

# МЕТОДИКА ИНЖЕНЕРНО-ГИДРОГРАФИЧЕСКИХ РАБОТ ПО ОБСЛЕДОВАНИЮ МОРСКИХ ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

О.Н. Горбунов («ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть», Астрахань)

В 1990 г. окончил гидрографический факультет Высшего военно-морского училища им. М.В. Фрунзе (в настоящее время — Морской корпус Петра Великого — Санкт-Петербургский военно-морской институт) по специальности «инженер-гидрограф». После окончания училища проходил службу в частях и подразделениях Гидрографической службы Каспийской флотилии. С 2004 г. по настоящее время — ведущий инженер-гидрограф отдела главного маркшейдера ООО «ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть».

Морской подводный трубопровод (МПТ) — один из основных объектов обустройства морских нефтегазовых месторождений. Показатель экологического риска МПТ чаще всего соответствует высокой степени — любая авария на нем чревата масштабной экологической катастрофой. Доминирующими причинами аварийных ситуаций на МПТ являются [1]:

- коррозия (50%);
- механические повреждения вследствие воздействия якорей, тралов (20%);
- повреждения, вызванные штормами, размывами дна (12%).

Каждое восьмое аварийное происшествие на МПТ в процессе эксплуатации происходит по причине динамического воздействия волн и течений, которые вызывают деформацию морского дна, приводящую к обнажению и провисанию трубопроводов. Провисание МПТ приводит к нарушению его горизонтальной и вертикальной устойчивости, а, следовательно, к повреждениям [2], требующим дорогостоящих мероприятий по устранению неисправностей.

С дальнейшим освоением месторождений углеводородного сырья на континентальном

шельфе риск аварий на МПТ будет возрастать. Вследствие этого при эксплуатации МПТ обязательной является точная диагностика технического состояния трубопровода с целью раннего выявления дефектов в его конструкции и предупреждения аварий, влекущих за собой катастрофические последствия. Порядок работ по обследованию технического состояния МПТ должен определяться специальной программой или регламентом, устанавливающими периодичность обследований и их объем.

В нормативно-технической базе, регулирующей мониторинг технического состояния морских подводных трубопроводов, отсутствуют нормативно-технические документы, содержащие методики выполнения работ по освидетельствованию МПТ и технические требования, предъявляемые к качеству этих работ.

В настоящее время российскими и зарубежными компаниями применяются следующие способы технического обследования при мониторинге МПТ [3]:

— визуальный — проводится с помощью подводного телеуправляемого аппарата (ТПА) или водолазом;

— внутренний — с использованием системы внутритрубных снарядов;

— гидролокационный — с помощью многолучевых эхолотов (МЛЭ) и гидролокаторов бокового обзора (ГБО);

— косвенный — путем анализа различных факторов, характеризующих состояние объекта и окружающей среды.

Каждый способ в отдельности не дает полной и объективной картины — только комплексное обследование гарантирует максимально достоверную оценку технического состояния трубопровода.

Гидролокационный способ мониторинга является наиболее эффективным и информационным и заключается в проведении инженерно-гидрографических работ по обследованию и съемке трассы трубопровода и прилегающего рельефа дна. Инженерно-гидрографические работы выполняются методом площадного обследования с судна, движущегося вдоль оси трассы МПТ. Многолучевые эхолоты и гидролокаторы бокового обзора позволяют независимо от глубины определить пространственное положение трубопровода, а также обнаружить малоразмерные детали рельефа

дна и другие объекты в широкой полосе обзора. Использование МЛЭ для контроля за эксплуатацией МПТ рекомендовано Международной гидрографической организацией [4]. Обследование технического состояния морского подводного трубопровода гидролокационным способом целесообразно выполнять с целью контроля его планово-высотного положения, выявления и оценки внешних условий, влияющих на техническое состояние объекта.

Основными задачами гидролокационного способа мониторинга являются:

- определение планово-высотного положения трубопровода;

- выявление участков деформаций дна, в том числе размывов грунта под трубопроводом, лежащим на нем;

- контроль состояния провисающих участков трубопровода;

- выявление величины и интенсивности литодинамических процессов, приводящих к подмыву трубопровода или его заносу донными осадками;

- определение протяженности и величины провисающих участков трубопровода относительно дна;

- фиксация любых внешних воздействий по трассе МПТ (следов от постановки якорей, использования орудий рыболовства и т. д.);

- получение достоверных картографических материалов о состоянии трубопровода и прилегающем рельефе дна.

В настоящее время отсутствует методическая база, позволяющая эффективно и надежно использовать МЛЭ и ГБО для проведения инженерно-гидрографических работ. Исполнители вынуждены планировать и выполнять промерные работы и калибровку оборудования, руководствуясь рекомендациями фирм-изготовителей и собственным опытом. Такие вопросы, как планирование галсов съемки (галс — путь судна, на котором оно выполняет морские гидрографические исследования, выдерживая заданные курс и скорость. — *Прим. ред.*), площадь перекрытия промерных полос, выбор числа посылов ультразвуковых импульсов в единицу времени и оптимальной скорости судна на галсе, калибровка измерительного оборудования и контроль качества выполненных работ, являются весьма специфическими для площадной съемки и не отражены в действующих инструкциях и наставлениях.

Планирование, выполнение и камеральная обработка материалов съемки рельефа дна должны быть тесно увязаны между собой — от этого зависит детальность и качество отчетных материалов. Кроме того, существует ряд особенностей планирования съемки МЛЭ и ГБО по обследованию МПТ.

При планировании съемки многолучевым эхолотом необходимо знать размер грида регулярной сетки (грид — решетка, используемая для разбиения земной поверхности на ячейки в регулярно-ячейном представлении пространственных объектов аналогично растру в их растровом представлении. — *Прим. ред.*) цифровой модели рельефа (ЦМР), которую планируется построить по материалам площадной съемки. От обоснованности задания размера грида

зависит точность и наглядность представления ЦМР (рис. 1). В зависимости от размера грида и технических характеристик МЛЭ (величина углового обзора, количество лучей по ширине полосы обзора) определяется расстояние между галсами, перекрытие смежных полос обзора и необходимое количество галсов. Ширина полосы обзора МЛЭ и величина перекрытия смежных полос обзора определяют плотность информации о глубине по всей ширине съемки. Междугалсовое расстояние устанавливает величину перекрытия полос обзора многолучевого эхолота [5]. Ширина полосы обзора различна у разных типов МЛЭ и зависит от величины сектора обзора, задаваемого характеристиками антенны и глубины моря в районе работ [6]. При площадной съемке трассы МПТ должно быть обеспечено не менее 200% степени покрытия. В этом случае участок рельефа дна дважды обследуется МЛЭ для увеличения плотности точек промера. Избыточность данных съемки МЛЭ обеспечивает возможность построения обоснованной трехмерной ЦМР.

При площадном обследовании трассы морского подводного трубопровода, как правило, планируется минимум три продольных галса: центральный — над осью трубопровода и два параллельных — справа и слева от центрального галса. Количество продольных галсов может меняться и зависит от необходимой ширины обследования трассы МПТ, расстояния между галсами и ширины полосы обзора многолучевого эхолота. С помощью галсов, параллельных оси трубопровода, при помощи гидролокаторов бокового обзора выявляются участки провисания трубопровода и определяются их параметры. Результаты съемки многолучевыми эхолотами необходимы для точного определения местоположения трубопровода и уточнения инфор-



**Рис. 1**

ЦМР дна вокруг ТП, построенная по результатам промера. Черным цветом показаны пропуски в данных промера

мации, касающейся участков, имеющих провисание или замкнутых грунтом. Центральный галс, пройденный над осью МПТ, необходим для точного определения планово-высотного положения трубопровода. Определение пространственного положения МПТ на донном грунте обеспечивается посредством планово-высотной привязки точек промера верхней образующей трубопровода и поверхности дна с помощью многолучевого эхолота и системы спутникового позиционирования.

В настоящее время при навигационном обеспечении инженерно-гидрографических работ применяют мировую геодезическую систему WGS-84, трансформированную в государственную систему геодезических координат 1942 г. (СК-42) или 1995 г. (СК-95) на эллипсоиде Красовского и перевычисленную в плоские прямоугольные координаты в проекции Гаусса-Крюгера и Балтийскую систему высот. Современное навигационное оборудование позволяет получать пространственные координаты, погрешности которых сопоставимы с погрешностями вычисления редуций на плоскость проекции Гаусса-Крюгера [7]. Для сохранения высокой точности измерений определение планово-высотного положения МПТ следует выполнять в системе WGS-84. Это связано с тем, что координаты объектов, измеренные спутниковой аппаратурой GPS в системе WGS-84, не имеют точно установленных параметров связи с системами СК-42 или СК-95 [8, 9]. В общем случае параметры трансформирования определяют по координатам совокупности геодезических пунктов, которые измерены в системе WGS-84 и СК-95 (СК-42). Эти параметры являются приближенными, и их использование может быть ограничено конкретным регионом [10]. Возможность создания в открытом море

сети геодезических пунктов для вычисления параметров трансформирования на район работ, как правило, отсутствует. Поэтому, мировая геодезическая система WGS-84 наиболее применима для решения задач по определению планово-высотного положения морского подводного трубопровода.

Использование пространственной системы прямоугольных координат при выполнении инженерно-гидрографических работ позволит исключить уровенные наблюдения и минимизировать ошибки измерения высотного положения МПТ и рельефа дна. В этом случае геодезическая высота верхней образующей трубопровода и поверхности дна будет представлять собой алгебраическую сумму слагаемых:

— глубины, измеренной многолучевым эхолотом и исправленной общей поправкой глубины, поправкой МЛЭ и поправкой за отклонение действительной вертикальной скорости звука в воде от расчетной;

— высоты антенны приемника GPS в системе WGS-84;

— расстояния между антенной приемника GPS и вибратором МЛЭ.

Главным недостатком при использовании пространственной трехмерной системы координат является меньшая наглядность, так как ее невозможно показать на топографических картах и планах без трансформации координат.

Наблюдения колебаний уровня моря при выполнении промерных работ проводят с помощью МЛЭ. Таким образом, для определения координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  поверхности морского дна используются все результаты измерений.

При этом точность определения координаты  $Z$  будет зависеть от точности измерений глубины моря МЛЭ и высотного положения геометрического центра антенны приемника GPS при



Рис. 2  
Монтаж антенны приемника GPS

позиционировании. Точность высотного положения антенны приемника GPS включает все распространенные ошибки спутниковых измерений (погрешности установки антенны, определения координат пунктов опорной геодезической сети, навигационных данных, а также качку судна и др.).

Для того, чтобы точно определить плановое положение точки промера на дне моря с помощью многолучевого эхолота и гидролокатора бокового обзора необходимо знать плановые координаты антенн приемников GPS, МЛЭ и ГБО в системе координат судна относительно общей точки отсчета (рис. 2). В качестве общей точки отсчета, как правило, используется условная точка пересечения диаметральной плоскости и плоскости мидель-шпангоута с главной палубой судна. Положение общей точки на палубе определяется по конструктивным чертежам судна. При измерениях пространственное положение антенн МЛЭ и ГБО в системе WGS-84 рассчитывается по координатам антенн приемника GPS и курсу судна.



Перед началом работ для обеспечения требуемой точности определения местоположения судна должна быть выполнена настройка всех устройств и датчиков системы позиционирования судна на предмет частоты и синхронизации получаемой информации в установленном формате. Она, как правило, состоит из контроля навигационного оборудования судна по контрольной точке, девиации гирокомпасов и калибровке датчиков динамических перемещений геодезическими методами (рис. 3). Для высокоточного вычисления пространственных координат все измерения должны быть синхронизированы по времени, а для повышения достоверности результатов — выполнено не менее 20 контрольных измерений.

Настройка навигационного оборудования судна по контрольной точке заключается в сравнении координат, полученных с помощью системы позиционирования судна с эталонными координатами в контрольной точке. Эталонные координаты определяются геодезическими методами. Средняя квадратическая погрешность (СКП) эталонных координат должна быть в три и более раза меньше СКП системы позиционирования судна [2].

Сущность девиации заключается в определении поправок



**Рис. 3**  
Гирокомпас и датчик качки

гирокомпасов. Для этого геодезическими методами определяются координаты точек, расположенных в диаметральной плоскости судна — на носу и корме. В ходе камеральной обработки вычисляется истинный курс судна и сравнивается с измеренным гирокомпасом. Вычисленная поправка определения курса гирокомпасом вводится в программное обеспечение системы позиционирования судна.

На промерном галсе судно испытывает бортовую и килевую качку, которая ухудшает результаты измерений МЛЭ и ГБО из-за:

- крена (ритмичных движений судна относительно его продольной оси);
- рыскания (нестабильности прямолинейного движения судна вдоль галса);
- вертикального перемещения (ритмичных поднятий и опусканий судна относительно некоторой средней плоскости);
- дифферента (нестабильности перемещения в горизонтальной плоскости).

Для повышения качества инженерно-гидрографических работ требуется точное определение углов пространственной ориентации антенн МЛЭ и ГБО [6].

Калибровка датчиков динамических перемещений направлена на выявление систематических ошибок, а ее сущность заключается в определении углов рассогласования систем координат датчиков качки относительно судовой системы координат. Для этого методами тригонометрического нивелирования измеряются превышения двух точек, расположенных на палубе в диаметральной плоскости судна, и двух — в плоскости мидель-шпангоута по левому и правому борту. По данным измерений вычисляются углы отклонения от нормали, проведенной к палубе судна относительно проектной вертикальной

плоскости. Вычисленные поправки вводятся в датчики динамических перемещений.

Для выявления и исключения систематических ошибок при промере с помощью многолучевого эхолота выполняют его калибровку. Цель калибровки МЛЭ — получение значений систематических поправок в измеряемые значения глубины и плановые координаты, и оценка величин случайных погрешностей.

К систематическим погрешностям измерения глубины относятся [4]:

- погрешность учета средней скорости звука в воде и скорости звука на горизонте антенны МЛЭ;
- погрешности учета рефракции зондирующих лучей;
- учет задержек, вызванных временем измерения параметров динамического перемещения судна;
- погрешности временных задержек обсервации судна на галсе.

К случайным относятся погрешности гидроакустических измерений и погрешности, вызванные случайными измерениями параметров водной среды.

Калибровка состоит в сравнении измеренных значений глубин поверхности дна со съемочных галсов, прокладываемых по различным направлениям и при различных скоростях над участком дна с характерным рельефом. С целью повышения достоверности результатов целесообразно выполнить не менее трех калибровочных галсов, проходящих через характерные участки рельефа дна, которые легко дешифрируются при камеральной обработке. Калибровка МЛЭ должна подтвердить возможность обнаружения объектов определенных размеров на заданных глубинах. Калибровка МЛЭ проводится на скорости, равной скорости судна при выполнении промера.

Скорость судна при промере оказывает существенное влия-

ние на способность МЛЭ и ГБО детализировать рельеф дна. Максимально допустимая скорость судна, обеспечивающая полное покрытие дна результатами съемки, может быть рассчитана по формуле [7]:

$$V = S z \operatorname{tg}(\varphi/2),$$

где  $z$  — глубина (м);

$S$  — количество посылов электромагнитных импульсов в секунду;

$\varphi$  — угловая ширина луча при излучении;

$V$  — максимальная скорость судна (м/с).

Высота носителя ГБО над дном должна составлять 8–20% от используемого диапазона наклонной дальности [6]. Это наиболее оптимальная глубина, на которой ГБО способен обеспечить создание акустических теней от донных объектов для поиска участков провисания трубопровода и последующей оценки их размеров.

Для гарантии того, что требуемые точности достигнуты, необходимо проверять и контролировать инженерно-гидрографические работы на всех этапах. Осуществление процедуры контроля качества является задачей первостепенной важности, которая позволит снизить затраты на повторное обследование и повысить общее качество выполняемых работ. При проведении площадной съемки должен быть разработан план контроля качества выполняемых работ, включающий все необходимые мероприятия. В общем случае контролю качества подлежат [2]:

- настройка систем тревог и предупреждений функционирования МЛЭ и системы датчиков;

- мониторинг отклонений вертикального луча МЛЭ с расчетом точности;

- работа МЛЭ по отображению поперечного профиля единичного посылы электромагнитного импульса;

- оперативное отображение в двухмерном и трехмерном ви-

де полосы обзора МЛЭ и визуальный контроль рельефа;

- оценка значений отклонения глубин, измеренных с разных галсов, в зоне перекрытия смежных полос;

- измерение скорости звука в воде и калибровка датчиков (2 раза в день);

- технология проведения работ;

- определение местоположения (не менее 1 раза в день);

- настройка каналов правого и левого бортов ГБО и их работоспособности (рис. 4);

- проверка стабильности работы навигационно-гидрографического оборудования;

- достоверность значений дифференциальных поправок (DGPS);

- ширина перекрытия смежных полос промера.

Контроль качества промерных работ является составной частью инженерно-гидрографических работ, осуществляется систематически в течение всего срока их проведения и должен охватывать все технологические процессы.

Инженерно-гидрографические работы по обследованию МПТ выполняются с обязательным водолазным или приборным дополнительным обследованием. Приборное обследование осуществляется с помощью подводного телеуправляемого аппарата. После окончания промерных работ по данным предварительной обработки материалов промера выявляются участки трассы МПТ, на которых необходимо выполнить водолазное или приборное дополнительное обследование, а также неклассифицированные объекты в непосредственной близости от МПТ, представляющие угрозу его безопасности.

Цель водолазного и приборного дополнительного обследования — получение необходимых достоверных сведений при разноречивости или сомнении в результатах гидролокационного

обследования во время выявления опасности подмыва трубопровода. Водолазное или приборное обследование проводится также в тех случаях, когда невозможно выполнить обследование с помощью МЛЭ и ГБО. Дополнительным обследованием определяется наличие участков провисания трубопровода, их протяженность и величина или отсутствие. Водолазное обследование должно выполняться только в тех случаях, когда это невозможно сделать с помощью подводного ТПА или результаты приборного осмотра с помощью ТПА требуют уточнения. При водолазном и приборном обследовании рекомендуется проводить подводную видеосъемку.

Ширина полосы обзора трассы МПТ при приборном дополнительном обследовании сомнительных участков на наличие участков провисания должна быть не менее 5 м от оси трубопровода. Ширина полосы обзора устанавливается, исходя из технических характеристик применяемого подводного ТПА, состояния прозрачности водной среды и способности оператора увидеть и различить подводные объекты, а также ширины зоны безопасного удаления подводных объектов от трубопровода. Все подводные объекты, обнаруженные в процессе проведения съемки ГБО, на расстоянии менее 5 м от трубопровода должны быть включены в программу приборного дополнитель-



Рис. 4  
Подготовка ГБО к работе

ного обследования. Кроме того, должны быть изучены крупные неклассифицированные объекты, обнаруженные при площадной съемке, которые могут представлять потенциальную угрозу безопасности МПТ.

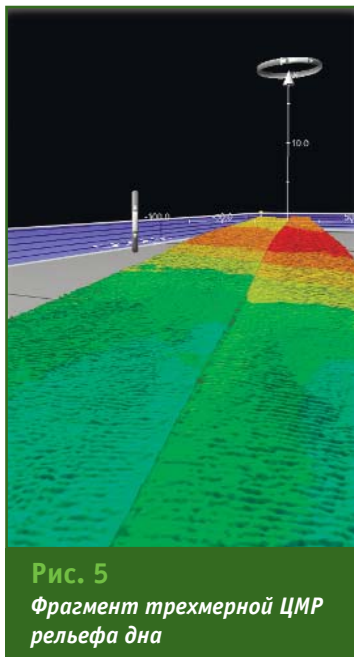
При обработке материалов инженерно-гидрографических работ создаются трехмерные ЦМР вдоль трассы морского подводного трубопровода (рис. 5), которые накладываются по принципу «следующая на предыдущую» с целью выявления изменения современных форм рельефа дна и определения характера литодинамических процессов, влияющих на изменения донного рельефа и положения МПТ. Для своевременного принятия мер по предотвращению возможных повреждений и аварийных ситуаций МПТ на основании анализа материалов площадной съемки должны быть выявлены и оценены:

- фактическое положение морского подводного трубопровода и участки изменения его пространственного положения;

- внешние условия, влияющие на техническое состояние и безопасное функционирование МПТ, — участки размыва дна, провисания трубопровода (протяженность и величина провиса), аккумуляции наносов и мощности донных осадков, интенсивность литодинамических процессов;

- тенденции абразии или аккумуляции донного грунта и возможные деформации морского дна.

По результатам технического обследования трубопровода создается геоинформационная база данных, содержащая картографическую информацию о трассе трубопровода, рельефе дна и их изменениях в процессе эксплуатации, в том числе зарегистрированных внешних воздействиях. Данные геоинформационной базы о морском подводном трубопроводе являются главными «документами» о его



**Рис. 5**  
Фрагмент трехмерной ЦМР рельефа дна

состоянии и положении до начала и в процессе эксплуатации.

Частота (периодичность) обследования МПТ первоначально устанавливается проектом и в дальнейшем может быть изменена. Причинами для изменения частоты обследования МПТ являются:

- активность водной среды в районе расположения трубопровода;

- стабильность дна водной акватории и протяженность трубопровода;

- результаты предыдущих обследований и программа эксплуатации.

Периодическое обследование технического состояния МПТ должно проводиться с той частотой, которая позволит принять меры по устранению неисправности прежде, чем трубопровод будет поврежден [2].

Точная диагностика технического состояния МПТ — задача первостепенной важности, направленная на обеспечение надежности эксплуатации трубопровода. В связи с вышеизложенным необходимо формирование нормативно-правовой базы, устанавливающей мероприятия системы эксплуатационного мониторинга МПТ для определения его технического состояния,

оценки безаварийной эксплуатации и выработки рекомендаций по проведению ремонтно-восстановительных работ.

#### ▼ Список литературы

1. Аварийность на морских трубопроводах. — [http://safety.moy.su/publ/avarijnost\\_na\\_morskikh\\_truboprovodakh/34-1-0-129](http://safety.moy.su/publ/avarijnost_na_morskikh_truboprovodakh/34-1-0-129).

2. Горбунов О.Н. О маркшейдерском обеспечении при поиске, разведке и обустройстве месторождений на континентальном шельфе // Маркшейдерия и недропользование. — 2009. — 5(43).

3. Смирнов К.А., Попко А.О. Технический мониторинг морских объектов добычи и транспортировки нефти и газа // Морской вестник. — 2008. — 3(27).

4. IHO Standards for Hydrographic Survey. Special Publication SP-44, Monaco, 1998.

5. Правила гидрографической службы № 4. Съемка рельефа дна. Часть 2. Методы и требования. МО СССР. ГУНиО. — М., 1984.

6. Фирсов Ю.Г. Гидролокаторы бокового обзора в современной гидрографии. ГМА им. адм. С.О. Макарова. — СПб., 2005.

7. Виноградов А.В. Об установлении единой координатной системы в геодезических работах // Геодезия и картография. — 2010. — № 5. — С. 16–18.

8. Погореленко Е.В. О Государственной системе координат СК–95 // Геопрофи. — 2007. — № 3. — С. 61–63.

9. Руководство пользователя по выполнению работ в СК–95. ГКИНП (ГНТА)-06-278-04. — М.: ЦНИИГАиК, 2004.

10. Географические информационные системы. Координатная основа. Общие требования. ГОСТ Р 52572–2006.

#### RESUME

A technique of engineering and hydrographic works for inspection of subsea pipelines with due consideration to the modern technologies and capabilities of the navigation and hydrographic equipment is proposed. To minimize errors in determining horizontal and vertical coordinates of the measured points it is recommended to carry out the work in the World Geodetic System WGS-84 without level observations.