Способ измерения уровня веществ в закрытых резервуарах с помощью звуковых волн

А. С. Манаков, А. В. Теплякова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) smasheralchemist@gmail.com, smaest@mail.ru

Аннотация. Рассматривается возможность применения закономерностей распространения акустических волн и изменении их параметров для измерения уровня вещества в закрытом сосуде. Приводятся результаты эксперимента по исследованию зависимости затухания регистрируемого сигнала от уровня вещества в моделируемом резервуаре. Производится сравнение характеристик работы измерительного прибора в зависимости от параметров пьезоэлектрических преобразователей.

Ключевые слова: уровнемерные устройства; ультразвуковой уровнемер; измерение уровня; жидкости

I. Введение

Среди приборов-уровнемеров, применяемых для измерения уровня как жидких, так и твердых сыпучих тел, использующих в своей основе физические процессы звуковых распространения волн. наибольшим распространением обладают приборы, излучающие звуковые волны перпендикулярно к поверхности контролируемого вещества. При данной схеме работы в качестве информативного параметра выступает время, за которое волна регистрируется после излучения и отражения ОТ этой поверхности. Это время пересчитывается в расстояние от излучающего элемента уровнемера до вещества, а затем - в уровень этого вещества в данном резервуаре, при известных его параметрах [1]-[2].

Для реализации подобного метода измерения могут использованы различные конструктивные быть решения – использование поплавка или зонда, либо установка приемника и излучателя волн. не контактирующих с веществом. Общим свойством всех этих решений является необходимость размещения элементов измерительного прибора внутри резервуара, что затрудняет проведение измерений в случае, когда доступ к внутреннем объему ограничен, например, из-за химической агрессивности вещества или повышенной его испаряемости, при высоких температуре или давлении в резервуаре, либо по иной причине, не позволяющей разместить прибор внутри сосуда. Для неприменимости решения проблемы наиболее распространенных уровнемеров в таких случаях предлагается рассмотреть реализацию метода измерения уровня жидких и твердых тел с использованием звуковых волн, при котором элементы конструкции прибора полностью располагаются снаружи резервуара с веществом.

II. Постановка задачи

Измерение уровня химически агрессивного вещества необходимо проводить в закрытом стальном резервуаре, внутри которого поддерживается повышенное давление,

что обуславливает невозможность внутреннего монтажа. Доступ к внешней стенке резервуара также ограничен и установка возможна только на небольшом ее участке. Физические характеристики вещества, такие как скорость распространения звуковых волн и плотность, считаются известными. В рамках данного исследования предполагается, что данным веществом является вода.

Излучатель и приемник ультразвуковых волн располагаются на стенке резервуара, как показано на рис. 1. При такой схеме прозвучивания волна распространяется вдоль длины стенки сосуда, отражаясь от внешней и внутренней границы – на рис. 1 приведена траектория волны с условным обозначением направления распространения звука. На рисунке также пьезоэлектрические обозначены используемые излучатели (ПЭП): 1 – излучатель, 2 – приёмник.



Рис. 1. Модель резервуара и траектория распространения волны

При падении волны на границу раздела двух сред происходит прохождение волны через эту границу и отражение волны от нее. Количественно данные явления характеризуются коэффициентами прозрачности и отражения соответственно, определяемые акустическими импедансами граничащих сред. В случае границы стальвоздух волна практически полностью отражается от нее, но в случае границы сталь-жидкость коэффициент прозрачности не является пренебрежительно малым. Поэтому, при распространении волна претерпевает обуславливаемое затухание, затуханием непосредственно в стенке резервуара, а также переходом части энергии волны в вещество и рассеиванием в нем. От уровня вещества в резервуаре зависит количество точек, в которых происходит прохождение волны через границу раздела – чем больше таких точек, тем сильнее конечное затухание звука.

Изменение амплитуды волны при ее распространении можно описать уравнением акустического тракта [3]–[4]. Данное уравнение для случая использования наклонного преобразователя и падения волны на бесконечную плоскость, с учетом отражения от границы стальжидкость, выглядит следующим образом:

$$A = F_T R^N e^{-(L\delta_s + \Delta_P)}$$

где A – амплитуда регистрируемого сигнала; F_T – функция, описывающая влияние преобразователя и расхождения звукового пучка на амплитуду сигнала, R – коэффициент отражения для границы сталь-вода, N – количество точек отражения волны от границы стальвода, L – длина пути волны δ_s – коэффициент затухания в материале сосуда, Δ_p – компонента затухания в призме преобразователя.

Коэффициент отражения для границы сталь-жидкость определяется согласно следующему выражению:

$$R = \frac{Z_s - Z_w \cos^2(2\theta_1)}{Z_s + Z_w \cos^2(2\theta_1)}$$

где Z_s, Z_w – наклонные импедансы для стали и воды соответственно; θ_l – угол падения волны на границу раздела.

Расстояние, пройденное волной в стенке сосуда, определяется согласно следующему выражению:

$$L = N_{\max} r$$

где N_{max} – количество отражений волны от внутренней стенки сосуда; r – расстояние, преодолеваемое волной между двумя точками отражения.

III. Теоретическое исследование затухания акустической волны

Для теоретического исследования характера изменения параметров звуковой волны в резервуаре с диаметром поперечного сечения 1000 мм и толщиной стенки 10 мм было произведено геометрическое построение фрагмента данного резервуара и траектории распространения звуковой волны, излучаемой в его стенку. Пример такого построения приведен на рис. 2:



Рис. 2. Траектория отраженной волны

Из построений, аналогичных приведенному на рис. 2 для других углов ввода, определяются путь волны между двумя точками отражения от границы раздела сред, максимальное количество отражений при проходе волной всей длины стенки, а также угол падения волны на границу сред. Используя эти значения и другие известные параметры, с помощью математического пакета «MATHCAD» становится возможным провести анализ уравнения акустического тракта.

При анализе уравнения акустического тракта становится возможным произвести выбор оптимальных параметров излучения ультразвука – частоты и угла ввода. При проведении расчетов было установлено, что зависимость уровня принятого сигнала от частоты звука имеет выраженный максимум, в рассматриваемом случае равный 2 МГц. Таким образом, можно сделать вывод, что для реальных резервуаров большого размера оптимально использование низких частот ультразвука. При исследовании зависимости уровня сигнала от угла ввода волны было установлено, что уменьшение угла ввода волны приводит к увеличению затухания волны ввиду увеличения длины пути волны. В то же время, уменьшение угла ввода приводит к увеличению количества точек отражения волны от внутренней границы стенки сосуда, что приводит к увеличению точности измерения уровня вещества. Таким образом, оптимальным углом ввода волны является наименьший угол, при котором практически возможна регистрация звуковой волны, прошедшей вдоль длины стенки резервуара, при максимальном уровне вещества в нем.

IV. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТУХАНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ.

С целью моделирования резервуара, эквивалентного реальному, был использован отрезок стальной трубы диаметром 219 мм. Труба частично закрыта полиэтиленовой пленкой, что позволяет изменять уровень жидкости как внутри (приблизительно на величину 75 % от внутреннего диаметра трубы), так и снаружи модели независимо друг от друга. Вид данной модели со схематичным указанием распространения звука соответствует приведенному ранее на рис.1.

Для проведения экспериментального исследования была создана модель резервуара из отрезка стальной трубы диаметром 219 мм, закрытой полиэтиленовой пленкой. Схематичное изображение модели с указанием распространения траектории волн соответствует приведенному ранее на рис. 1, с тем отличием, что волна совершает несколько пробегов по длине стенки резервуара, обеспечивая тем самым моделирование резервуара большего объема. В данной модели возможно изменение уровня вещества внутри и снаружи резервуара по отдельности, что позволяет моделировать различные условия расположения резервуара. В силу несовершенства модели данный резервуар заполнялся до уровня 75% от внутреннего диаметра трубы.

Измерения проводились с помощью дефектоскопа ISONIC 2006 и пар пьезоэлектрических преобразователей: П121-5-90 (приемник) и П121-5-70 (излучатель); П121-2.5-50 (излучатель) и П121-2.5-50 (приемник). Частота излучения 2.5 МГц близка к оптимальной, полученной при теоретическом расчете, поэтому возможно выбрать меньший угол ввода. При увеличении частоты до 5 МГц затухание волны возрастает, поэтому необходимо увеличить угол ввода.

На основании полученных из геометрического построения величин можно провести оценку соотношения длин пути волны в расчетном резервуаре и в модели:

$$\frac{L_p^{50}}{L_m^{50}} = \frac{3.26}{0.69} = 4.7 ; \quad \frac{L_p^{70}}{L_m^{70}} = \frac{4.05}{0.76} = 5.3$$

где L_p^{50} , L_p^{70} – длины пути звуковой волны для углов ввода 50° и 70° в реальном сосуде соответственно; L_M^{50} , L_M^{70} – длины пути звуковой волны для углов ввода 50° и 70° в модели соответственно.

Исходя из проведенной оценки, при использовании излучателя с углом ввода 70° необходимо исследовать изменение пятого принятого сигнала, а для угла ввода 50° – шестого принятого сигнала. В этом случае волна преодолевает в модели такое же расстояние, какое она бы преодолела в исходном резервуаре большего диаметра. Затухание многократно прошедшего по стенке модели считать эквивалентным затуханию первого принятого сигнала в исходном сосуде, поскольку обе компоненты затухания – обусловленные распространением в стенке сосуда и переходом энергии через ее границу – пропорциональны пройденному волной расстоянию.

Экспериментальное исследование включало в себя последовательное наполнение сосуда с измерением амплитуды соответствующего сигнала. При условии, что уровень жидкости снаружи модели постоянен, влияние этого уровня на затухание волны также постоянно, что позволяет проводить сравнение экспериментальных и теоретических расчетных значений. Уровень воды снаружи резервуара был установлен максимально возможным для имитации погружения резервуара в землю, поскольку необходимо также учитывать влияние внешней среды на работоспособность прибора.

На рис. 3 и 4 приведены теоретические 1 и экспериментальные 2 зависимости нормированной величины затухания сигнала от относительного уровня воды в резервуаре. На рис. 3 приведены данные для угла ввода волны 50°, на рис. 4 – для угла ввода 70°:



Рис. 3. Зависимость затухания сигнала от уровня воды при угле ввода 50°



Рис. 4. Зависимость затухания сигнала от уровня воды при угле ввода 70°

При сравнении приведенных на рис. 3 и рис. 4 данных видно, что экспериментальная зависимость уровня сигнала от уровня жидкости при угле ввода волны 70° согласуется с теоретическим расчетом лучше, чем аналогичная зависимость при угле ввода волны 50°. Данные различия объясняются тем, что кривизна стенки резервуара-модели отличается от кривизны стенки исходного резервуара большего диаметра, что приводит к изменению коэффициента отражения для границы сталь-вода, и это изменение выражено сильнее при меньших углах ввода волны.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный эксперимент свидетельствует о работоспособности прибора при использовании предложенной схемы излучения и приема звуковых волн для измерения уровня жидких веществ в сосуде. Поскольку принцип затухания звука при заполнении резервуара твердыми веществами аналогичен таковому в случае заполнения жидкостью, можно утверждать, что такой прибор может быть использован и для измерения твердых сыпучих тел.

В рамках эксперимента было установлено, что требуемое усиление принятых сигналов было усиления значительно меньше максимального использованного дефектоскопа ISONIC 2006, поэтому можно утверждать о возможности регистрации сигнала при дальнейшем заполнении модели сосуда. Поскольку в процессе эксперимента сохранялась возможность различения смежных уровней вещества, можно также утверждать о том, что данный прибор может быть использован для проведения измерений уровня в исходном резервуаре с диаметром поперечного сечения 1 м, для которого был проведен теоретический расчет.

Проведенный эксперимент показывает, что при использовании как параметров излучения, близких к оптимальным (2.5 МГц, угол ввода 50°), так и при параметрах излучения, отличных от оптимальных, прибор позволяет производить измерения уровня жидкости – для частоты 5 МГц и угла ввода 70°, работоспособность прибора не была нарушена, что

свидетельствует о расширении возможностей применения данного способа измерения ввиду сниженных требований к физическим компонентам.

При проведении эксперимента были использованы параметры излучения, близкие к оптимальным (угол ввода 50° и частота 2.5 МГц), а также параметры излучения, отличающиеся от оптимальных (угол ввода 70° и частота 5 МГц). В обоих случаях была успешно осуществлена регистрация сигнала, а также сохранялась возможность различения смежных уровней сигнала, из чего следует вывод, что вынужденное изменение одного из параметров можно компенсировать изменением другого – с практической точки зрения это приводит к снижению требований к компонентам, используемым для реализации прибора.

Список литературы

- [1] Кулаков М.В. Технологические измерения и приборы для химических производств: Учебник для вузов по специальности «Автоматизация и комплексная механизация химикотехнологических процессов» / 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1983. 424 с., ил.
- [2] Невиницын В.Ю., Лабутин А.Н. Современные приборы измерения теплоэнергетических величин. Измерение уровня и расхода: учеб. пособие. Иван. гос. хим.-технол. ун-т. Иваново, 2014. 84 с.
- [3] Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Ковалев А.В. и др; Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / 2-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, 2003. 656 с., ил.
- [4] Кретов Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении / 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: «СВЕН», 2007. 296 с.