

EDN: XVPKLU

УДК 621.396.96

Physico-Technical Basics of Diagnostics of Main Pipelines by Radar Method

Georgiy Ya. Shaydurov,
Maksim G. Merenkov*, Roman G. Shaydurov,
Oleg A. Maykov and Yekaterina A. Kokhonkova
*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 25.04.2024, received in revised form 13.08.2024, accepted 03.09.2024

Abstract. The article considers the current problem of pipeline defect detection using unmanned aerial vehicles, which allows for prompt assessment of the condition of welds, hydrocarbon leaks, insulation failure, locations of unauthorized cuts and geo-positioning of the pipeline in the underground space. The following are examined the condition of pipelines: spatial position, product leakage, condition of welds and insulation, presence and location of unauthorized incuts; a quantitative assessment of the sensitivity of the radar method of remote flaw detection from on board an unmanned aerial vehicle (UAV) is given.

Keywords: pipeline, defects, radar, unmanned aerial vehicle, welds, insulation, unauthorized incuts, vibration, natural frequencies.

Citation: Shaydurov G. Ya., Merenkov M. G., Shaydurov R. G., Maykov O. A., Kokhonkova Ye. A. Physico-technical basics of diagnostics of main pipelines by radar method. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2024, 17(6), 802–813. EDN: XVPKLU



Физико-технические основы диагностики магистральных трубопроводов методом радиолокации

Г. Я. Шайдуров, М. Г. Меренков,
Р. Г. Шайдуров, О. А. Майков, Е. А. Кохонькова
*Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск*

Аннотация. Рассматривается актуальная проблема обнаружения дефектов трубопроводов с борта беспилотных летательных аппаратов, позволяющая оперативно оценивать состояние сварных швов, появление утечек углеводородов, нарушение изоляции, местоположения несанкционированных врезок и геопозиционирования трубопровода в подземном пространстве. Исследуется состояние трубопроводов: пространственное положение, утечка продукта, состояние сварных швов и изоляции, наличие и место несанкционированных врезок; дается количественная оценка чувствительности радиолокационного метода дистанционной дефектоскопии с борта беспилотного летательного аппарата (БПЛА).

Ключевые слова: трубопровод, дефекты, радиолокация, беспилотный аппарат, сварные швы, изоляция, несанкционированные врезки, вибрация, собственные частоты.

Цитирование: Шайдуров Г. Я. Физико-технические основы диагностики магистральных трубопроводов методом радиолокации / Г. Я. Шайдуров, М. Г. Меренков, Р. Г. Шайдуров, О. А. Майков, Е. А. Кохонькова // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(6). С. 802–813. EDN: XVPKLU

Основным методом диагностики, который сегодня используется во всем мире, является внутритрубная дефектоскопия, основанная на регистрации магнитного поля и регистрации прочности сварных швов ультразвуковым методом с использованием специальных измерительных устройств, перемещаемых внутри трубы потоком транспортируемых углеводородов [1–3].

Известны способы диагностики с непосредственным контактом акустических датчиков по поверхности трубы [3] и прокладкой вдоль неё оптического кабеля, отмечающего локальные деформации трубопровода.

Общий недостаток внутритрубных дефектоскопов – низкая скорость обследования, высокая трудоемкость и стоимость работ, вмешательство в процесс перекачки продукта.

Контактная, внутритрубная диагностика подвержена внешним воздействиям, требует постоянного наблюдения, а прокладка оптоволокну возможна лишь при строительстве нового трубопровода.

Рассмотрим потенциальные возможности радиолокационной диагностики путем облучения поверхности земли высокочастотным электромагнитным полем с борта беспилотного летательного аппарата (БПЛА), летящего на высоте 10–20 м над трассой прокладки трубопровода.

Верхний диапазон рабочей частоты радиолокационной станции (РЛС) ограничивается потерями энергии в скин-слое электромагнитной волны, глубина которого определяется проводимостью покрывающего трубу грунта.

Так, при заглублении 1,5 м и допустимых потерях энергии ЭМ сигнала в грунте 50 дБ рабочая частота РЛС должна находиться в пределах 300–500 МГц.

Физической основой подобного метода диагностики является измерение амплитуды и фазы отраженного радиосигнала, определяемого параметром наведенного тока в скин-слое

стенок трубы. К информационным параметрам относятся дефекты стенки и сварных швов, состояние изоляции, несанкционированные врезки, линия и глубина положения трубопровода.

Характеристика частотного спектра вибраций трубопровода

Собственные частоты колебаний замкнутой цилиндрической оболочки, нагруженной внутренним и внешним давлением при фиксации концевых сечений трубы, можно определить с помощью уравнения [4]

$$\begin{aligned}\omega_{mn}^2 &= \frac{E g h_x^2 \lambda_n^2 + m^4(m-1)(m^2-1+P_x)}{\gamma^2 \lambda_n^2 h_x + m^4 + m^2} \\ h_x &= \frac{h}{R \sqrt{12(1-\nu^2)}}; \\ P_x &= \frac{R}{Eh h_x^2}; \\ \lambda_n &= \frac{h \pi R}{L \sqrt{h_x}} = P_o \frac{R}{Eh h_x^2}.\end{aligned}\tag{1}$$

Здесь m, n – волновые числа в окружённом и продольных направлениях; h – толщина стенки трубы; E – модуль упругости; γ – удельный вес; g – ускорение силы тяжести; P_o – внутреннее давление в трубе; ν – коэффициент Пуассона; h_x – параметр относительной толщины оболочки; R – радиус трубы; L – длина отрезка трубы.

С учетом внутреннего потока жидкости

$$\omega_{mn}^2 = \frac{\lambda_n^4 + m^4(m-1)(m^2-1+P_x) + M_{nn} u^2 h_x \lambda_n^2}{R h P_x (\lambda_n^2 h_x + m^4 + m^2) - M_{mn}^x r^2},\tag{2}$$

где M_{mn}^x – присоединенная масса жидкости в трубе

$$\Phi_{mn} = \frac{I_m(\lambda_o)}{\lambda_o I_m^x(\lambda_o)}; \quad \lambda_o = \frac{h \pi R}{L};$$

$I_m(\lambda_o)$ – модифицированная функция.

По расчетам [5] частота собственных колебаний стального безнапорного трубопровода длиной $L = 8 R$ при диаметре 1220 мм и толщине 25 мм оценивается как ~140 Гц.

Математическое моделирование трубопровода с внутренним потоком нефти через уравнение Навье-Стокса дало оценку собственной частоты вибрации отрезка трубопровода длиной 10 м и диаметром 1 м в районе 400 Гц.

Однако моделирование неоднородностей в стенке трубы в виде небольшого отверстия диаметром 2 мм и надрезов показало смещение этих частот на 2÷4 Гц, которое трудно диагностировать дистанционно.

По этой причине за основу такой диагностики целесообразно положить вибрации трубы за счет истечения жидкости или газа под высоким давлением порядка 80 атм.

В этом случае приближенно можно оценивать частоту вибрации, определяемую давлением, скоростью истечения продукта и диаметром отверстия D . В районе отверстия создается зона Френеля с длиной волны порядка $\lambda_a \approx 2D$.

Если представить дефект в виде отверстия в районе шва диаметром 10 мм, то частота вибрации, вызванной истечением струи продукта, определяется как

$$F = \frac{V_3}{2D} = \frac{1500}{2 \times 10^{-2}} = 75 \text{ кГц.} \quad (3)$$

Здесь V_3 – скорость звука в нефти.

При истечении газа эта частота снизится до 15 кГц.

Поскольку это приближенная оценка, то необходим прямой эксперимент на действующем трубопроводе.

По данным математического моделирования амплитуда вибрации у поверхности трубопровода может составлять $\Delta h = 2,5 \div 5$ мкм.

При облучении радиоволной отраженный радиосигнал будет модулирован по фазе на величину

$$\Delta\varphi = 2\pi f \frac{\Delta h}{v}, \quad (4)$$

где f – рабочая частота, v – скорость распространения радиоволн в грунте.

Так, при $f = 300$ МГц; $v = 10^8$ м/с; $\Delta h = 10^{-5}$ м; $\Delta\varphi = 2 \times 10^{-4}$ рад.

При фазовом измерении цифровым методом точность оценки фазы определяется как [6]:

$$\Delta\varphi = \frac{1}{\sqrt{q\Delta f T_n}}, \quad (5)$$

где q – отношение сигнал/шум на входе приемника по мощности; Δf – полоса пропускания; T_n – время наблюдения.

Из (2) требуемое отношение сигнал/шум

$$q = \frac{1}{\Delta\varphi^2 \Delta f T_n},$$

при $\Delta\varphi = 2 \times 10^{-4}$; $q = 1,8 \times 10^4$.

Это очень большая величина, поэтому без прямого эксперимента можно ожидать, что при $q = 100$ минимальная амплитуда вибраций, которую можно выделить приемником РЛС, составит:

$$\Delta h_{min} = 360 \text{ мкм.}$$

Обнаружение дефекта путем фазовых измерений и геопозиционирования трассы трубопровода должно производиться двухканальными фильтрами, один из которых настроен на частоту собственных колебаний трубы 400 Гц, а второй на частоту вибраций $10 \div 30$ кГц.

Возможно обнаружение вибраций дефекта прямым методом считывания колебаний почвы лазерным лучом с борта БПЛА.

На рис. 1 приведена схема реализации системы дистанционной диагностики с использованием БПЛА самолетного типа, где: 1 – поверхность земли; 2 – сварные швы; 3 – нарушенная изоляция; 4 – БПЛА; 5 – приемные вибраторы; 6 – передающий вибратор; 7, 8 – приемники; 9, 10 – амплитудные детекторы; 11 – фазовый детектор; 12 – микроконтроллер; 13 – навигаци-

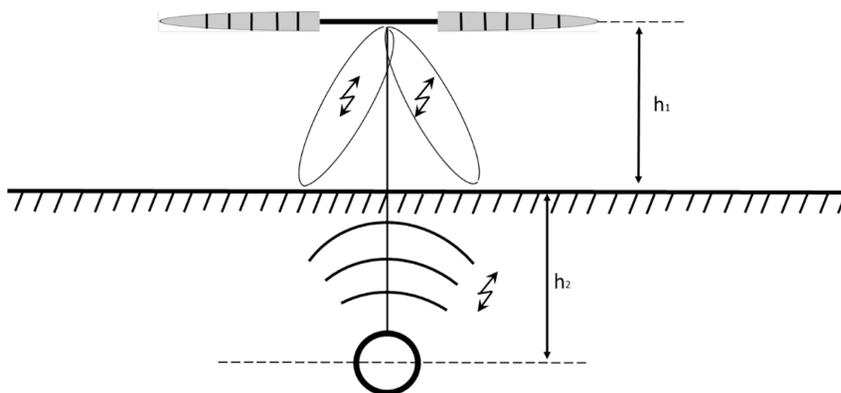


Рис. 2

Fig. 2

Для геопозиционирования передающая ФАР должна содержать в каждом её элементе два разнесенных между собой вибратора [7].

Передачик радиометра излучает радиосигнал с поочередной коммутацией этих вибраторов.

Это создает в пространстве двухлучевую диаграмму направленности относительно оси положения трубопровода. Лишь на оси равносигнальной зоны амплитуды радиосигналов одинаковы, и любое смещение в сторону приведет к изменению соотношения амплитуд отраженных радиосигналов. Таким образом, вертикальные рули БПЛА направляют его полет вдоль оси положения трубопровода.

Амплитуда отраженного радиосигнала описывается как:

$$U(t) = U_m e^{j(\omega \pm F_b)t} \sin(2\pi F_k t + \varphi_k), \quad (7)$$

где $\omega = 2\pi f$ – радиальная частота; F_b – частота вибраций трубы; F_k – частота коммутации.

После детектирования амплитудным демодулятором полосовой фильтр выделяет сигнал частоты коммутации F_k .

Глубина положения определяется через фазу сигнала этой частоты

$$\varphi_k = 4\pi F_k \left(\frac{h_1}{C} + \frac{h_2}{v_r} \right), \quad (8)$$

где C – скорость распространения радиоволн в воздухе, v_r – скорость распространения радиоволн в грунте.

При импульсной модуляции радиосигнала первый член этого уравнения определяется по запаздыванию радиосигнала в воздухе, а второй – по разности фаз, отраженных от трубы радиосигнала на частоте коммутации.

$$\varphi_{kL} = 4\pi F_k \left(\frac{h_2}{v_r} \right). \quad (9)$$

Частота коммутации определяется условием

$\lambda_k = \frac{v_r}{F_k} \geq 2(h_1 + h_2)$, позволяющим снять неоднозначность фазовых измерений.

Так, при $h_1 + h_2 = 21,5$ м; $\lambda_k > 40$ м, что соответствует частоте коммутации

$$F_k = \frac{v_r}{\lambda_k} \approx \frac{3 \cdot 10^8}{40} \approx 10 \text{ МГц.}$$

Измеряемый фазовый сдвиг оценивается как:

$$\varphi_k = 4\pi \cdot 10^7 \frac{1.5}{10^8} \approx 1,9 \text{ рад} \approx 114^\circ.$$

Погрешность измерений глубины положения трубы определяется из уравнения

$$\Delta\varphi = 2\pi F_k \frac{\Delta h}{v_r}. \quad (10)$$

$$\Delta h = \frac{\Delta\varphi v_r}{2\pi F_k}. \quad (11)$$

Если принять оценку фазовых измерений в 1° ($1/57$ рад), то получим:

$$\Delta h = \pm 0,03 \text{ м}$$

Более высокую величину погрешности даст учет вариаций скорости РРВ, зависящий

от электропроводности грунта $v_r = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}$, где $\epsilon \approx 5 \div 10$ – относительная диэлектрическая

проницаемость в грунте. В этих пределах будет изменяться погрешность измерения высоты полета БПЛА.

На рис. 3 изображена схема формирования отраженной от трубопровода электромагнитной волны РЛС, где: 18 – трубопровод; 22 – стенка трубы толщиной d ; 19 – скин-слой ЭМ волны толщиной δ ; 2 – сварные швы; 3 – нарушение изоляции; 20 – наведенный ток; 23 – поле передатчика; 21 – вытекающий ток через нарушенную изоляцию.

На рис. 4 показана эквивалентная электрическая схема формирования тока в стенках трубы, наведенного электромагнитной волной РЛС, где: $U(t)$ – наведенная в стенке трубы ЭДС; I – наведенный в трубе ток; Z_{III} и Z_L соответственно электрическое сопротивление дефективного

шва и скин-слоя электромагнитной волны в стенке трубы; $Z_C = \frac{1}{\omega C}$ – ёмкостное сопротивление

изолирующей оболочки; NI – место нарушения изоляции; Z_{II} – сопротивление изоляции.

Физической основой метода является возбуждение продольного тока I в стенке трубы на глубине скин-слоя электромагнитной волны, излучаемой продольным широкополосным вибратором 6. Наведенный ток через емкость, образуемую стенкой трубы и изоляции, замыкается на грунт. Амплитуда этого тока определяется электрическим сопротивлением двух соседних сварных швов 2, и при нарушении их прочности это сопротивление существенно нарастает,

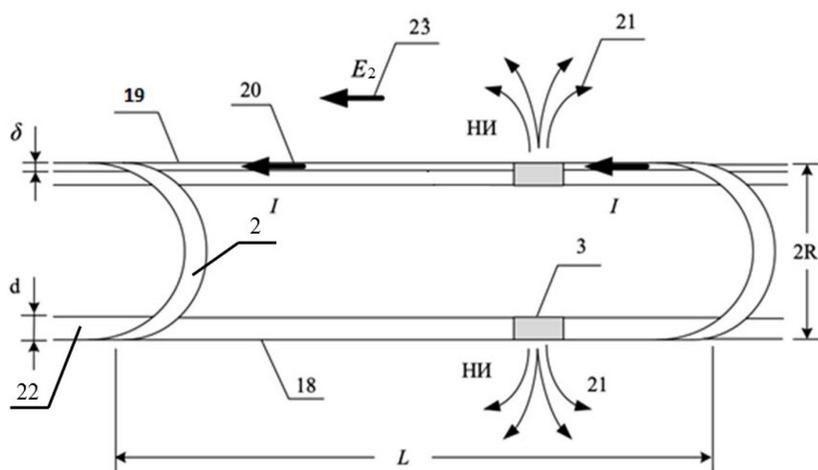


Рис. 3. Схема формирования отраженной от трубопровода электромагнитной волны РЛС

Fig. 3. Schematic diagram of the formation of an electromagnetic wave reflected from a pipeline by a radar

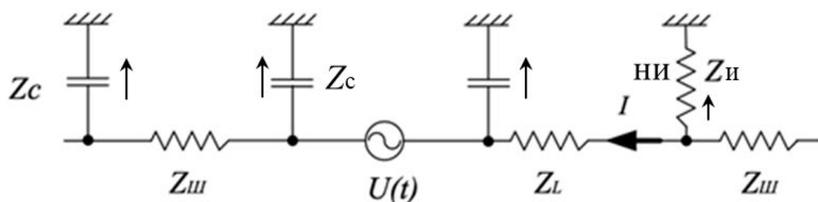


Рис. 4. Эквивалентная электрическая схема формирования тока в стенках трубы, наведенного электромагнитной волной РЛС

Fig. 4. Equivalent electrical circuit for the formation of current in the walls of a pipe induced by an electromagnetic wave of a radar

амплитуда принимаемого сигнала на входе приемника падает и смещается фаза. По появлению этого минимума микроконтроллер 12 регистрирует дефект, а результат его запоминается во флэш-память.

При нарушении изоляции 3 через место контакта трубы с окружающим грунтом начинает вытекать ток, электромагнитное поле которого наводит ЭДС в поперечном приемном вибраторе 5, сигнал которого через приемник 8 поступает на второй амплитудный детектор 10 и фазовый детектор 11. Результат цифровой обработки в микроконтроллере 12 запоминается в бортовой флэш-памяти. Точка положения БПЛА в пространстве регистрируется бортовым навигационным приемником 13.

Линия положения трубопровода определяется производной по времени огибающей группы сигналов.

Линейный ток в стенках трубы, наведенный передающей антенной 5, распространяется в скин-слое электромагнитной волны глубиной

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}},$$

где f – рабочая частота РЛС, σ – электропроводность материала трубы, μ – магнитная проницаемость материала трубы.

Наведенный в стенках трубы ток определяется как:

$$I(t) = \frac{U(t)}{Z_L + Z_{ш} + Z_C}, \quad (12)$$

где: $Z_L = \frac{L}{2\pi R \delta \sigma}$ – продольное электрическое сопротивление скин-слоя; $C_E = \frac{2\pi R L \varepsilon}{d}$ – суммарная емкость между стенками трубы и грунтом; d – толщина изоляции трубы; $\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}}$ – тол-

щина скин-слоя; σ – электропроводность железа; $\varepsilon = \bar{\varepsilon} \times \varepsilon_0$ – диэлектрическая проницаемость

изоляция; $\varepsilon_0 = \frac{1}{3\pi} 10^{-9} \frac{\Phi}{\text{м}}$; $\mu = \bar{\mu} \times \mu_0$ – диэлектрическая и магнитная проницаемость изоляции;

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}.$$

При величинах $L=10$ м; $f = 3 \times 10^8$ Гц; $\bar{\mu} = 10$; $\sigma = 10^7 \frac{\text{Сим}}{\text{м}}$ глубина скин-слоя составит $\delta = 5$ мкм, а продольное электросопротивление (ЭС) $Z_L = 6 \times 10^{-3}$ Ом.

Если принять что ЭС сварного шва не отличается от ЭС железа, принятого как $\sigma = 10^7 \frac{\text{Сим}}{\text{м}}$, то при толщине шва $a = 10^{-2}$ м его ЭС составит $Z_{ш} = 4 \times 10^{-3}$ Ом. Емкостное сопротивление утечки тока на грунт через изоляцию трубы оценивается $Z_C = 1,5 \times 10^{-3}$ Ом при общей емкости $C_E = 0,3$ мкФ.

Фазовый сдвиг наведенного в трубе тока определяется как:

$$tg\varphi = \frac{Z_C}{2Z_{ш} + Z_L}. \quad (13)$$

Изменение соотношения $Z_{ш}/Z_L$ в результате деформации сварного шва отразится как по амплитуде, так и по фазе отраженной электромагнитной волны, а повреждение изоляции изменяет скачком параметр емкостного сопротивления Z_C .

Поскольку диаграмма направленности излучающей антенны имеет косинусоидальную форму и максимум амплитуды отраженного радиосигнала $U(t)$ точно соответствует положению БПЛА над осью трубопровода, то любое отклонение влево или вправо приведет к ее уменьшению.

По этой причине ось трубопровода отмечается минимумом производной радиосигнала $\frac{\partial U(t)}{\partial t}$ на участке между двумя точками положения. Бортовой микроконтроллер отметит эти изменения и внесет корректировку полета БПЛА.

Наведенная в трубе ЭДС от излучения бортового передатчика РЛС оценивается через уравнение:

$$P_2 = \frac{P_1 \sigma_T e^{-\alpha h_2}}{4\pi(h_1 + h_2)^2}, \quad (14)$$

где: P_1 – мощность излучения РЛС; P_2 – мощность сигнала РЛС, падающего на отрезок трубы длиной между сварными швами; $\sigma_T = 2\pi RL$ – эффективная поверхность рассеивания трубы; $E_2 = \sqrt{P_2 W_r}$ – напряженность электромагнитного поля у поверхности трубы;

Волновое сопротивление грунта:

$$W_r = \frac{120\pi}{\sqrt{h^2 + p^2}} \quad h = p = \sqrt{30 \lambda \sigma_r}.$$

ЭДС, наведенная сигналом РЛС на стенки трубы:

$$u(t) = E_2(t) L; \quad (15)$$

$\alpha = \sqrt{\frac{f \mu \sigma_r}{4\pi h_2^2}}$ – коэффициент поглощения электромагнитной волны в окружающем грунте;

$\lambda = \frac{V_r}{f}$ – длина электромагнитной волны; $V_r = \frac{C}{\sqrt{\epsilon}}$ – скорость электромагнитной волны в грунте;

σ_r – проводимость грунта; μ – магнитная проницаемость грунта; h_2 – глубина положения трубы.

На выходе РЛС мощность отраженного от трубы радиосигнала составит:

$$P_3 = \frac{P_1 \sigma_T e^{-4\alpha h_2} S_A Q}{16\pi^2 (h_1 + h_2)^4}. \quad (16)$$

Требуемая мощность излучения передатчика составит:

$$P_1 = \frac{16q P_{\text{ш}} \pi^2 (h_1 + h_2)^4 e^{4\alpha h_2}}{\sigma_T S_A Q}. \quad (17)$$

Здесь: $Q = 4\pi \frac{S_A}{\lambda^2}$ – коэффициент направленности действия полуволнового вибратора

передающей антенны; σ_T – эффективная поверхность рассеивания радиоволны цилиндром трубы; $P_{\text{ш}} = k T_K^0 \Delta f$ – мощность шума на входе приемника; $k = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; $T_K^0 = 300^0$ К – температура шумов; S_A – эффективная площадь антенны.

Требуемое отношение сигнал/шум на входе приёмника определяется погрешностью измерения фазового сдвига, отражённого от трубы [6]

$$q = \frac{1}{\Delta\varphi^2}, \quad (18)$$

где: $\Delta\varphi = 2\pi f \frac{\delta}{C_r}$ (рад); f – несущая частота РЛС; δ – минимально регистрируемая амплитуда

вибрации; $C_r = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}}$ – скорость распространения радиоволн в грунте; ϵ_r – диэлектрическая

проницаемость в грунте; C – скорость света.

Принимая для численных расчётов следующие параметры:

$R = 0,5$ м; $f = 300$ МГц; $\lambda = 1$ м; $S_A = 0,25$ м²; $\Delta f = 10^4$ Гц; $\sigma_T = 5$ м²; $\sigma_r = 10^{-3} \frac{\text{Сим}}{\text{м}}$; $e^{4\alpha h_2} = 387$; $h_1 = 20$ м; $h_2 = 1,5$ м; $Q = 3,14$; $\delta = 10$ мкм = 10^{-5} м; $\epsilon_r = 9$; $\Delta\varphi = 2 \times 10^4$ рад, получим из (17) $P_1 = 0,4$ Вт.

Эта оценка мощности передатчика дана для узкополосного режима измерений [7]. Для электромагнитной развязки приемника РЛС возможна импульсная модуляция излучаемого радиосигнала в виде последовательности видеоимпульсов с длительностью $\tau_{\text{и}} = 3$ мс и периодом повторения $T = 200$ мс, либо радиоимпульсов, вмещающих по времени 10 периодов несущей частоты, т.е. $\tau_{\text{и}} = 30$ мс.

Импульсная мощность передатчика в случае излучения видеоимпульса увеличится в 10^4 раз соответствующего спектральной линии 300 МГц.

$$P_{1\text{и}} = 4 \text{ кВт.}$$

Диагностические параметры содержатся в радиосигнале, поступающем на вход приемника РЛС с мощностью:

$$P_3 = \frac{E_3^2}{W} \quad (19)$$

$$H_3(t) = \frac{E_2(t)Le^{2\alpha h_2}}{2\pi(h_1 + h_2)(Z_L + 2(Z_C + Z_{\text{III}}))} = \frac{E_3^2}{W} \quad (20)$$

где E_3 – напряженность электрического поля в районе приемника РЛС, которая может быть определена через напряженность магнитного поля $H_3(t)$, наведенного в трубе тока, где $W = 377$ Ом – волновое сопротивление воздуха.

Если за счет дефекта сварного шва его электрическое сопротивление Z_{III} становится много больше величин Z_L и Z_C , то амплитуда отраженного от трубы сигнала и его фазовый сдвиг

$$tg\varphi = \frac{1}{\omega CZ_{\text{III}}} \text{ будут нести информацию о качестве шва.}$$

При нарушении изоляции через место повреждения возникнут токи утечки, ортогональные оси трубы. Это будет отмечено появлением на поперечном вибраторе приемной антенны параметров соответствующего сигнала, амплитуда и фаза которого дадут информацию о повреждении изоляции.

Преимуществами заявленного способа перед внутритрубной дефектоскопией являются:

1. Высокая дальность и скорость обследования;
2. Низкая трудоемкость и скорость работ;
3. Получение дополнительных информационных параметров – повреждение изоляции

и контроль линии положения трубопровода в пространстве.

Ожидаемые характеристики системы дефектоскопии:

1. БПЛА самолетного типа с грузоподъемностью около 3 кг;
2. Высота полета 10–20 м;
3. Рабочая частота РЛС 300 МГц;
4. Мощность передатчика <1Вт.

Выводы

1. Дистанционная радиолокационная диагностика магистральных трубопроводов с использованием беспилотных летательных аппаратов позволяет оперативно производить кон-

троль целостности стенки трубы, состояния сварных швов и изоляции без вмешательства в технологический процесс перекачки углеводородов, дает возможность одновременно производить геопозиционирование линий положения трубопроводов под земной и водной поверхностью;

2. Для практического использования необходимо проведение экспериментальных работ на действующих магистралях.

Список литературы / References

[1] Многосекционный внутритрубный магнитный дефектоскоп. Патент РФ № 117186 от 20.06.2012 [Multi-section in-tube magnetic flaw detector. RF Patent No.117186 dated 06/20/2012 (In Rus.)]

[2] Устройство внутритрубной дефектоскопии. Патент РФ № 161019 от 10.04.2016 [The device of in-line flaw detection. RF Patent No. 161019 dated 04/10/2016 (In Rus.)]

[3] Магнитный дефектоскоп для наружного контроля труб большого диаметра. Патент РФ № 75750 от 20.08.2008 [Magnetic flaw detector for external inspection of large diameter pipes. RF Patent No. 75750 dated 08/20/2008 (In Rus.)]

[4] Дмитриев А. В., Соколов В. Г., Березнёв А. В. Исследование параметра длины и продольной сжимающей силы по определению частот свободных колебаний подземных тонкостенных газопроводов большого диаметра. *Интернет-журнал «Транспортные сооружения»*, 2019, 3, https://t-s.today/PDF/40SATS_319.pdf (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/40SATS_319 [Dmitriev A. V., Sokolov V. G., Bereznev A. V. Investigation of the parameter of length and longitudinal compressive force to determine the frequencies of free vibrations of underground thin-walled gas pipelines of large diameter. *Online magazine “Transport facilities”*, 2019, 3, https://t-s.today/PDF/40SATS_319.pdf (access is free). Cover from the screen. Russian, English DOI: 10.15862/40SATS_319 (In Rus.)]

[5] Дмитриев А. В. Исследование частоты свободных колебаний для трубопроводов с различными физико-механическими свойствами материала. *Интернет-журнал «Транспортные сооружения»*, 2020, 1, https://t-s.today/PDF/04SATS_120.pdf (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI:10.15862/04SATS_120 [Dmitriev A. V. Investigation of the frequency of free oscillations for pipelines with various physical and mechanical properties of the material. *Online magazine “Transport Facilities”*, 2020, 1, https://t-s.today/PDF/04SATS_120.pdf (access is free). Cover from the screen. Russian, English DOI:10.15862/04SATS_120 (In Rus.)]

[6] Чмых М. К. *Цифровая фазометрия*. М.: Радиосвязь. 1993. 184 [Chmykh M. K. *Digital phasometry*. Moscow. Radiosvyaz. 1993. 184 (In Rus.)]

[7] Шайдуров Г. Я. Способ радиолокации Патент РФ № 2797828 от 27.07.2022. [Shaidurov G. Ya. Radar method RF Patent No.2797828 dated 07/27/2022 (In Rus.)]