

УДК 621.391.826.2; 621.391.826.6

Б.И. Авдоченко

## Моделирование повреждений трубопроводов при зондировании субнаносекундными импульсами

Показана возможность моделирования внутреннего состояния трубопровода по результатам исследования рефлектограммы. Определена разрешающая способность по размерам повреждений, расстоянию. Приводятся результаты эксперимента.

**Ключевые слова:** трубопровод, зондирование, субнаносекундный импульс, распространение, разрешающая способность, переходная характеристика, модель.

### Введение

Существующие способы проверки и контроля состояния трубопроводов (рентгеновские установки, ультразвуковые приемопередатчики и т.д.) требуют значительных затрат времени и материальных средств и не позволяют создать недорогую, гибкую и мобильную систему мониторинга состояний трубопроводов. Перед нами была поставлена задача по определению возможности исследования внутреннего состояния трубопроводов радиолокационными методами.

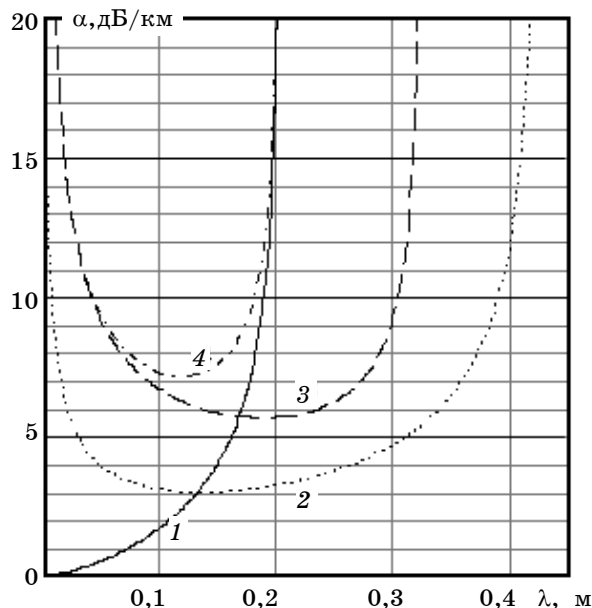
В [1] показана возможность измерения параметров объектов неэлектрической природы при зондировании короткими импульсами пикосекундной длительности. Спектр такого сигнала занимает частоты от нескольких герц, до десятков гигагерц.

Высокочастотная часть этого спектра может распространяться по трубопроводу, который представляет собой круглый волновод невысокого качества с небольшим затуханием. Дефекты трубопровода (участки коррозии, стыки труб, трещины, сквозные повреждения) являются неоднородностями, которые могут быть обнаружены и классифицированы при зондировании импульсными или непрерывными сигналами.

### Распространение сверхширокополосных сигналов внутри трубопровода

Для определения возможностей применения радиолокационного метода измерения для определения состояния трубопровода использовалась теория волноводов.

Основным параметром, определяющим возможность использования СВЧ-излучения для проверки трубопроводов, является затухание сигнала в трубопроводе. Теоретическая зависимость коэффициента затухания для различных типов волн в трубопроводе диаметром 25 см приведена на рис. 1.



Из рисунка следует, что в волноводе могут распространяться волны различного типа с длиной волны меньше критической ( $\lambda_{кр}$ ), затухание в трубопроводе резко увеличивается с увеличением длины волны. Эти длины волн соответствуют спектру излучаемого сигнала соответственно выше 750 МГц, 1, 1,670 ГГц.

При излучении сигнала с таким спектром затухание, при хорошем качестве сварных швов, гладкой внутренней поверхности трубопровода и в отсутствие внутренних поглощающих предметов и жидкостей (вода, грязь и т.п.), должно быть не более 10 дБ/км.

Рис. 1. Зависимость коэффициента затухания для различных типов волн в трубопроводе диаметром 25 см: 1 –  $H_{01}$ , 2 –  $H_{11}$ , 3 –  $E_{01}$ , 4 –  $E_{11}$

Для волн типа  $H_{11}$ ,  $E_{01}$ ,  $E_{11}$  при длине волны менее 0,1 м (3 ГГц) коэффициент затухания быстро увеличивается за счет увеличения потерь в трубопроводах.

Таким образом, спектр зондирующего сигнала передатчика должен быть 0,75–3 ГГц для достижения максимальной дальности зондирования.

**Потенциальная точность определения размеров повреждений в трубопроводах**

При постоянном внутреннем сечении трубопровода характеристическое сопротивление постоянно и сигнал внутри трубопровода распространяется без отражений. При изменении характеристического сопротивления, вызванного изменениями сечения трубопровода (участки коррозии, механические повреждения, сварные швы, внутренние микротрещины, посторонние предметы), появляется отраженный сигнал, который может быть зарегистрирован приемником. Величина коэффициента отражения связана с характеристическим сопротивлением известным выражением

$$\Gamma = \frac{Z_0 - \Delta Z(t)}{Z_0 + \Delta Z(t)}, \tag{1}$$

где  $Z_0$  – характеристическое сопротивление недеформированного участка трубопровода,  $\Delta Z(t)$  – изменение характеристического сопротивления, вызванные неоднородностями в волноводе.

По времени задержки отраженного сигнала относительно зондирующего определяется расстояние до неоднородности, а по зависимости  $\Delta Z(t)$  можно определить характер неоднородности.

На рис. 2 приведена расчетная зависимость коэффициента отражения от относительного изменения диаметра трубопровода для различных типов волн при длине волны  $0,7\lambda_{крH_{01}}$ , где  $\lambda_{крH_{01}}$  – критическая длина волны для типа  $H_{01}$ .

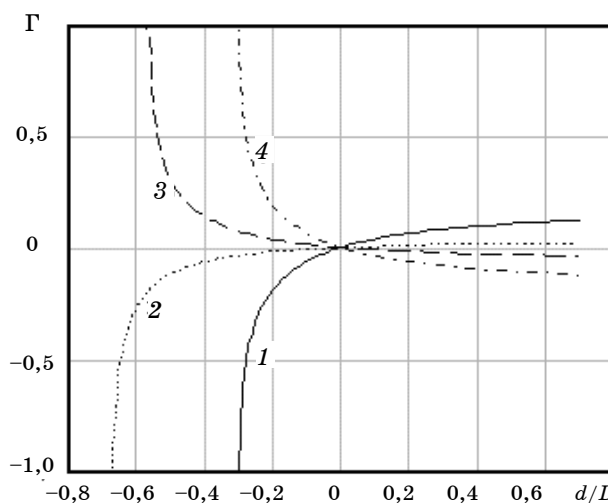


Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения от относительного изменения диаметра трубопровода для разных типов волн (длина волны  $0,7\lambda_{крH_{01}}$ ): 1 –  $H_{01}$ ; 2 –  $H_{11}$ ; 3 –  $E_{01}$ ; 4 –  $E_{11}$

Из рис. 2 видно, что наибольшей чувствительностью к изменению диаметра обладают волны типа  $H_{01}$  и  $E_{11}$ .

На рис. 3 показана расчетная зависимость коэффициента отражения волны типа  $H_{01}$  от относительного диаметра для разных длин волн.

Из рис. 3 видно, что с уменьшением длины волны чувствительность уменьшается, но увеличивается измеряемый диапазон коэффициентов отражения.

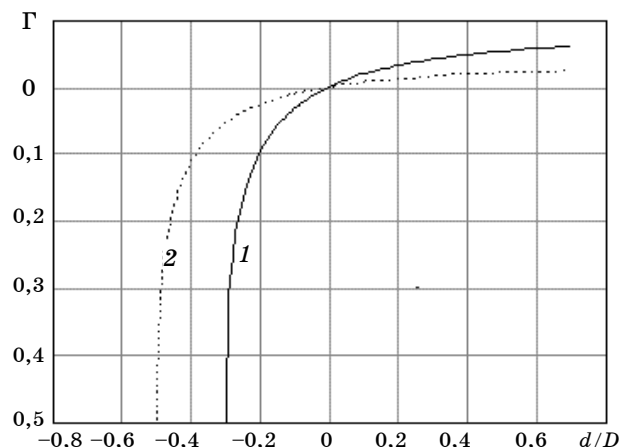


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения от относительного изменения диаметра трубопровода для волны типа  $H_{01}$  при разных длинах волн: 1 –  $\lambda_1 = 0,7\lambda_{крH_{01}}$ ; 2 –  $\lambda_2 = 0,5\lambda_{крH_{01}}$

Из расчетов следует, что крутизна зависимости коэффициента отражения от изменения диаметра (величины деформации) в точке с нулевым коэффициентом отражения для волны типа  $H_{01}$ :

$$S = \frac{d\Gamma(x)}{dx} = 1,992 \text{ [1/м]}, \tag{2}$$

Достигаемая современными приборами точность измерения коэффициентов отражения составляет 0,1%. Для длины волны  $\lambda_1 = 0,7\lambda_{крH_{01}}$ , используя (2), получаем разрешающую способность по изменению диаметра трубопровода:

$$\Delta d = \frac{0,001}{1,992} = 0,502 \text{ мм.} \quad (3)$$

Разрешающая способность по дальности (размерам неоднородностей), без учета дисперсии, полностью определяется временными параметрами зондирующего импульса:

$$\Delta R = \frac{C \cdot \tau_{\Phi}}{2}, \quad (4)$$

где  $C$  – скорость света;  $\tau_{\Phi}$  – длительность фронта зондирующего сигнала.

При использовании импульса с длительностью фронта 100 пс разрешающая способность составит 1,5 см.

Аппаратная ошибка определения координаты неоднородности составит:

$$\Delta X = \frac{C \cdot T_d}{2}, \quad (5)$$

где  $T_d$  – дискретность измерения временного интервала.

При дискретности измерения 100 пс аппаратная ошибка составит 1,5 см.

#### Выводы по результатам теоретических исследований

На основании теоретических исследований сделаны следующие выводы.

Использование при зондировании коротких импульсов пикосекундной длительности, при отсутствии дисперсии, позволит обнаруживать участки внутренней коррозии с глубиной повреждения от 0,5 мм до сквозного повреждения, с размерами участка коррозии от единиц миллиметров, погрешность определения расстояния до участка неоднородности – от 1,5 см.

Для зондирования трубопроводов диаметром 25 см наиболее пригодными являются сигналы со спектром 0,75–3 ГГц, тип используемой волны  $H_{01}$ .

#### Аппроксимация отраженного сигнала

Отраженный от неоднородностей трубопровода сигнал представляет собой переходную характеристику (ПХ) трубопровода, снятую методом рефлектометрии. Исследование ПХ позволяет определить характеристики неоднородностей в трубопроводе.

Для описания переходной характеристики в качестве ортогональной функции используется единичная дискретная функция [2]

$$Q_i(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } i\Delta t \leq t < (i+1)\Delta t, \\ 0 & \text{при } i\Delta t > t \geq (i+1)\Delta t, \end{cases}$$

где  $\Delta t$  – дискретность измерения временного интервала, определяемая разрешающей способностью по дальности.

Для этого ПХ разбивается на  $n$  интервалов длительностью  $\Delta t$  и, используя функцию  $Q_i(t)$  как временное окно, последовательно определяются значения переходной характеристики и изменения переходной характеристики в виде  $\hat{h}_{i+1}(t) = \hat{h}_i(t) + \Delta \hat{h}_i(t)$ , где  $\Delta \hat{h}_i(t) = \hat{h}_{i+1}(t) - \hat{h}_i(t)$  – изменение переходной характеристики при переходе от временного интервала  $i$  к интервалу  $i+1$ . Результирующая ПХ может быть описана в виде

$$h(t) = h_0(t) + \sum_{n=1}^{\infty} a_n h_0(t - T_n).$$

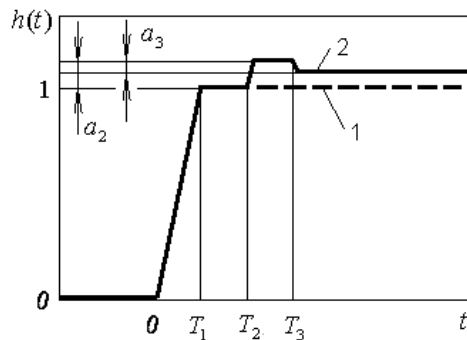


Рис. 4. Аппроксимация переходной характеристики: 1 – ПХ при отсутствии неоднородностей,  $h_0(t)$ , 2 – ПХ при наличии неоднородностей; значения  $a_2$  и  $a_3$  – нормированные изменения  $\Delta h(t)$

Например, аппроксимируя ПХ, приведенную на рис. 4, ступенчатой функцией, с постоянными значениями внутри интервала, получим выражение

$$\hat{h}(t) = \hat{h}_0(t) + \Delta \hat{h}_k(t) = h_0(t) + a_2 h_0(t - T_2) - a_3 h_0(t - T_3). \quad (6)$$

На основе аппроксимированной ПХ, как показано в [2], может быть построена структурная модель устройства.

#### Структурная модель трубопровода

Анализ внутреннего состояния трубопровода удобно проводить по параллельной многоканальной модели. В модели используются многоканальные разветвители, сумматоры, линии задержки и нормирующие устройства.

На рис. 5 приведена модель, описывающая отражающие свойства трубопровода, с помощью кото-

рой могут быть определены расстояния до двух неоднородностей в трубопроводе и их характеристики.

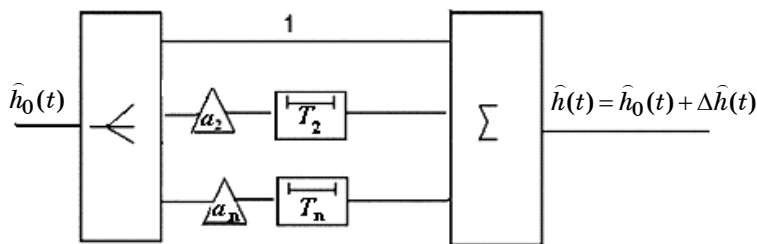


Рис. 5. Модель трубопровода с двумя неоднородностями

В этой модели коэффициенты  $a_n$ , соответствующие коэффициенту отражения, описывают характер неоднородности. По известной зависимости коэффициента отражения от расстояния, в соответствии с выражением (2), может быть определена крутизна коэффициента отражения и ее изменение по расстоянию, которая описывает величину и характер деформации  $n$ -го участка трубопровода, соответствующего задержке  $T_n$ . По временной задержке определяется местоположение участка деформации.

Преимуществом предложенной модели трубопровода являются наглядность и возможность независимого исследования отдельных участков трубопровода.

#### Определение элементов модели

Размеры дефектных участков трубопровода могут быть определены по протяженности участка изменения крутизны коэффициента отражения на основе графика, приведенного на рис. 2. Участки ржавчины изменяют условия прохождения токов смещения, что также вызывает отражения от неоднородностей. В отличие от изменения внутренних размеров трубопровода, участки ржавчины изменяют фазовые соотношения в спектре сигнала. Для классификации характера неоднородности необходимо дополнительно исследовать спектральные изменения в отраженном сигнале путем выделения переходной характеристики анализируемого участка, преобразования Фурье, определения неминимально-фазовой части спектральной характеристики и сравнения со спектром зондирующего сигнала.

Алгоритм выделения неминимально-фазовой части фазовой характеристики приведен в [1].

Повреждения трубопровода по характеру неоднородности могут быть классифицированы на основе экспериментально полученной базы данных.

#### Экспериментальное исследование трубопровода с помощью импульсного сигнала

Для экспериментальной проверки условий распространения импульсного сигнала в трубопроводе была разработана установка, в которую входили:

- передатчик импульсов с амплитудой выходного сигнала 400 В, временем нарастания переднего фронта менее 0,1 нс, длительностью импульса более 1 нс;
- приемник широкополосный с полосой пропускания 100 МГц – 4 ГГц, чувствительностью 200 мкВ при отношении сигнал/шум больше 2, коэффициентом усиления 60 дБ;
- дискретный аттенюатор на 43 дБ, с полосой пропускания 7 ГГц;
- специальная антенна для трубопровода диаметром 25 см с линейной фазочастотной характеристикой, полосой рабочих частот 500 МГц – 4 ГГц.

Экспериментальные исследования проводились на строящихся участках газопровода в п. Мыльджино Томской области. Исследовались участки трубопроводов различной длины – от 11,3 м до 2 км.

Были проведены следующие испытания:

- Измерение уровня затухания в трубопроводах диаметром 20 и 25 см.
- Исследование возможности обнаружения сквозных отверстий в трубопроводах. Исследования проводились путем перемещения приемной антенны снаружи, вдоль трубопровода, при размещении передатчика импульсов внутри открытого конца трубопровода. Оценивалась величина затухания сигнала при прохождении через малые отверстия в трубопроводе различной конфигурации.

– оценка изменения плоскости поляризации и изменения степени поляризации с целью определения вида сквозного отверстия.

#### Результаты экспериментальных исследований

- Среднее затухание сигнала составило от 2 до 3 дБ на 100 м трубопровода.

– Щелевые отверстия длиной 50 мм и круглые отверстия диаметром 12 мм обнаруживаются на расстоянии 10 м и более, при расположении трубопровода на глубине более 2 м при сухом грунте.

– Наличие поляризации позволяет определить конфигурацию отверстий и ориентацию щели относительно оси трубопровода.

– Наличие дисперсии при распространении импульса внутри трубопровода уменьшает длину диагностированного участка до 200–300 м при заданной разрешающей способности (3 см).

#### **Выводы по результатам исследований**

В результате исследований подтверждена возможность применения теории волноводов для расчетов условий распространения волны в трубопроводах с поправкой на качество материала и наличие стыковочных сварных швов. В трубопроводе затухание в 2,5–3 раза больше, чем в идеальном волноводе.

Экспериментальные исследования подтвердили возможность разработки прибора для поиска повреждений и экспресс-диагностики внутренних состояний трубопроводов. Без компенсации дисперсии возможно обнаружение участков коррозии глубиной менее 1 мм, длиной менее 3 см в плети длиной 200–300 м.

#### *Литература*

1. Глебович Г.В. Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов / Г.В. Глебович, А.В. Андрианов, Ю.В. Введенский и др. – М.: Радио и связь, 1984. – 256 с.

2. Ильюшенко В.Н. Пикосекундная импульсная техника / В.Н. Ильюшенко, Б.И. Авдоченко, В.Ю. Баранов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 365 с.

---

#### **Авдоченко Борис Иванович**

Канд. техн. наук, доцент каф. радиоэлектроники и защиты информации ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-33-65

Эл. почта: AvdochenkoBI@rzi.tusur.ru

Avdochenko B.I.

#### **Simulation of pipeline damages while its sounding by subnanosecond pulses**

A possibility of pipeline internal state simulation by using the reflectograms analysis is shown. The resolution in size of damage and range is determined. The experiment results are presented.

**Keywords:** pipeline, csounding, subnanosecond pulse, propagation, resolution, transient response, model.

---