей ВСЗП и СВДЗК, полученных по прогнозным и экспериментальным данным о точности нивелирования в циклах

T, год	Прогнозные величины значимых скоростей v , мм/год						
	Полученные в циклах повторного нивелирования величины значимых скоростей, мм/год						
	Контрольные площадки	Профильные линии	Геодинамические профили				
			Длины линий нивелирования L, км				
	n = 1	1,4 км	2,4 км	2,5 км	5,8 км	6,4 км	6,8 км
1	$\frac{0,6}{0,6}$	$\frac{5,4}{1,2}$	$\frac{7,1}{1,6}$	$\frac{7,3}{5,0}$	$\frac{11,1}{7,7}$	$\frac{11,6}{8,1}$	$\frac{12,0}{8,3}$
	Второй цикл повторного нивелирования исключен из обработки						
2	$\frac{0,3}{0,3}$	$\frac{2,7}{0,6}$	$\frac{3,5}{0,8}$	$\frac{3,6}{2,5}$	$\frac{5,5}{3,8}$	$\frac{5,8}{4,0}$	$\frac{6,0}{4,2}$

Второй цикл повторного нивелирования исключен из материалов изучения ВСЗП и СВДЗК по причине превышения допустимых для применения цифрового нивелира DiNi 03 отрицательных температур в атмосфере $t_{\text{возд}} \geq -20^\circ\text{C}$ в процессе нивелирования [79, 82].

Основываясь на критериях значимости, приведенных в таблице 4.3, выполнен отбор значимых величин скоростей сдвижений земной поверхности, полученных по результатам повторного нивелирования I класса, выполненного с

периодичностью 2 года на контрольных площадках и профильных линиях Ямбургского ГДП и составлена схема (рисунок 4.1) вертикальных сдвижений земной поверхности [18].



Рисунок 4.1 – Схема скоростей вертикальных сдвижений земной поверхности на Ямбургском ГДП за период 2015-2017 гг.

Из схемы [24] видно, что площади значимых сдвижений (оседаний) земной поверхности, характеризующиеся скоростями от -0,4 до -3,6 мм/год, приурочены к контурам максимальных эксплуатационных запасов по нижнемеловым залежам и Анерьяхинской площади [28].

На одном из четырех ГП только по результатам повторного нивелирования ГП №17, выполненного в 1-ом и 3-ем циклах, установлены значимые отрицательные вертикальные смещения (рисунок 4.2) для контрольных нивелирных пунктов, расположенных в зонах тектонических разрывов северо-восточного и субмеридиального простирания [18]. Контрольные нивелирные пункты, расположенные в зонах тектонических нарушений, смещаются со скоростями $v_{\text{зн}} > 6$ мм/год относительно нивелирных пунктов, расположенных на

бортах тектонических нарушений и сохраняющих стабильность на протяжении 2015-2017 гг. в пределах $\delta H \leq 0,4 \text{ мм}$ [18].



Рисунок 4.2 – График вертикальных смещений нивелирных пунктов ГП 17 за период 2015-2017 гг.

Интерпретация полученных на геодинамическом профиле ГП №17 результатов повторного нивелирования и установления причин проявления и взаимосвязи вертикальных смещений нивелирных пунктов с природными современными геодинамическими и техногенными геомеханическими процессами выходит за рамки диссертационных исследований и является предметом дальнейших комплексных исследований, выполняемых на Ямбургском ГДП.

Выводы по главе 4

В рамках реализации научно-технических разработок диссертанта на Ямбургском НГКМ установлено следующее:

- разработки, предложения и исследования, выполненные диссертантом, позволили создать научно-техническую базу для постановки повторного нивелирования на геодинамических полигонах разрабатываемых месторождений углеводородов, обеспеченную арсеналом экспериментально проверенных методов, способов и средств;

- разработанные в диссертации и реализованные в промышленных условиях Ямбургского НГКМ методы создания систем отдельных геодезических наблюдений за техногенными геомеханическими и геодинамическими процессами

позволили по значимым результатам повторного нивелирования (2015-2017 гг.) составить карту техногенных деформаций земной поверхности на территории исследуемого месторождения;

– экономическая эффективность от внедрения научно-технических разработок диссертанта на ГДП Ямбургского НГКМ достигается снижением объемов и стоимости маркшейдерско-геодезических работ при построении геодезических наблюдательных систем [44] и проведении повторного нивелирования I класса в 3-х циклах наблюдений, составила 46084 тыс. руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов проведенных исследований в диссертационной работе в рамках фундаментальной научной проблемы изучения современных движений земной поверхности решена важная научно-практическая задача создания научно-обоснованной базы для повторных геодезических наблюдений, выполняемых на ГДП НГМ с целью раздельного определения пространственно-временных параметров современной геодинамики, сдвижений земной поверхности, деформаций пластов-коллекторов и горных массивов, залегающих над залежью с реальными оценками точности и достоверности метода их получения, предусматривающего исключения из результатов повторного нивелирования составляющих, не имеющих отношение к количественным характеристикам изучаемых эндогенных и экзогенных процессов.

Основные научно-практические результаты диссертационных исследований заключаются в следующем:

1. Проведенный анализ современного состояния геодезических методов изучения геодинамических и техногенных геомеханических процессов позволил установить тот факт, что существующий нормативно-детерминистический подход к установке повторных геодезических наблюдений на ГДП НГМ, их методика и содержание требуют пересмотра. Установлено, что главной научной задачей геодезических исследований на ГДП наряду с обеспечением точности и достоверности результатов повторных наблюдений, является разделение суммарных смещений геодезических пунктов, зафиксированных в результатах повторных геодезических наблюдений, на разные генетические составляющие с оценкой их релевантности и репрезентативности.

2. Разработаны теоретические основы постановки повторного нивелирования на ГДП НГМ, позволяющие научно обоснованно подходить к назначению требований в отношении к таким структурным элементам повторного нивелирования, как длины линий нивелирования, выбор мест закладки исходных, исходных и контрольных нивелирных пунктов и способ их закрепления, периодичность повторного нивелирования и его продолжительность в циклах,

значимость результатов повторного нивелирования и устойчивость нивелирных пунктов к побочным геомеханическим процессам, не имеющим отношения к изучаемым.

3. Выполнено физико-математическое моделирование влияний приповерхностного геотемпературного поля на устойчивость нивелирных пунктов, на основе которых разработан алгоритм для прогноза и учета дестабилизации нивелирных знаков, обусловленных тепловыми деформациями их конструктивных элементов и горных пород, составляющих основания нивелирных пунктов.

4. Разработан способ учета тепловых деформаций глубинных нивелирных пунктов по результатам измерения значений интегральной температуры их конструктивных элементов.

5. Представлены результаты исследования механизма воздействия морозного пучения на нивелирные пункты в условиях сезонного промерзания грунтов и вечной мерзлоты, на основе которых разработан алгоритм для расчета конструктивных элементов и глубин закладки нивелирных устойчивых к морозному пучению [29].

6. Разработан алгоритм для аналитического интерполирования скоростей современных вертикальных движений земной коры, применительно к месту закладки исходных нивелирных исходных нивелирных пунктов ГДП.

7. Разработки, предложения и выполненные в диссертации исследования позволили создать научно обоснованную базу для организации геодинамического полигона на крупнейшем в мире Ямбургском нефтегазоконденсатном месторождении. Результаты внедрения опубликованы в журнале «Маркшейдерский вестник» и известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка», включенных в перечень ведущих изданий ВАК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин, В.В. Техногенные процессы в земной коре (опасности и катастрофы) / В.В. Адушкин, С.Б. Турунтаев. – М.: ИНЭК, 2005. – 252 с.
2. Баленко, В.Г. Исследование наклонов земной поверхности по профилю Киев- Артемовск / В.Г. Баленко. – Киев: Наук.думка, 1980. – 176 с.
3. Белоусов, В.В. Основы геотектоники / В.В. Белоусов. – М.: Недра, 1975. – 308 с.
4. Благоволин, Н.С. О соотношении эндогенных и экзогенных процессов / Н.С. Благоволин, С.К. Горелов, Г.Н. Пшенин и др. // Современные движения земной коры (исследования на геодинамических полигонах). – Новосибирск: Наука, 1978. – С. 108-114.
5. Богданов, Б.Г. Закладка геодезических центров в районах многолетней мерзлоты / Б.Г. Богданов. – М.: Недра, 1990. – 159 с. :ил.
6. Большаков, В.Д. Справочное руководство по инженерно-геодезическим работам / В.Д. Большаков, Г.П. Левчук, В.Е. Новак и др. – М.: Недра, 1980. – 781 с.
7. Бондарик, Г.К. Основы теории изменчивости инженерно-геологических свойств горных пород / Г.К. Бондарик. – М.: Недра, 1971. – 271 с.
8. Брайт, П.И. Геодезические методы измерения деформаций оснований и сооружений / П.И. Брайт. – М.: Недра, 1965. – 298 с.
9. Брыкин, П.А. Эффективность и качество топографо-геодезического производства / П.А. Брыкин, В.Н. Нейман. – М.: Недра, 1983. – 176 с.
10. Буланже, Ю.Д. К вопросу об исследованиях современных движений земной коры / Ю.Д. Буланже // Современные движения земной коры: морфоструктура, разломы, сейсмичность. – М.: Наука, 1987. – С. 6-9.
11. Васильев, Ю.В. Анализ и интерпретация результатов маркшейдерско-геодезических измерений на Губкинском геодинамическом полигоне / Ю.В. Васильев, Д.П. Иноземцев, Д.А. Мирзоев, И.М. Долганов, А.В. Филатов // Маркшейдерия и недропользование. – 2018. – № 1. – С. 58-67.

12. Вереда, В.С. Некоторые результаты изучения современных тектонических движений в Донецком бассейне / В.С. Вереда, Ф.М. Урманцев, Б.К. Юрченко, В.А. Филькин // Современные движения земной коры на геодинамических полигонах. – Ташкент: ФАН, 1972. – С. 35-40.
13. Вершинина, Ю.В. Геодезическое обеспечение мониторинговых наблюдений за деформационными процессами на геодинамических полигонах нефтегазовых месторождений / Ю.В. Вершинина // автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Санкт-Петербург: 2016. – 20 с.
14. Виглеб, Г. Датчики / Г. Виглеб. – М.: Мир, 1989. – 195 с.
15. Волков, В.И. Влияние устойчивости нивелирных знаков на измерение СВДЗК геодезическими методами / В.И. Волков // Геодезические методы контроля качества строительства. – Самара: САСИ, 1992. – С. 27-36.
16. Волков, В.И. Из опыта создания высотной опорной основы для наблюдений за деформациями зданий и сооружений крупных энергетических объектов / В.И. Волков. – М.:Деп. ОНТИ ЦНИИГАиК, 1987. – №259-ГД. – 12 с.
17. Волков, В.И. К вопросу о вычислении прогнозных скоростей техногенных смещений земной поверхности на геодинамических полигонах нефтегазовых месторождений / В.И. Волков, Н.В. Волков, Ю.В. Вершинина // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, 2018. – № 8. С. 109-112.
18. Волков, В.И. Новый подход к применению маркшейдерско-геодезических наблюдений для контроля техногенных последствий разработки нефтегазовых месторождений / В.И. Волков, Н.В. Волков, О.В. Волков // Маркшейдерский вестник. – 2018. – №3. – С. 45-50.
19. Волков, В.И. О влиянии транспирационной деятельности лесных массивов на результаты повторного нивелирования. / В.И. Волков, Т.М. Березина // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2002. – №2. – С. 25-32.
20. Волков, В.И. О Геодинамических аспектах использования государственной высотной основы при градостроительном и промышленном освоении

- территорий / В.И. Волков, Н.В. Волков // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – №4. – С. 239-242.
21. Волков, В.И. О роли геодезических исследований современной техногенной геодинамики в природоохранных мероприятиях / В.И. Волков // Научные труды ВГАУ. – Воронеж: Изд-во ВГАУ, 1991. – С. 105-109.
 22. Волков, В.И. Об оценке влияния метеорологических факторов на современные движения земной поверхности / В.И. Волков // Современные движения и деформации земной коры на геодинамических полигонах. – М.: Наука, 1983. – С. 150-152.
 23. Волков, В.И. Особенности геодезического контроля за вертикальными деформациями строящегося сооружения / В.И. Волков, Т.Н. Волкова, Н.В. Волков // Науки о Земле: вчера, сегодня, завтра: материалы IV Междунар. науч. конф. (г. Казань, май 2018 г.). – Казань: Молодой ученый, 2018. – С. 9-11.
 24. Волков, В.И. Применение повторных геодезических наблюдений для контроля техногенных последствий разработки нефтегазовых месторождений на основе программно-целевого подхода / В.И. Волков, Н.В. Волков, О.В. Волков // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2018. – №4. – С. 375-382.
 25. Волков, В.И. Программно-целевой подход к постановке наблюдений за современными движениями земной поверхности на нефтегазовых месторождениях / В.И. Волков, Т.Н. Волкова, Ю.В. Вершинина // Маркшейдерский вестник. – 2013. – №1. – С. 45 – 48.
 26. Волков, В.И. Результаты комплексного изучения природы вертикальных движений, регистрируемых повторным нивелированием, и их использование в геодинамических исследованиях / В.И. Волков // Тезисы докладов XI Международного симпозиума КАПГ по изучению СДЗК. – Воронеж: Наука, 1988. – С. 70-72.
 27. Волков, В.И. Современная постановка проблемы влияния нетектонических факторов на результаты геодезических исследований современных

- вертикальных движений земной коры / В.И. Волков // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1998. – №3. – С. 17-25.
28. Волков, В.И. Условия эффективного применения геодезических методов на геодинамических полигонах нефтегазовых месторождений / В.И. Волков, Н.В. Волков // Маркшейдерский вестник. – 2018. – №2. – С. 21-25.
 29. Волков, Н.В. О размещении, выборе конструкций и глубины заложений нивелирных пунктов на геодинамических полигонах нефтегазовых месторождений / Н.В. Волков // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2017. – №5. – С. 54-59.
 30. Волков, Н.В. Оценка влияния геотемпературного поля на результаты повторного нивелирования / Н.В. Волков // Маркшейдерский вестник. – 2017. – №1. – С. 29-32.
 31. Волков, О.В. О времени затухания осадок грунтовых нивелирных знаков / О.В. Волков, В.И. Гужилин // Геодезические работы в строительстве. – Куйбышев: Куйбышевский госуниверситет, 1988. – С. 10-15.
 32. Волков, О.В. О конструкции пункта маркшейдерской опорной сети для условий заболоченной тундры Крайнего Севера / О.В. Волков // Маркшейдерский вестник. – 2015. – №4. – С. 24-27.
 33. Волков, О.В. О новой конструкции пункта маркшейдерской опорной сети для условий заболоченной тундры и Крайнего Севера / О.В. Волков, А.В. Меркулов, С.Э. Никифоров // Маркшейдерский вестник. – 2015. – №4. – С. 24- 27.
 34. Выскочил, П. Состояние и результаты изучения современных движений земной коры на геодинамических полигонах в различных странах мира. / П. Выскочил // Современные движения земной коры. Теория, методы, прогноз. – М.: Наука, 1980. – С. 7-13.
 35. Геодезические методы изучения деформаций земной коры на геодинамических полигонах. Методическое руководство. – М.: ЦНИИГАиК, 1985. – 112 с.

36. Вертикальные движения юга Приморского края и их связь с геодинамическими процессами в зоне субдукции / М.Д. Герасименко, Н.В. Шестаков, А.Г. Коломиец, Г.Н. Герасимов, Х. Такахаси, Д.В. Сысоев, Г.В. Нечаев // Геодезия и картография. – 2016. – № 3. – С. 30–34.
37. Горно-геологическое обоснование создания геодинамического на Ямбургском нефтегазоконденсатном месторождении / ООО «Горные технологии». – М.: Горные технологии, 2011. – 194 с.
38. Грунин, А.Г. Особенности проектирования геодинамических полигонов на подземных хранилищах газа / А.Г. Грунин, С.С. Квятковская, Ю.О. Кузьмин, А.И. Никонов, А.Л. Тюрин // Современная геодинамика недр и эколого-промышленная безопасность объектов нефтегазового комплекса. – М.: ООО ТиРу, 2013. – С. 49-62.
39. Грунин, А.Г. Практические аспекты проектирования геодинамических полигонов на месторождениях углеводородного сырья / А.Г. Грунин // Современная геодинамика недр и эколого-промышленная безопасность объектов нефтегазового комплекса. – М.: ООО ТиРу, 2013. – С. 42-48.
40. Групповой рабочий проект №001-00-ЭБ на строительство эксплуатационных скважин на сеноманских отложениях Заполярного ГКМ. Отчет о НИР / С.Г. Ашихмин, Ю.В. Васильев, Ю.А. Кашников и др. – Тюмень: ТюменНИИгипрогаз, 2007. – 104 с.
41. Дейнега, Г.И. Характер вертикальных движений земной поверхности и деформационных процессов в связи с режимом эксплуатации Чиркейского водохранилища / Г.И. Дейнега // Тезисы XI Международного симпозиума КАПГ по СДЗК. – Воронеж: Изд-во АН СССР, 1988 – С.70-72.
42. Жидков, А.А. Исследование влияния природных и техногенных факторов на стабильность знаков геодезической основы прецизионных сооружений на примере ускорителей заряженных частиц / А.А. Жидков // автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. – М.: 1977. – 20 с.
43. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. Федеральная служба геодезии и картографии России: [ГКИНП (ГНТА)-03-010-02: введ. 1.02.2004].

- М.: Картгеоцентр-Геодезиздат, 2004. – 244 с.
44. Инструкция по производству маркшейдерских работ: [РД 07-603-03: введ. 29.06.2003]. – М.: ГУП «НТЦ «Промышленная безопасность», 2003. – 120 с.
 45. Исследование устойчивости реперов и совершенствование геодезических методов определения деформаций сооружений Воронежской атомной станции теплоснабжения (ВАСТ) с учетом инженерно-геологических условий промплощадки. Отчет о НИР № 01.86.0051689 / В.И. Волков, А.С. Пастушков, Е.М. Севергин. – Воронеж: ВСХИ, 1989. – 117 с.
 46. Каленецкий, А.И. О комплексной интерпретации данных геодезическо-гравиметрического мониторинга техногенной геодинамики на месторождениях нефти и газа / А.И. Каленецкий, Э.Л. Ким // Вестник СГГА. – 2015. - №4(20). – С. 3-13.
 47. Кафтан, В.И. Геодезические методы решения геодинамических задач (Современные движения земной коры). Итоги науки и техники. Сер. Геодезия и аэросъемка. Т.28. / В.И. Кафтан, Л.И. Серебрякова. – М.: ВИНТИ АН СССР, 1990. – 150 с.
 48. Кашин, Л.А. О программе астрономо-геодезических и гравиметрических работ на геодинамических полигонах / Л.А. Кашин // Современные движения земной коры. – Тарту: Изд-во АН СССР, 1973. – С. 341-346.
 49. Кашников, Ю.А. Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья / Ю.А. Кашников, С.Г. Ашихмин. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2007. – 467 с. :ил.
 50. Колмогоров, В.Г. Современная геодинамика Сибири по результатам геодезических и геолого-геофизических исследований [Текст]: монография / В.Г. Колмогоров. – Новосибирск: СГГА, 2013. – 236 с.
 51. Кузьмин, Ю.О. Геодинамический мониторинг объектов нефтегазового комплекса / Ю.О. Кузьмин, А.И. Никонов // Фундаментальный базис новых технологий нефтяной и газовой промышленности. Выпуск 2. – М.: ГЕОС, 2002. – С. 427-433.
 52. Кузьмин, Ю.О. Современная аномальная геодинамика недр, индуцированная

- разработкой месторождений нефти и газа / Ю.О. Кузьмин // Фундаментальный базис новых технологий нефтяной и газовой промышленности. Выпуск 2. – М.: ГЕОС, 2002. – С. 418-427.
53. Кузьмин, Ю.О. Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании / Ю.О. Кузьмин. – М.: Агентство экономических новостей, 1999. – 220 с.
 54. Латынина, Л.А. Деформографические измерения / Л.А. Латынина, Р.М. Кармалеева. – М.: Наука, 1978. – 156 с.
 55. Лилиенберг, Д.А. Блоковая дифференциация современных тектонических движений и интенсивность добычи нефти и газа на Апшеронском геодинамическом полигоне / Д.А. Лилиенберг, О.Д. Гусейнзаде, В.Р. Ященко // Современные движения и деформации земной коры на геодинамических полигонах. – М.: Наука, 1983. – С.117-119.
 56. Ломтадзе, В.Д. Инженерная геология / В.Д. Ломтадзе. – Л.: Недра, 1977. – 471 с.
 57. Мазуров, Б.Т. Структурное моделирование полученных по геодезическим данным сдвижений путем визуализации / Б.Т. Мазуров, А.А. Панжин, А.А. Силаева // Геодезия и картография. – 2016. – № 3. – С. 35–40.
 58. Михелев, Д.Ш. Геодезические измерения при изучении деформаций крупных инженерных сооружений / Д.Ш. Михелев, И.В. Рунов, А.И. Голубцов. М.: Недра, 1977. – 152 с.
 59. Мори, В. Механика горных пород, применительно к проблемам разведки и добычи нефти / В. Мори, Д. Фурментро // М.: Мир, 1994. – 416 с.: ил.
 60. Национальный атлас России. Т.2: Природа. Экология / Отв. ред. Г.Ф. Кравченко. – М.: ФГУП "ГОСГИСЦЕНТР", 2004. – 495 с.
 61. Нивелирование I и II классов (практическое руководство) / Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР. – М.: Недра, 1982. – 264 с.
 62. Никифоров, С.Э. Современное состояние вопроса проектирования наблюдательных станций (геодинамических полигонов) / С.Э. Никифоров //

- Маркшейдерский вестник. – 2012. – № 4. – С. 21-31.
63. О геодезии, картографии и пространственных данных и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: [федер. закон: принят Гос. Думой 22 декабря 2015 г.: по состоянию на 30 дек. 2015 г.] // Российская газета. – 2016. – 11 января.
 64. О недрах: [федер. закон: принят Гос. Думой 21 февраля 1992 г.: по состоянию на 13 июля 2015 г.] // Российская газета. – 1992. – 5 мая.
 65. О результатах стационарных геолого-динамических исследований в пределах планшетов L-36-IV и M-36-XXXIV: отчет о НИР / А.И. Денисов, А.Г. Бондарук, П.Е. Курочкин – Кривой Рог: Геологоразведочная экспедиция «Кривбассгеология», 1975. – 205 с.
 66. Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности» (с изменениями на 12 января 2015 года): [Приказ Ростехнадзора № 101 от 12.03.2013 [Электронный ресурс]]. – Режим доступа: <http://www.gosnadzor.ru/industrial/oil/acts/Серия%2008%20Выпуск%2019.pdf>.
 67. Об утверждении положения о геологическом и маркшейдерском обеспечении промышленной безопасности и охраны недр: [Постановление Госгортехнадзора России № 18 от 22.05.2001 [Электронный ресурс]]. – Режим доступа: <http://enis.gosnadzor.ru/activity/control/geology/ПД%2007-408-01.pdf>
 68. Орлов, В.О. Криогенное пучение тонкодисперсных грунтов / В.О. Орлов. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 187 с.
 69. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах: СП 25.13330.2012. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88. – Введ 2013 – 01 – 01. – М.: ФАУ «ФЦС». – 2012. – 117 с.
 70. Остапчук, А.А. Режимы межблокового скольжения: условия формирования и трансформации: дис. ...канд. физ.-мат. наук: 25.00.10 / А.А. Остапчук. – М.: 2016. – 135 с.
 71. Остач, О.М. О развитии геодезических работ на геодинамических полигонах

- / О.М. Остач // Геодезия и картография. – 1983. – №1. – С. 19-22.
72. Певнев, А.К. Гидротермические движения земной поверхности и их влияние на выводы о современных движениях земной коры / А.К. Певнев // Современные движения земной коры. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – С. 373-379.
 73. Пеллинен, Л.П. Высшая геодезия (Теоретическая геодезия) / Л.П. Пеллинен. – М.: Недра, 1978. – 264 с.
 74. Положение о геологическом и маркшейдерском обеспечении промышленной безопасности и охраны недр: [РД 07-408-01: введ. 01.07.2001]. – М.: ГУП «НТЦ «Промышленная безопасность», 2001. – 14 с.
 75. Положение о порядке выдачи разрешений на застройку площадей залегания полезных ископаемых: [РД 07-309-99: введ. 01.11.1999]. – М.: ГУП «НТЦ «Промышленная безопасность», 1999. – 26 с.
 76. Правила закладки центров и реперов на пунктах геодезической и нивелирной сети. – М.: Картгеоцентр-Геодезиздат, 1993. – 104 с.: ил.
 77. Проблемы изучения современных движений земной коры / П.В. Павлив, Т.В. Радьо, Г.Т. Собакарь, В.И. Сомов; Отв. ред. Г.Т. Собакарь; АН СССР, ин-т геофизики. – Киев: Наук. думка, 1977. – 168 с.: ил.
 78. Проектные разработки, авторское сопровождение проектов, создание и сопровождение геолого-технологических моделей месторождений ООО «Ямбрггаздобыча»: отчет о НИР № 265/2005 / С.Г. Ахимшин, Ю.В. Васильев, С.Г. Гладышев и др. – Тюмень: ТюменНИИгипрогаз, 2007. – 104 с.
 79. Результаты анализа качества и интерпретации материалов маркшейдерско-геодезических наблюдений, полученных при проведении на Ямбургском геодинамическом полигоне: Отчет о НИР / В.И. Волков, Н.В. Волков, Т.Н. Волкова, Ю.В. Вершинина. – Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2017. – 115 с.
 80. Рекомендации по геодезическим работам на геодинамических полигонах. М.: ОНТИ ЦНИИГАиК, 1975. – 55 с.
 81. Ржевский, В.В. Основы физики горных пород / В.В. Ржевский. – М.: Недра, 1973. – 235 с.

82. Руководство пользователя. Цифровой нивелир Trimble DiNi. – Sunnyvale: Trimble Navigation Limited, 2006. – 170 с.
83. Руководящий технический материал по проведению геодезических работ при изучении влияния техногенных процессов на деформацию земной поверхности. – М.: ЦНИИГАиК, 1978. – 23 с.
84. Сазонов, Г.Н. Исследование инженерно-геологических процессов, возникающих при проходке горных выработок Московского метрополитена с целью прогноза этих процессов / Г.Н. Сазонов // автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. геолого-минералогических наук. – М.: ВСЕГИНГЕО, 1977. – 24 с.
85. Свайные фундаменты: СП 24.13330.2011. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85. – Введ. 2011-05-20. – М.: ОАО «ЦПП». – 2011. – 85 с.
86. Селюков, Е.И. О влиянии геодинамических факторов на устойчивость высотных знаков / Е.И. Селюков // Особенности высокоточного нивелирования на геодинамических полигонах. – Таллин: Изд-во АН СССР, 1988. – С. 44-45.
87. Серебрякова, Л.И. О методическом руководстве по геодинамическим исследованиям в системе Росреестра / Л.И. Серебрякова // Геодезия и картография. – 2013. – № 10. – С. 45-50.
88. Серпухов, В.И. Курс общей геологии / В.И. Серпухов, Т.В. Билибина, А.И. Шалимов. – Л.: Недра, 1976. – 535 с.
89. Сидоров, В.А. Концепция «Геодинамическая безопасность освоения углеводородного потенциала недр России» / В.А. Сидоров, Ю.О. Кузьмин, А.М. Хитров. – М.: Изд-во ИГиРГИ, 2000. – 56 с.
90. Сильдвээ, Х.Х. Некоторые результаты интерпретации современных движений земной коры в Эстонии / Х.Х. Сильдвээ, А.А. Мийдел // Современные движения земной коры (исследования на геодинамических полигонах). – М.: Наука, 1988. – С. 138-143.
91. Сорочан, Е.А. Строительство сооружений на набухающих грунтах / Е.А. Сорочан; 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1989. – 312 с.

92. Строительная климатология. СП 131.13330.2012. – Введ. 2013-01-01. – М.: Минрегион России. – 2013. – 115 с.
93. Успенский, М.С. Вертикальные смещения земной поверхности под действием некоторых процессов нетектонического характера / М.С. Успенский // Современные движения земной коры. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – С. 145–148.
94. Успенский, М.С. Исследования по закреплению геодезических пунктов на территории СССР / М.С. Успенский // Труды ЦНИИГАиК. Вып. 167. – М.: Недра, 1966. – 190 с.
95. Успенский, М.С. Условия устойчивости геодезических центров и реперов / М.С. Успенский. – М.: Геодезиздат, 1955. – 92 с.
96. Фролов, Н.М. Гидрогеотермия / Н.М. Фролов. – М.: Недра, 1976. – 280 с.
97. Хоменков, Н. Цифровой термометр / Н.И. Хоменков, Н.Н. Зверев // Радио. – 1988. – №1. – С. 47-49.
98. Цытович, Н.А. Основы прикладной геомеханики в строительстве / Н.А. Цытович, З.Г. Тер-Мартirosян. – М.: Высш. школа, 1981. – 317 с.
99. Ященко, В.Р. Геодезия и извечные тайны движений земной коры / В.Р. Ященко, Х.К. Ямбаев // Научно-технический журнал по геодезии, картографии и навигации «Геопрофи». – 2006. – №4. – С. 61-66.
100. Ящук, С.Д. Об оседании земной поверхности / С.Д. Ящук, Л.А. Саапар // Изучение современных движений Прибалтики. – Тарту: АН СССР, 1981. – С. 46-52.
101. Ящук, С.Д. Пьезометрические дисперсии и осадки земной поверхности на территории ЭССР / С.Д. Ящук // Состояние уровнемерных наблюдений и проблемы Кронштадского футштока. – М.: Изд-во МГК, 1986. – С. 96-111.
102. Eckl, M.C. Accuracy of GPS-derived relative positions as a function of interstation distance and observing-session duration Text / M.C. Eckl, R.A. Snay, T. Soler et al. // Journal of Geodesy. – 2001. – № 12 – Pp.633- 640.
103. Grootsmma, J. A Basic Theory of Subsidence Due to Reservoir Compaction: The Homogeneous Case / J. Grootsmma // Verh. Con. Ned. Geol. Mijnbouwk. Gen. –

1973. – № 28. – Pp. 43-62.
104. Holzer T. Land subsidence near oil and gas fields, Huston, Texas / T. Holzer, L. Bluntzer // Ground Water. – 1984. – №4, vol. 22. – Pp. 450-459.
 105. Yerkes, R. F. Surface deformation associated with oil and gas field operations in the US / R. F. Yerkes, R. O. Castle // Ist Intern. Land. Subcidence Symposium Proceeding, Tokyo / Intern. Assoc. of Hydrolog. – 1970. – № 88, vol. 1. – Pp. 55-66.
 106. AutoCad [Электронный ресурс] – режим доступа: <https://www.autodesk.ru/products/autocad/overview>
 107. Bond, J. Using GPS for augmenting deformation monitoring systems in open pit mines – Problems and solutions / J. Bond, A. Chrzanowski, R. Wilkins // Geomatica. – 2005. – №59, vol. 1. – Pp. 73-82.
 108. Gu, F. Status and development trend of 3D laser scanning technology in the mining field / F. Gu, H. Xie // International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering, RSETE 2013. – 2013. – Pp. 407-410.
 109. Hope, C. Manual total station monitoring / C. Hope, M. Chuaqui // Geotechnical News. – 2008. – №26, vol.3. – Pp. 28-30.
 110. Kuttykadamov, M.E. Geodetic monitoring methods of high-rise constructions deformations with modern technologies application / M.E. Kuttykadamov, K.B. Rysbekov, I.Milev, K.A. Ystykul, B.K. Bektur // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. – 2016. – №93, vol. 1. – Pp. 24-31.
 111. Panzhin, A.A. The spatial geodynamics monitoring at the mining enterprises and urban areas / A.A. Panzhin // Rock dynamics and applications – state of the art: proceedings of the 1st International conference of rock dynamics and applications, ROCDYN-1. – 2013. – Pp. 319-324.
 112. Reilinger, R. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone a for the dynamics of plate interactions / R. Reilinger, S. McClusky // JGR. – Vol. 111. – B05411. – 2006. – Pp. 1-26.
 113. Sashourin, A.D. Field investigation of dynamics displacement in zone of tectonic breaking / A.D. Sashourin, A.A. Panzhin, N.K. Kostrukova, O.M. Kostrukov //

- Rock mechanics – a challenge for society: Proceedings of the ISRM regional symposium EUROK 2001. – 2001. – Pp. 157-162.
114. Kuzmin, Y.O. Relation between deformation and seismicity in the active fault zone of Kamchatka, Russia / Kuzmin Y.O., Churikov V.A. // *Geophysical Journal International*. – 1998. – №133. – Pp. 607-614.
 115. Savchenko, S. The theoretical principles in geomechanical monitoring data processing for a block medium / S. Savchenko, E. Kasparyan // *Proceeding of the International Geomechanics Conference 11-15 June 2007, Nessebar, Bulgaria*. – 2007. – Pp. 1-8.
 116. Volkov, V.I. Program and goal-oriented approach to organization of monitoring Deformations of Buildings and Structures / V.I. Volkov // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – №725-726. – Pp. 118-123.
 117. Volkov, V.I.. Use of the program and goal-oriented approach to observe the vertical displacements of the earth's surface in Russia / V.I. Volkov, N.V. Volkov // *E3S Web of Conferences. TPACEE-2018*. – 2019. – №91 (07023). – 7 p.
 118. Darwin, G.H. On variations in the vertical due to elasticity of the Earth's surface / G.H. Darwin // *Phil. Mag.* – 1882. – Ser.5, vol.14, N.90. – Pp. 409-427.
 119. Hoggerl, N Repeated levelling and vertical crustal movements. Problems and results / N. Hoggerl // *Rock Mechanics*. – 1980. – №9. – Pp. 201-212.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Конструкция трубчатого грунтового нивелирного пункта Тип 150

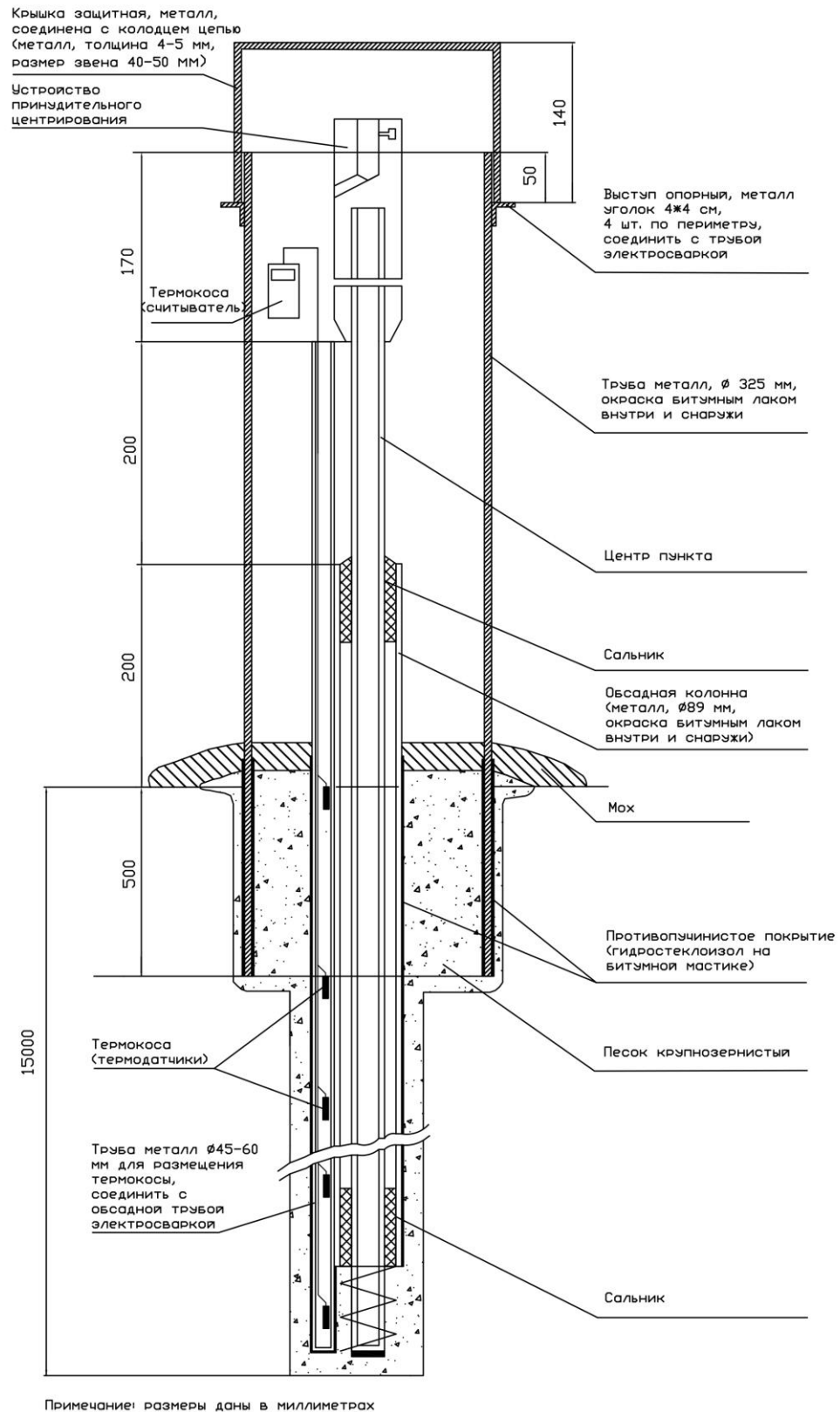


Рисунок А.1 – Акт внедрения ООО «НПО «ЭНЕРГОГАЗИЗЫСКАНИЯ»

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт внедрения ООО «НПО «ЭНЕРГОГАЗИЗЫСКАНИЯ»



Некоммерческое партнерство содействия развитию инженерно-изыскательской отрасли «Ассоциация Инженерные изыскания в строительстве» («АИИС»)

Научно-Производственное Объединение
«ЭНЕРГОГАЗИЗЫСКАНИЯ»

Юридический адрес: 197227, г. Санкт-Петербург, пр. Сизова, д.12 корп.2 оф. 63

тел. -факс.(812) 342-86-65

ОКПО 94667578 ИНН 7810067260, КПП 781401001, ОГРН 5067847132030

Расч. счет: 40702810132000006079 в ПАО «Банк Санкт-Петербург, г.С-Петербург

Корр. счет: 30101810900000000790 БИК: 044030790

E-mail: mail@energaziz.ru

05.09.2018 № 018/77-3
на № _____ от _____

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

научно-технической продукции

1. Наименование объекта внедрения

Методика геодезического мониторинга геомеханических и геодинамических процессов на геодинамических полигонах нефтегазовых месторождений разработана ассистентом кафедры геодезии, городского хозяйства, землеустройства и кадастров Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета Волковым Н.В.

2. Краткое описание внедренного объекта (мероприятия)

Методика геодезических наблюдений за геомеханическими и геодинамическими процессами, основанная на программно-целевом подходе к построению наблюдательных сетей на геодинамических полигонах и постановке повторного нивелирования в этих сетях, позволяет значительно повысить оперативность повторных геодезических наблюдений за деформациями земной поверхности, горных массивов, коллекторов и современной геодинамикой. Применение данной методики обеспечивает реализацию на геодинамических полигонах нефтегазовых месторождений требования нормативно-технических документов по точности и репрезентативности определяемых параметров геодинамических и геомеханических процессов. На базе ООО «Научно-производственное объединение «Энергогазизыскания», осуществляющего деятельность по разработке проектов геодинамических полигонов разрабатываемых месторождений углеводородов, установлено, что математический аппарат расчета параметров повторного нивелирования и конструктивных элементов грунтовых нивелирных пунктов гарантирует выполнение требований нормативно-технических материалов по точности определения параметров раздельно изучаемых геомеханических и геодинамических процессов.

3. На основе разработанной методики геодезических наблюдений за геомеханическими и геодинамическими процессами на геодинамических

полигонах нефтегазовых месторождений для ПАО «Газпромнефть», ООО «Научно-производственным объединением «Энергогазизыскания» при участии научного сотрудника Волкова Н.В. разработан методический документ «Правила проектирования, создания и выполнения режимных наблюдений за геодинамическими, геомеханическими деформациями зданий и сооружений на нефтегазовых месторождениях, обеспечивающих создание и эффективное применение систем наблюдений за деформационными процессами».

4. Сведения о внедрении (формы и методы внедрения)

Технические проекты геодинамических полигонов Ямбургского НГКМ и Известинского лицензионного участка ОАО «Нефтяной компании «Янгпур» разработаны на основе программно-целевого подхода к построению геодезических наблюдательных сетей и постановке повторного высокоточного нивелирования с оценкой значимости его результатов.

5. Дата внедрения: 2016-2017 г.г.

6. Основные характеристики предприятия, на котором внедрен объект
ООО «Научно-производственное объединение «Энергогазизыскания».

7. Сведения об эффективности внедрения научно-технической продукции

Методика геодезических наблюдений за геомеханическими и геодинамическими процессами на геодинамических полигонах нефтегазовых месторождений использована при разработке:

- технического проекта создания системы мониторинга за геомеханическими, геодинамическими и геокриологическими процессами на Ямбургском НГКМ;

- технического проекта геодинамического полигона Известинского лицензионного участка ОАО «Нефтяной компании «Янгпур».

Экономический эффект от внедрения методики на ГДП Ямбургского НГКМ за три цикла наблюдений составил 46084 тыс. руб.

Зам. генерального директора по
научной работе канд. техн. наук



Ю.В. Шендрик