

Глава 11. Электромагнитный метод поиска подземных коммуникаций (ЭММПК)

С.В. Иванова

11.1. Области применения и физические основы метода ЭММПК

ЭММПК применяется для решения следующих задач:

1. *Поиск труб и кабелей.* Во-первых фактическое местоположение подземных коммуникаций может значительно отличаться от проектного. Во-вторых трубы сами по себе (как сильно проводящие объекты), а так же токи, текущие по трубам и кабелям, вносят помехи в данные других методов электроразведки.

2. *Определение точного пространственного положения труб и кабелей.*

3. *Диагностика состояния гидроизоляционного покрытия труб.*

ЭММПК обычно входит в состав комплекса геофизических методов при обследовании трубопроводов и нефтеперекачивающих станций, а также при выполнении работ в городских условиях и на территории крупных предприятий.

ЭММПК основан на регистрации низкочастотных магнитных полей, связанных с протеканием тока по уложенным в землю трубам и кабелям и намагничиванием труб во внешнем переменном магнитном поле.

Рассмотрим причины возникновения токов в подземных коммуникациях.

По силовым кабелям протекают токи промышленной частоты 50 Гц. В городских условиях существует значительный фон электромагнитного поля от промышленных источников на частоте 50 Гц. Это поле индуцирует в замкнутых контурах труб токи той же частоты.

При прокладывании магистральных трубопроводов, для защиты металла от коррозии, наряду с гидроизолирующей оболочкой используют катодную защиту. Со станций катодной защиты (СКЗ) на трубу подается постоянный отрицательный потенциал около -1.5В . Положительный потенциал подается на аноды - специально оборудованные заземления рядом с СКЗ. Если изоляция трубы нарушается, между катодом и анодом возникает электрический ток. Стекая с трубы в местах нарушения изоляции, ток защищает ее от коррозии (окисления). Для катодной защиты используют выпрямленный ток промышленной частоты 50 Гц. Идеально выпрямить ток не удастся, поэтому, кроме постоянного тока, по трубам под катодной защитой протекают переменные токи с центральной частотой 100 Гц.

Ток изначально может и не протекать по подземным коммуникациям (трубам и кабелям). Кроме того, взаимное расположение труб и кабелей может быть довольно сложным и, производя измерения на частоте 50 Гц, проследить каждую трубу (кабель) в отдельности практически

невозможно. В таких случаях к выходящим на поверхность контактам трубы (концам кабеля) подключают петлю с включенным в нее генератором и пропускают по трубе или кабелю ток известной амплитуды и частоты. В городских условиях использование тока с частотой, отличной от промышленной (например, 625 Гц), позволяет избавиться от помех. Описанная выше модификация ЭМППК получила название «метод заряженного тела» (ЭМППК-МЗТ).

В случаях, когда подключиться к трубе невозможно, ток возбуждают индукционно. На некотором расстоянии параллельно трубе раскладывают длинный кабель, заземленный на концах, или незаземленную петлю. По кабелю (петле) пропускают переменный ток. По закону электромагнитной индукции, переменное магнитное поле этого тока вызывает ЭДС-индукции в контуре с исследуемой трубой. В трубе возникает переменный электрический ток. Такая модификация ЭМППК называется «метод длинного кабеля» (ЭМППК-МДК).

Рассмотрим физические основы ЭМППК-МЗТ и ЭМППК-МДК.

При работе по методике ЭМППК-МЗТ регистрируют переменное соленоидальное магнитное поле тока, пропускаемого по трубе (кабелю). Закон Био - Савара - Лапласа определяет значение индукции магнитного поля \vec{B} (напряженности \vec{H}), создаваемого прямолинейным участком Δl проводника, по которому течет ток I , на расстоянии r от этого участка по формуле: $\vec{H} = \frac{1}{4\pi r^3} [\Delta l \times r]$, $\vec{B} = \mu\mu_0 H$, где μ - относительная магнитная проницаемость среды (в воздухе $\mu=1$), $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнитная проницаемость вакуума, r - радиус-вектор, проведенный из участка проводника в рассматриваемую точку, Δl - вектор, совпадающий по направлению с течением тока. Вектор магнитной индукции перпендикулярен плоскости, проведенной через точку наблюдения и проводник с током, и направлен согласно правилу Максвелла (буравчика): если ввинчивать буравчик вдоль направления тока, то направление вращения рукоятки покажет направление вектора магнитной индукции.

В случае бесконечного линейного проводника с током, модуль напряженности его магнитного поля определяется по формуле: $|H| = \frac{1}{2\pi r} I$.

Выпишем формулы для горизонтальной и вертикальной составляющих напряженности магнитного поля в системе координат, в которой ось X направлена по горизонтали вправо перпендикулярно трубе (кабелю), ось Z - вертикально вниз. Начало координат выберем над центром трубы (кабеля) в точке с координатами $(0, \Delta h+z)$, где z - глубина трубы, Δh - высота магнитного датчика. Тогда горизонтальная составляющая

напряженности магнитного поля H_x и вертикальная H_z вычисляются по формулам:

$$H_x = \frac{I}{2\pi} \frac{\Delta h + z}{(\Delta h + z)^2 + x^2} \quad (11.1.),$$

$$H_z = \frac{I}{2\pi} \frac{x}{(\Delta h + z)^2 + x^2} \quad (11.2.).$$

Над центром сечения трубы (кабеля) графики компонент магнитного поля, измеренных вкрест простирания трубы, имеют характерные точки. На графике H_z над центром трубы отмечается переход через ноль (рис.11.1.). Индукционный датчик регистрирует абсолютную величину измеряемой компоненты, поэтому над центром трубы отмечается резкий минимум модуля H_z . Глубина залегания трубы z вычисляется по формуле:

$$z = \Delta l / 2 - \Delta h \quad (11.3.),$$

где Δl - расстояние между максимумами графика $|H_z|$, Δh - высота магнитного датчика. График компоненты H_x имеет экстремум над центром трубы (рис.11.1.). При работе с обычным индукционным датчиком это всегда максимум.

При работе по методике ЭММППК-МДК регистрируют магнитное поле $V_{\text{сумм}} = V^{\text{перв}} + V^{\text{конц}} + V^{\text{инд}} + V^{\text{мст}}$, где

$V^{\text{перв}}$ - первичное магнитное поле кабеля,

$V^{\text{конц}}$ - магнитное поле концентрационного тока,

$V^{\text{инд}}$ - магнитное поле индукционного тока,

$V^{\text{мст}}$ - магнитостатическое поле.

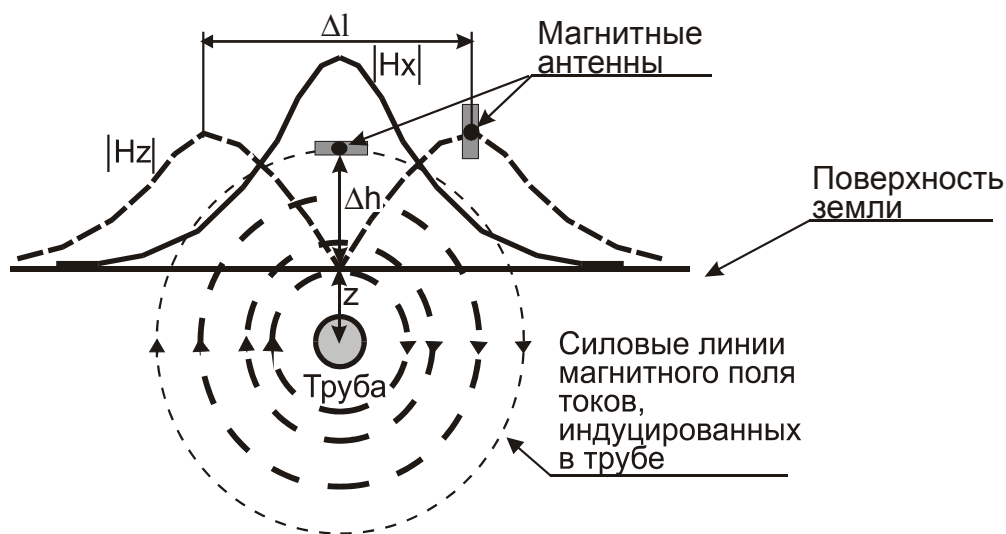


Рис.11.1. Оценка глубины залегания трубы

Рассмотрим происхождение этих полей. При работе по методике ЭММППК-МДК измерения горизонтальной компоненты вторичного магнитного поля над трубой проводят практически на поверхности земли. Это позволяет избавиться от первичного магнитного поля кабеля $V^{\text{перв}}$, которое не связано с трубой. На поверхности земли, т.е. на уровне кабеля, горизонтальная составляющая магнитного поля кабеля равна нулю. Если металлическая труба имеет гальванический контакт с вмещающей средой, то при прохождении электрического тока через эту среду, линии тока будут концентрироваться в трубе. Ток, стекающий с заземленных концов длинного кабеля, будет затекать в трубу. Такой концентрационный ток направлен против индукционного, и магнитные поля этих токов ($V^{\text{конц}}$ и $V^{\text{инд}}$) будут ослаблять друг друга. Чтобы исключить $V^{\text{конц}}$, длинный кабель раскладывают на расстоянии 10 - 20 м от трубы и заземляют как можно дальше от нее. По закону Фарадея, во всяком замкнутом проводящем контуре при изменении потока вектора магнитной индукции через площадь, ограниченную этим контуром, возникает электрический ток. В нашем случае индукционный ток наводится в контуре труб первичным магнитным полем кабеля. Магнитное поле этого тока - $V^{\text{инд}}$. Магнитостатическое поле $V^{\text{мст}}$ возникает за счет намагничивания ферромагнитного материала трубы во внешнем переменном магнитном поле кабеля. Структура аномального магнитного поля, возникающего над трубой при работе по методике ЭММППК-МДК, сложнее, чем при работе по методике ЭММППК-МЗТ. Измеряемое магнитное поле $V^{\text{сумм}}$ складывается из $V^{\text{инд}}$ и $V^{\text{мст}}$. Кроме того, при выполнении полевых работ не удается полностью избавиться от $V^{\text{перв}}$ и $V^{\text{конц}}$.

11.2. Аппаратура и методика полевых работ

В полевых работах методом ЭММППК используются измеритель ЭРА и, для возбуждения тока, генератор ЭРА-625.

Измеритель ЭРА позволяет регистрировать переменные магнитные поля на частотах 50, 72, 100 и 625 Гц. Генератор напряжения ЭРА работает на частоте 625 Гц, позволяет возбуждать ток от 0.1 до 100 мА. Для измерения магнитного поля к измерителю подключается магнитная антенна, которая представляет собой настроенный в резонанс на частоте 625 Гц LC-контур, образованный многовитковой обмоткой на ферритовом сердечнике.

Измеряемое магнитное поле (нТл) наводит в обмотке магнитной антенны ЭДС - индукции (мВ), которая фиксируется измерителем. Чтобы перейти от мВ к нТл или мА/м производят несколько калибровочных измерений горизонтальной составляющей магнитного поля над осью кабеля с известным током на разных высотах. После этого, по формуле (11.1.) вычисляют значения горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля в точке максимума для разных высот датчика. Разделив

рассчитанные значения напряженности магнитного поля в мА/м на измеренные значения ЭДС - индукции в мВ, вычисляют коэффициент перехода от мВ к мА/м как среднее арифметическое для всех измерений.

Подготовка работ по методу ЭМППК начинается с разбивки профилей. При картировании объектов (труб или кабелей), направление которых приблизительно известно, профили стараются ориентировать вкрест их простираения. Расстояние между профилями и между точками наблюдения выбирается исходя из ожидаемых размеров аномалии и из требований детальности работ. Подземные коммуникации укладывают в землю на глубину 0.5 - 3 м. Исходя из этого, расстояние между профилями обычно составляет 1 - 5 м. Измерения выполняются с шагом 0.5 - 2 м по профилю длиной 10 - 20 м.

При полевых наблюдениях по методу ЭМППК-МЗТ, к выходящим на поверхность земли контактам исследуемого объекта (трубы или кабеля) подключают петлю с генератором (рис.11.2.). Через полученный контур пропускают переменный ток с частотой 625 Гц силой 10 - 20 мА. Сторону петли, параллельную трубе, относят на расстояние 100 - 200 м, чтобы магнитное поле тока, текущего по ней, не ослабляло магнитного поля тока в трубе. С помощью датчика магнитного поля в каждой точке профиля регистрируются две горизонтальные (вдоль профиля наблюдений и поперек него) компоненты магнитного поля. Кроме того, на каждом профиле находят точные координаты максимумов и минимума вертикальной компоненты магнитного поля. Для этого медленно перемещаются по профилю наблюдений с вертикально расположенной магнитной антенной и следят за показаниями измерителя. Расстояние между точками, где вертикальная компонента достигает максимума, и

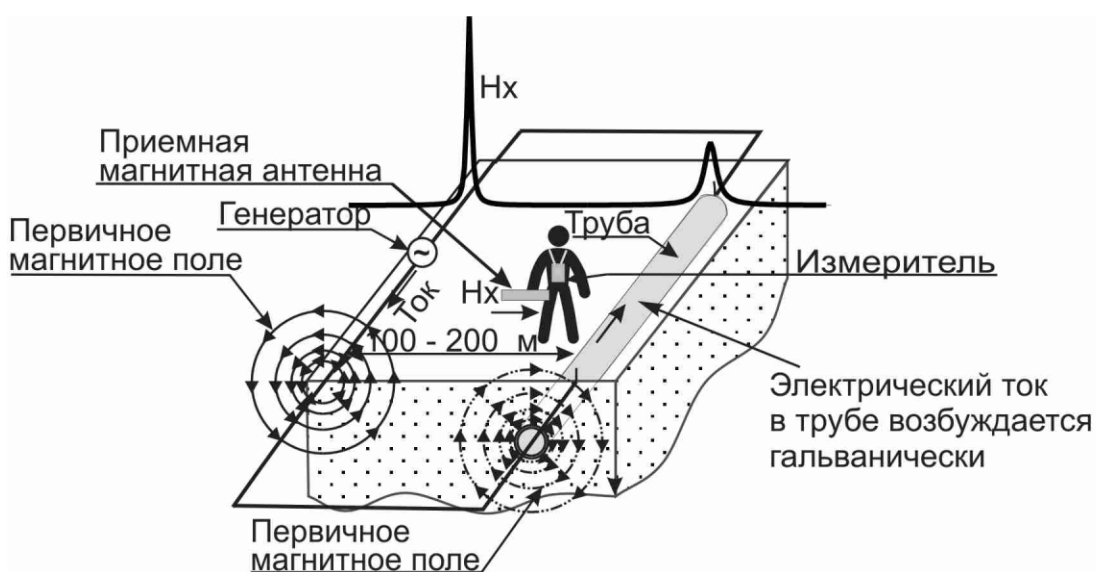


Рис.11.2. Возбуждение магнитного поля над трубой в методе заряженного тела.

координату ее минимума стараются точно зафиксировать.

По методике ЭМППК-МДК работают в случае, когда нельзя непосредственно подключиться к исследуемому объекту (трубе или кабелю). Кабель ПВР длиной 100 - 300 м раскладывают вдоль трубы на поверхности земли на расстоянии 10 - 20 м от нее и заземляют на концах (рис.11.3.). По кабелю с помощью генератора пропускают переменный ток с частотой 625 Гц силой 10 - 20 мА. С помощью датчика магнитного поля в каждой точке вдоль профиля наблюдений регистрируется горизонтальная компонента магнитного поля. Измерения проводятся у поверхности земли, где первичное магнитное поле длинного кабеля равно нулю.

При работе по методикам ЭМППК-МЗТ и ЭМППК-МДК, на 5% пикетов участка работ проводят контрольные измерения.

11.3. Обработка и интерпретация данных ЭМППК.

В результате обработки и интерпретации данных метода ЭМППК определяют положение трубы в плане и разрезе.

При обработке прежде всего измеренные значения переводят из мВ в мА/м. Затем строят карты $\lg|H_x|$, $\lg|H_y|$ и $\lg(\sqrt{H_x^2 + H_y^2})$ по данным метода ЭМППК-МЗТ и карты $\lg|H_x|$ по данным метода ЭМППК-МДК. На карте $\lg(\sqrt{H_x^2 + H_y^2})$ ось трубы маркируется максимумами полной горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля. На карте $\lg|H_x|$, построенной по результатам измерений методом ЭМППК-МДК, местоположение трубы в плане также определяется по максимумам горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля. Ось трубы выносится на карты.

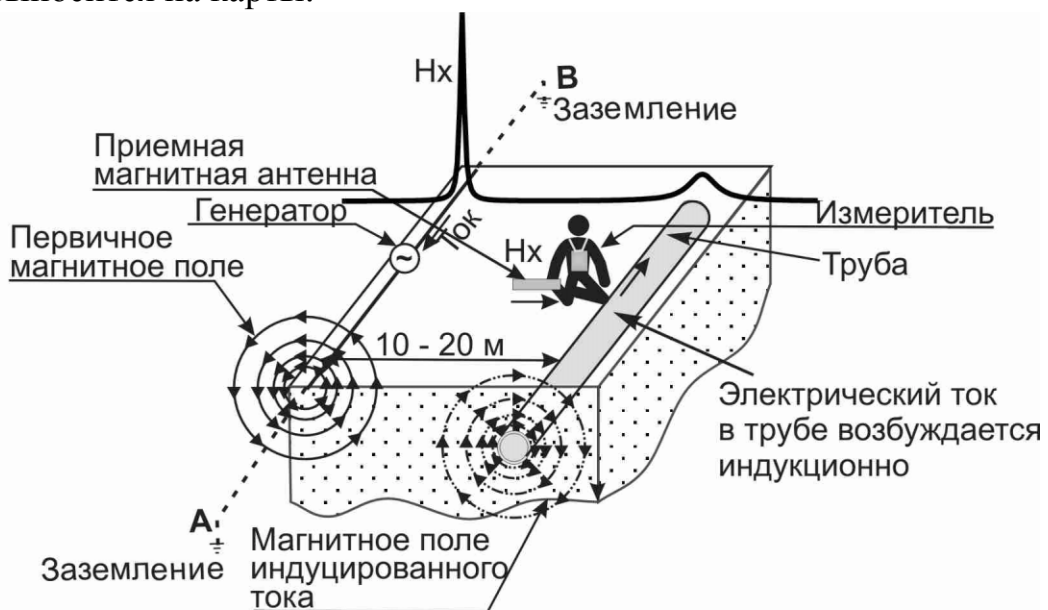


Рис.11.3. Возбуждение магнитного поля над трубой в методе длинного кабеля.

По данным метода ЭМППК-МЗТ вычисляют глубину до трубы на каждом профиле. Координаты минимумов вертикальной компоненты определяют местоположение трубы в плане. По полученным координатам строят два графика: положение трубы в разрезе и положение трубы в плане.

Точность измерений ε рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i^p - x_i^k)^2}{N}},$$

где N - количество контрольных измерений, x_i^p - рядовое значение компоненты магнитного поля в точке i профиля, x_i^k - контрольное значение компоненты магнитного поля в точке i профиля.

Электроразведка: учебное пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей. – М.: Геологический факультет МГУ, 2005.