

Идентификация повреждения трубопровода с использованием тензодатчиков

Утяшев И.М.^{*,**}, Ахтямов А.М.^{*,**}

^{*}Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН, Уфа

^{**}Башкирский государственный университет, Уфа

Возникают ситуации, когда происходит прорыв трубопровода с нефтепродуктами, находящегося под водой. В результате нефть разливается на поверхности, загрязняя окружающую среду. Подводные течения и ветер могут унести нефтяное пятно далеко от места утечки. Поэтому визуально определить место прорыва трубопровода по пятну нефти на поверхности не всегда представляется возможным.

Для решения подобных задач предлагается установка вдоль трубопровода тензодатчиков, которые снимают значения производной смещения $\frac{\partial u(x,t)}{\partial x}$ (деформации) в различные моменты времени, а также использование простейшей модели трубопровода, в основе которой лежат уравнения продольных колебаний однородного стержня.

Получены формулы определения момента и места разрыва трубопровода по данным тензодатчика и предложена схема взаимодействия с ГЛОНАСС, которая позволяет мгновенно обнаруживать места утечек и повреждений трубопроводов, проложенных под водой, и своевременно ликвидировать последствия аварии. Применение предложенной схемы минимизирует последствия аварии для окружающей среды и финансовые издержки.

1. Введение

Возникают ситуации, когда происходит прорыв трубопровода с нефтепродуктами, находящегося под водой. В результате нефть разливается на поверхности, загрязняя окружающую среду. Подводные течения и ветер могут унести нефтяное пятно далеко от места утечки. Поэтому визуально определить место прорыва трубопровода по пятну нефти на поверхности не всегда представляется возможным. Место прорыва может быть определено с помощью определенных датчиков, встроенных в трубопровод изначально.

2. Цели и задачи

На рис. 1 предложена схема поиска повреждения трубопровода, находящегося на дне моря. Основной принцип заключается в том, что при разрыве трубы (на схеме точка «а») возникают продольные волны, которые распространяются вдоль трубопровода. В некоторый момент эти волны достигают тензодатчиков «b», которые расположены вдоль всего трубопровода с некоторым периодом. Эти датчики регистрируют возмущение, определяют свое текущее положение через систему глобального позиционирования ГЛОНАСС (на схеме точка

«с») и подают сигнал на пульт управления. Данный сигнал состоит из координат датчика, времени прихода первой волны и графика возмущений. Автоматизированная система управления (компьютер), после обработки полученного графика, выдает характер возможных повреждений, его местоположение и время возникновения. Возможная утечка нефти перепроверяется с помощью датчиков давления. Если подтверждается падение давления на данном участке, подается команда на закрытие соответствующих автоматических задвижек в трубопроводе. Через систему ГЛОНАСС подается предупреждающий сигнал кораблям, находящимся поблизости от места аварии. Кроме того, тут же дается указание к выдвигению к найденному месту происшествия (координаты которого определены по найденным формулам) команды специалистов для устранения последствий аварии и сбора разлившихся нефтепродуктов.

Разрыв трубопровода можно рассматривать как одиночный удар, либо взрыв, или как развивающуюся трещину, тогда возмущения будут слабыми по мощности, но более продолжительными. Признаками того, что имеются повреждения, может также служить и падение давления на линии.

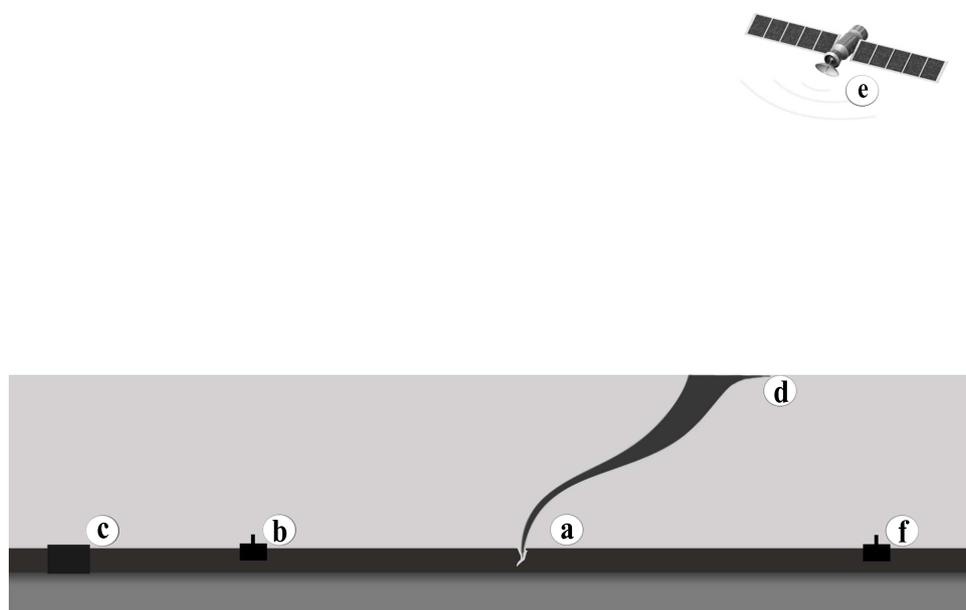


Рис. 1. Схема разрыва трубопровода на дне моря: *a* — место утечки; *b* — тензодатчик; *c* — система ГЛОНАСС, *d* — разлив нефтепродуктов на поверхности

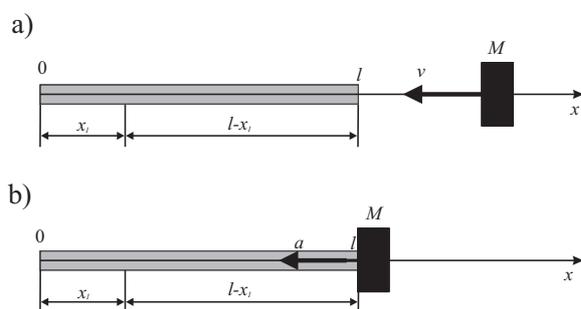


Рис. 2. Схема удара груза массой M по стержню в момент времени t_0 : *a* — состояние до удара; *b* — после удара

3. Методы исследования

Вопрос о месте разрыва трубопровода решается с помощью упрощения на основе математической модели о продольных колебаниях стержня. Более точно рассматривается цилиндрический стержень, оба конца которого свободны (см. рис. 2(а)).

В какой-то момент времени t_0 свободный конец подвергается удару груза массы M , движущегося вдоль оси со скоростью v . Решается задача определения момента времени t_0 удара, длины стержня l , массы груза M и скорости v по данным датчика, который снимает значения деформации $\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)$ се-

чения стержня с абсциссой x_1 в различные моменты времени t (см. рис. 2(б)). Модуль упругости стержня, площадь его поперечного сечения S и объемная плотность ρ считаются известными.

Данная задача принадлежит к классу обратных ретроспективных задач [1]. Близкие по постановке задачи рассмотрены в работах [2–6]. В [2] рассматривается аналогичная задача для стержня с встроенным сейсмодатчиком, а не тензодатчиком, как в настоящей работе. В работе [3] установлена аналитическая зависимость между характерами трещиноподобного дефекта и показателями прочностных и гидравлических свойств трубопроводов в виде математических моделей. В [4] предложен метод диагностики подземных трубопроводов, в [5] рассмотрены обратные динамические задачи для дифференциальных уравнений теории упругости, в [6] решена задача для струны с двумя датчиками. В [7] предложено использование спутниковой связи в автоматизированной навигационной системе диспетчерского контроля и учета работы транспорта нефтедобывающих предприятий. Однако поставленная здесь задача отличается от перечисленных как по постановке, так и по методу решения.

Как известно, уравнение продольных колебаний однородного стержня имеет вид [8, 9]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad \left(a = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \right). \quad (1)$$

Граничное условие на левом конце ($x = 0$) будет, очевидно,

$$u_x(0, t) = 0. \quad (2)$$

Далее, уравнение движения груза под действием силы реакции стержня, которая равна по величине усилию в сечении $x = l$ стержня и направлена в противоположную сторону, имеет вид:

$$ml \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \Big|_{x=l} = -a^2 \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=l}, \quad (3)$$

где через $m = \frac{M}{\rho Sl}$ обозначено отношение массы движущегося груза к массе стержня.

Начальные условия записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} u|_{t=t_0} &= 0 \text{ при } 0 \leq x \leq l, \\ \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{t=t_0} &= 0 \text{ при } 0 \leq x \leq l, \\ \frac{\partial u}{\partial t} &= -v \text{ при } t = t_0, x = l. \end{aligned} \quad (4)$$

Второе начальное условие означает, что в момент удара движущегося груза все промежуточные сечения стержня имеют скорость равную нулю, а скорость конца стержня равна скорости груза.

Решение начально-краевой задачи (1), (2), (3), (4) известно (см., например, [9]). Нас же интересует обратная к (1), (2), (3), (4) задача.

В терминах начально-краевой задачи (1), (2), (3), (4) интересующую нас обратную задачу можно сформулировать так: известна величина a и значения $\frac{\partial u}{\partial x}$ в точке x_1 при изменении временного параметра t . Требуется определить l, t_0, m, v .

4. Результаты

Определим сначала момент t_0 удара груза и длину стержня l . Для этого воспользуемся тем, что скорость распространения продольных волн стержня постоянна и равна a (см., например, [8]). До удара груза стержень находился в состоянии покоя. При ударе по стержню возникают продольные колебания. Первоначально по стержню распространяется только обратная волна ($u(x, t) = -\varphi(at - at_0 + x)$). В какой-то момент времени t_1 она достигнет точки $x = x_1$ и будет зафиксирована датчиком. Момент t_1 — это момент перехода с $u(x_1, t) = 0$ к $u(x_1, t) < 0$. При $t = t_0 + l/a$ обратная волна достигнет закрепленного конца и при $t_0 + l/a < t < t_0 + 2l/a$ к ней прибавится отраженная волна $\varphi(at - at_0 - x)$, т. е. решение будет иметь вид $u(x, t) = \varphi(at - at_0 - x) - \varphi(at - at_0 + x)$. В некоторый момент t_2 датчиком будет зафиксирован минимум

функции $u(x_1, t)$ в интервале $t_0 + l/a < t < t_0 + 2l/a$. При $t = t_0 + 2l/a$ волна $\varphi(at - at_0 - x)$ отразится от конца $x = l$, так что слагаемое $\varphi(at - at_0 + x)$ в представлении $u(x, t)$ в интервале $t_0 + 2l/a < t < t_0 + 3l/a$ будет иметь уже другое выражение. В какой-то момент t_3 датчиком будет зафиксирован максимум функции $u(x_1, t)$ в интервале $t_0 + 2l/a < t < t_0 + 3l/a$.

За время $T = t_3 - t_2$ волна пройдет расстояние $S = 2(l - x_1)$. Поскольку она движется со скоростью a , имеем $a = S/T$. Откуда

$$l = x_1 + a(t_3 - t_2)/2. \quad (5)$$

Зная l легко найти t_0 . После момента удара по стержню ($t = t_0$) распространяется только обратная волна ($u(x, t) = -\varphi(at - at_0 + x)$). Она достигнет точки $x = x_1$ в момент времени t_1 . За время $t_1 - t_0$ волна со скоростью a пройдет расстояние $l - x_1$. Следовательно,

$$t_0 = t_1 - (l - x_1)/a. \quad (6)$$

Как известно [9], $u(x_1, t) = \varphi(a(t - t_0) + x_1) = -\frac{mlv}{a} (1 - \exp(-\frac{at - at_0 + x_1 - l}{ml}))$ при $t_0 < t < t_0 + l/a$, $\frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=x_1} = \frac{\partial}{\partial x} (\varphi(a(t - t_0) + x)) \Big|_{x=x_1} = -\frac{v}{a} \exp\left(-\frac{at - at_0 + x_1 - l}{ml}\right)$ при $t_0 < t < t_0 + l/a$.

Выбрав два известных значения $\frac{\partial u(x, t)}{\partial x}$ в точке $x = x_1$ при различных значениях $t = t_1^*$ и $t = t_2^*$ ($t_1^*, t_2^* \in (t_0, t_0 + l/a)$), получим систему двух уравнений от двух неизвестных m и v :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u(x, t_1^*)}{\partial x} \Big|_{x=x_1} &= -\frac{v}{a} \exp\left(-\frac{at_1^* - at_0 + x_1 - l}{ml}\right), \\ \frac{\partial u(x, t_2^*)}{\partial x} \Big|_{x=x_2} &= -\frac{v}{a} \exp\left(-\frac{at_2^* - at_0 + x_1 - l}{ml}\right), \end{aligned} \quad (7)$$

В качестве t_1^* и t_2^* можно выбрать, например, следующие значения:

$$t_1^* = \frac{4l - 3x_1}{4a} + t_0, \quad t_2^* = \frac{2l - x_1}{2a} + t_0. \quad (8)$$

Обозначим $\frac{\partial u(x, t_1^*)}{\partial x} \Big|_{x=x_1}$ через k_1 и $\frac{\partial u(x, t_2^*)}{\partial x} \Big|_{x=x_1}$ через k_2 .

Подставив эти значения в (7), получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} k_1 &= -\frac{v}{a} \exp\left(-\frac{x_1}{4ml}\right), \\ k_2 &= -\frac{v}{a} \exp\left(-\frac{x_1}{2ml}\right). \end{aligned} \quad (9)$$

Обозначим $\exp\left(-\frac{x_1}{4ml}\right)$ через y . Тогда система (9) запишется в виде:

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{v}{a}y, \\ vk_2 &= \frac{v}{a}y^2. \end{aligned} \quad (10)$$

Из системы (10) видно, что $y = \frac{k_2}{k_1}$. Следовательно, $\exp\left(-\frac{x_1}{4ml}\right) = \frac{k_2}{k_1}$. Откуда $-\frac{x_1}{4ml} = \ln \frac{k_2}{k_1}$ и

$$m = -\frac{x_1}{4l \ln \frac{k_2}{k_1}}. \quad (11)$$

Из первой формулы системы (9) получим: $-\frac{v}{a} \exp\left(-\frac{x_1}{4ml}\right) = \frac{\partial u(x, t_1^*)}{\partial x} \Big|_{x=x_1}$ и, следовательно:

$$v = -\frac{a \frac{\partial u(x, t_1^*)}{\partial x} \Big|_{x=x_1}}{e^{-\frac{x_1}{4ml}}}. \quad (12)$$

Таким образом, поставленная обратная задача решена. Неизвестные l , t_0 , m , v последовательно находятся по формулам (5), (6), (11), (12).

5. Заключение

Применение ГЛОНАСС в комплексе с встроенными в трубопровод тензодатчиками, а также автоматизированной системой управления, использующей полученные формулы и программу, может своевременно обнаруживать места утечек и повреждений трубопроводов, определять время и место разрыва трубопровода и тем самым минимизировать последствия аварии для природы и финансовые издержки для компании. Эта же модель также применима для поиска и предотвращения незаконной врезки в трубопровод, так как в процессе сверления будут возникать акустические волны, которые могут быть зарегистрированы тензодатчиками.

Список литературы

- [1] Ватульян А.О. Обратные задачи в механике деформируемого твердого тела. М.: Физматлит, 2007. 224 с.
- [2] Ахтямов А.М. Определение массы, скорости движения груза и места его удара по стержню с помощью продольных смещений одного из сечений стержня // Контроль. Диагностика. 2007. № 11. С. 59-60.
- [3] Лютикова М.Н. Модель влияния оценки трещиноподобных дефектов на прочностные и гидравлические свойства трубопроводов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2012. № 2. С. 38-40.
- [4] Сидоров Б.В., Мартынов С.А. Рекомендуемая технология диагностики подземных трубопроводов // Контроль. Диагностика. 2005. № 12. С. 18-19.
- [5] Яхно В.Г. Обратные задачи для дифференциальных уравнений упругости. Новосибирск: Наука, 1990.
- [6] Ахтямов А.М., Утяшев И.М. Ретроспективная задача распространения поперечных волн // Контроль. Диагностика 2010. № 4. С. 36-38.
- [7] Губанов А.И., Николаев А.Б., Остроух А.В., Ефименко Д.Б. Концепция автоматизированной навигационной системы диспетчерского контроля и учета работы транспорта нефтедобывающих и нефтеперерабатывающих предприятий // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2011. № 11. С. 12-14.
- [8] Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Дифференциальные уравнения математической физики. М.: Физматгиз, 1962. 768 с.
- [9] Будаков Б.М., Самарский А.А., Тихонов А.Н. Сборник задач по математической физике: учеб. Пособие. 3-е изд. М.: Наука, 1980. 688 с.