

УДК 62.791.2

К ВОПРОСУ ИДЕНТИФИКАЦИИ МНОГОФАЗНОЙ СМЕСИ, РАСПРОСТРАНЯЕМОЙ В ТРУБОПРОВОДЕ

Кузяков О.Н.

ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет»,
Тюмень, e-mail: onkuzyakov@mail.ru

В работе проанализированы особенности распространения ультразвукового сигнала в жидкой и газообразной средах, как против, так и по течению многофазной смеси, а также при определенной скорости течения газожидкостной смеси в трубопроводе. Рассмотрен вопрос идентификации многофазной смеси, распространяющейся в трубопроводе. Предложено использовать ультразвуковые колебания в качестве зондирующих, а на основании анализа информативных параметров сигналов: времени распространения, расстояния до границы отражения двух сред, скорости распространения в веществе, величины затухания сигнала, – принимать решение о характере и параметрах многофазной смеси. Разработана структура микропроцессорной системы и принципы взаимодействия ее компонентов. Описан алгоритм работы системы. В качестве структурного компонента в систему предложено ввести блок поддержки принятия решений с использованием методов нечеткой логики.

Ключевые слова: ультразвук, микропроцессор, система, идентификация, многофазная смесь, структура, принятие решений, нечеткая логика

TOWARDS THE IDENTIFICATION OF THE MULTIPHASE MIXTURE DISTRIBUTED IN THE PIPELINE

Kuzyakov O.N.

FGBOU VO «Tyumen State Oil and Gas University», Tyumen, e-mail: onkuzyakov@mail.ru

This paper analyzes the features of propagation of the ultrasonic signal in liquid and gaseous media, both against and with the flow of the multiphase mixture, and at a certain flow rate of gas-liquid mixture in the pipeline. The question of identifying multi-phase mixture propagating in the pipeline. Proposed to use ultrasonic vibrations as a probe, and based on the analysis of informative parameters of signals: the propagation time, the distance to the boundary reflection between two media, the velocity of propagation in the substance, the amount of signal attenuation, – to decide on the nature and parameters of the multiphase mixture. The structure of microprocessor system and the principles of interaction of its components. The described algorithm of the system. As a structural component in the system prompted to enter the block of decision support by using methods of fuzzy logic.

Keywords: ultrasound, microprocessor, system, identification, multi-phase mixture, structure, decision making, fuzzy logic

Многокомпонентная смесь, протекающая по трубопроводу, представляет собой, как известно, многофазную систему [5, 9]. Задача идентификации такой смеси является важной, при этом в качестве инструмента могут быть предложены комплексные измерения, в том числе и с использованием ультразвука.

Известно, что информацию о внутренней структуре исследуемой среды несут различные эффекты взаимодействия с ней: отражение, преломление, рассеяние, поглощение, а также изменение скорости распространения ультразвука. При этом основополагающей является способность ультразвуковых волн распространяться прямолинейно и с постоянной скоростью в однородной среде и отражаться от неоднородностей или границ этой среды, характеризующихся изменением акустического импеданса. Это позволяет обнаруживать и визуализировать неоднородности исследуемых сред, определять их местоположение, линейные размеры, свойства и другие физические характеристики.

Целью данной работы является обоснование принципов построения микропроцессорной системы для идентификации многокомпонентной смеси, распространяющейся в трубопроводе с использованием ультразвуковых колебаний в качестве зондирующих.

На основании анализа источников [1, 9] известно, что время распространения сигнала по потоку (рис. 1) можно записать, в виде

$$t_{\Pi \rightarrow} = 2(t_{\Pi} + t_{\text{CT}}) + \frac{D}{\cos \alpha_{\text{ж}} \cdot [c_{\text{ж}} + V \cdot \sin \alpha_{\text{ж}}]}, \quad (1)$$

где t_{Π} – время распространения ультразвука в призме электроакустического преобразователя; t_{CT} – время распространения ультразвука в стенке трубопровода; D – внутренний диаметр трубопровода; $c_{\text{ж}}$ – скорость распространения ультразвука в неподвижной жидкости; $\alpha_{\text{ж}}$ – угол между вертикалью и направлением распространения ультразвука в жидкости; V – скорость течения жидкости.

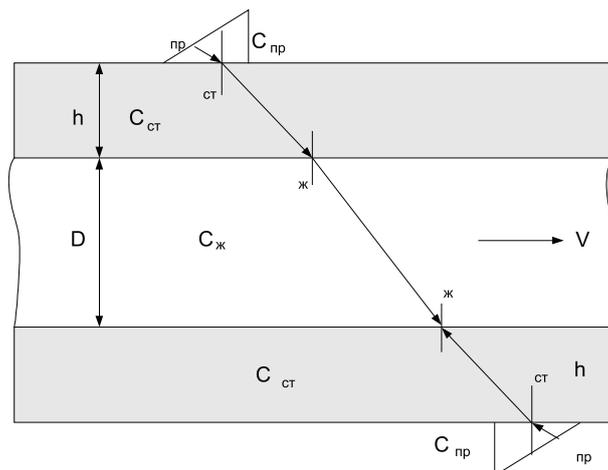


Рис. 1. Схема распространения ультразвука в потоке

А время распространения сигнала против потока можно вычислить по формуле

$$t_{\text{пл}} = 2(t_{\text{п}} + t_{\text{ст}}) + \frac{D}{\cos \alpha_{\text{ж}} \cdot [c_{\text{ж}} - V \cdot \sin \alpha_{\text{ж}}]} \quad (2)$$

Разрешив систему уравнений из (1) и (2) относительно V , получим следующее соотношение:

$$V = \frac{\frac{C_{\text{ж}}}{\sin \alpha_{\text{ж}}} \cdot (t_{\text{пл}} - t_{\text{пл}})}{t_{\text{пл}} + t_{\text{пл}} - 4(t_{\text{п}} + t_{\text{ст}})} \quad (3)$$

В полученное выражение входит отношение скорости ультразвука в жидкости $C_{\text{ж}}$ к синусу угла между вертикалью и направлением распространения колебаний $\alpha_{\text{ж}}$, которое, в соответствии с законом Снеллиуса, равно

$$\frac{C_{\text{ж}}}{\sin \alpha_{\text{ж}}} = \frac{C_{\text{п}}}{\sin \alpha_{\text{п}}} = f(\alpha_{\text{п}}, C_{\text{п}}) = \text{const}, \quad (4)$$

где $C_{\text{п}}$ – скорость ультразвука в материале призмы электроакустического преобразователя; $\alpha_{\text{п}}$ – угол между вертикалью и направлением ввода ультразвуковых колебаний в стенку трубопровода, который равен углу призмы электроакустического преобразователя.

С учетом полученных выражений (3), (4) можно записать V в виде

$$V = \frac{f(\alpha_{\text{п}}, C_{\text{п}}) \cdot (t_{\text{пл}} - t_{\text{пл}})}{t_{\text{пл}} + t_{\text{пл}} - 4(t_{\text{п}} + t_{\text{ст}})} \quad (5)$$

Соответственно, умножив это выражение на площадь поперечного сечения трубопровода, определим расход Q как

$$Q = 900 \cdot S_G \cdot \Pi \cdot D^2 \cdot V, \quad (6)$$

где S_G – величина, обратно пропорциональная гидродинамическому коэффициенту, зависящему от профиля скоростей.

С другой стороны, если точечный рассеиватель, движущийся вдоль оси трубы со скоростью V , облучается под углом $\alpha_{\text{ж}}$ к вертикали сигналом с частотой ω_0 , то частота $\omega_{\text{пр}}$ принятого эхо-сигнала определяется соотношением

$$\omega_{\text{пр}} = \omega_0 \cdot \frac{1 - V \cdot \sin \alpha_{\text{ж}}}{\frac{C_{\text{ж}}}{1 + V \cdot \sin \alpha_{\text{ж}}}} \quad (7)$$

Разложив второй множитель в степенной ряд и взяв разность $\Delta\omega = \omega_{\text{пр}} - \omega_0$, получим так называемый локационный вариант формулы эффекта Доплера:

$$\Delta\omega = 2\omega_0 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{V \cdot \sin \alpha_{\text{ж}}}{C_{\text{ж}}} \right)^n \quad (8)$$

Поэтому, согласно [1, 3, 9], в качестве наиболее важных тенденций в области использования технических средств для ультразвуковых измерений можно выделить:

1) одновременное измерение нескольких параметров в целях повышения точности и снижения временных затрат;

2) измерение массового расхода технологических потоков, рассчитанное на увеличение производительности, улучшение качества и снижение расходов;

3) использование цифровых коммуникаций, обеспечивающих быстрый доступ к имеющейся информации;

4) обеспечение непрерывности процедуры измерения, обработки и принятия решения о характере многокомпонентной смеси.

В жидкостях и газах, где затухание ультразвука зависит от потерь, вызванных вязкостью α_v и теплопроводностью α_T , коэффициент затухания ультразвука может быть определен как

$$\alpha = \alpha_v + \alpha_T = \frac{2\pi^2}{\rho c^3} \left[\frac{4}{3} \eta + \lambda_T \left(\frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p} \right) \right] f^2 = \alpha f^2, \quad (9)$$

где ρ – плотность; c – скорость ультразвука; η – вязкость; λ_T – теплопроводность; c_v , c_p – удельные теплоемкости при постоянном динамическом диапазоне и постоянном давлении.

Для жидкостей $\alpha_v \ll \alpha_T$, а для газов α_v и α_T соизмеримы, но, по сравнению с жидкостями, затухание ультразвука в газах выше. Поскольку затухание ультразвуковой волны пропорционально квадрату частоты, то в газах нежелательно использование высоких частот. Поэтому типичные измерители расхода газа используют частоты в диапазоне 50–100 кГц. Однако при атмосферном давлении ультразвуковые волны могут быть переданы на частотах до 500 кГц. В жидкостях обычно используются частоты в мегагерцовом диапазоне. Так, типичные расходомеры используют частоту в диапазоне от 1 до 1,5 МГц.

Взаимодействие ультразвука с материалом может быть характеризовано акустическим сопротивлением материала, которое является произведением плотности и скорости звука в материале. Когда имеется большая разница в сопротивлениях на поверхности раздела, то большая часть падающей энергии

отражается. Если же сопротивления соизмеримы, то большая часть энергии передается. Кроме того, количество переданной энергии зависит от площади и формы поверхности раздела. Длина волны ультразвукового луча непосредственно связана с разрешающей способностью системы. Увеличение частоты обеспечивает увеличение разрешения. Продольная длина волны связана с соответствующим осевым разрешением. Частицы, размеры которых меньше, чем длина волны ультразвукового луча, не будут блокировать или отражать ультразвуковую волну, но будут дифрагировать ее. Но для измерения большинства процессов требуется блокировка и отражение / преломление. Между сталью и воздухом имеется относительно высокое рассогласование сопротивлений. Для нормального падения звуковой волны на поверхность раздела двух сред (жидкость – газ) с волновыми сопротивлениями соответственно Z_1 и Z_2 , отношение переданной энергии к падающей энергии равно

$$D = \frac{E_{\text{переданная}}}{E_{\text{падающая}}} = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}. \quad (10)$$

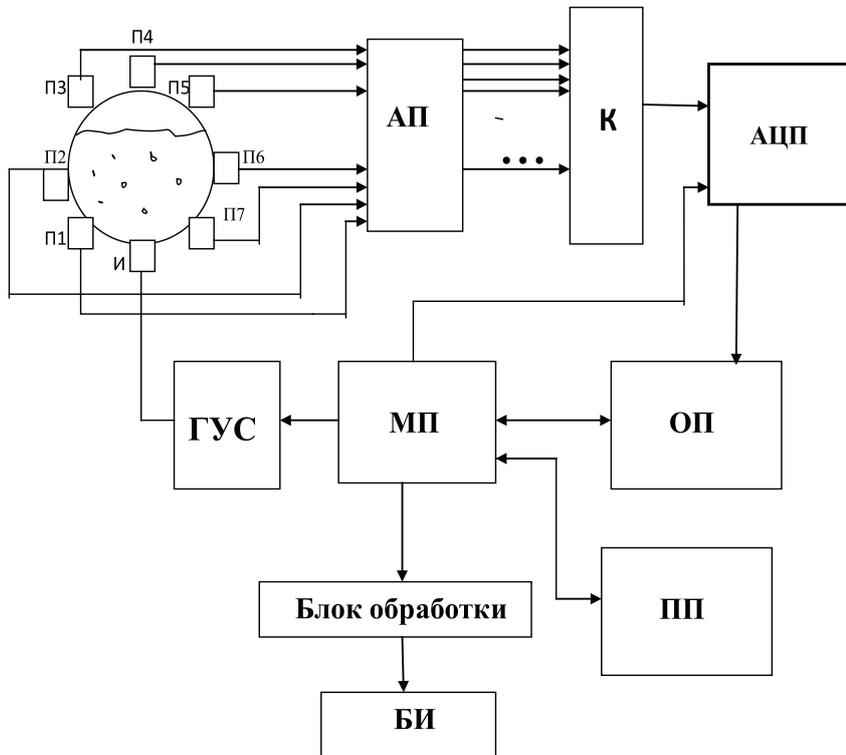


Рис. 2. Система идентификации потока

Из выражения (10) следует, что для увеличения коэффициента передачи D требуется увеличить волновое сопротивление Z_1 или Z_2 . Это может быть сделано для Z_2 путем увеличения плотности газа. А плотность газа может быть увеличена за счет увеличения давления газа.

На основании выполненного теоретического анализа и с учетом [4, 7, 8] была предложена система идентификации вида потока, которая представлена на рис. 2.

Идентификация режима течения и его особенностей осуществляется микропроцессорным модулем (МП) по программе, хранимой в постоянной памяти модуля (ПП). При идентификации руководствуются значениями амплитуд A_c принятых ультразвуковых импульсов, как прошедших через контролируемую среду, так и отраженных от границы (границ) раздела фаз, значениями измеренных времен T_{Σ} распространения этих сигналов, а также учитываются значения скорости потока $V_{\text{пот}}$, температуры потока многофазной смеси T , °С и плотности ρ многофазной смеси, которые существенно влияют на режим течения многофазного потока в трубопроводе [4, 6, 7, 8, 10].

Эталонные значения параметров (уставки), найденные ранее в ходе экспериментальных исследований, хранятся в ПП микропроцессорного модуля МП.

Вся обработка принятой информации и используемых эталонных данных производится микропроцессорным модулем по заданному алгоритму.

Работа системы осуществляется следующим образом. В начале работы на этапе инициализации выполняется первоначальная настройка всех компонентов системы, загрузка в ПП таблицы констант и эталонных значений параметров.

Затем формируется и излучается ультразвуковой сигнал, который поступает от генератора (ГУС) на излучатель (И), принимается посредством приемников П1-П7 и фиксируется в аналоговой памяти (АП). После этого эти значения через коммутатор (К) последовательно поступают в аналого-цифровой преобразователь (АЦП), преобразуются в цифровые значения и запоминаются в оперативной памяти (ОП).

Затем с помощью блока обработки по заданному алгоритму производятся необходимые определения информативных параметров (амплитуды принятого и отраженного сигналов A_{cp} , времени распространения в среде $T_{\Sigma p}$, скорости потока $V_{\text{пот}}$ и др.) для выявления компонентности смеси. Полученный результат визуализируется с помощью блока индикации (БИ).

Для принятия решений о составе многофазной смеси использован блок поддержки принятия решений (БППР).

Существующие в настоящее время системы поддержки принятия решений (СППР) отличаются следующим:

- гибкостью пользователей, высокой степенью адаптации и быстрой реакцией;
- возможностью одновременного управления входом и выходом;
- обеспечением поддержки для решений и проблем, которые не могут быть определены заранее;
- использованием сложного анализа и инструментальных средств моделирования.

СППР имеют значительно большую аналитическую мощь, чем другие системы: они построены с присутствием ряда моделей, чтобы анализировать данные, они интерактивны, а пользователь может изменять предположения и включать новые данные.

Предлагается применять в блоке поддержки принятия решений нечеткие методы идентификации и управления процессами в нефтегазодобыче, а также алгоритм нечеткого вывода [2].

Очевидно, что точность решения задачи идентификации определяет стратегию принятия решений, а имеющаяся неопределенность может быть связана с нечеткостью таких понятий, как «многофазная система», «скорость течения смеси», «граница раздела фаз», «степень затухания сигнала», «температура смеси», «частота принятого эхо-сигнала».

Таким образом, изначально известными являются значения ряда входных переменных:

$$K' = \{k_1, k_2, \dots, k_{11}\}, k_i \in X_i,$$

где X_i – область определения лингвистической переменной K_i .

При этом A_i – нечеткое множество на X с известной функцией принадлежности $\mu(x)$, то есть $A_i = \{k_i; \mu(x)\}$, где значение k_i является аргументом $\mu(x)$.

Таким образом, $b_i = \mu(k_i)$ – количественное значение, которое и является результатом фазификации (перехода к нечеткости) подусловия « K_i есть A_i ».

Тогда структурно система идентификации принимает следующий вид, показанный на рис. 3.

Это позволяет осуществлять представление детерминированных параметров в виде случайных величин с известными вероятностными характеристиками: как нечеткие величины с заданными функциями принадлежности или как интервальные величины с применением методов нечеткого или интервального программирования.

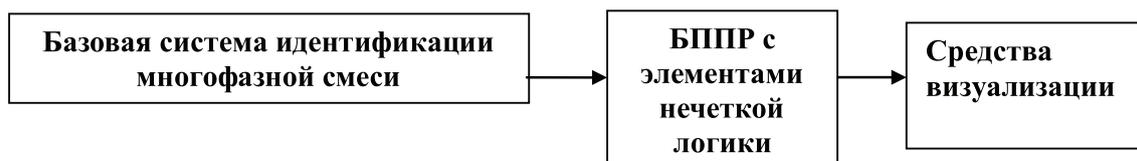


Рис. 3. Система идентификации с блоком принятия решений

Таким образом, обоснованы принципы построения системы идентификации типа многофазной смеси с использованием нечеткой логики в режиме принятия решений.

Список литературы

1. Агранат Б.А. Основы физики и техники ультразвука: учеб. пособие для вузов / Б.А. Агранат, М.Н. Дубровин, Н.Н. Хавский и др. – М.: Высш. шк., 1987. – 352 с.
2. Алтунин А.Е. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях / А.Е. Алтунин, М.В. Семухин. – Тюмень: Изд-во Тюменского государственного университета, 2000. – 352 с.
3. Домаркас В.И., Пилецкас Э.Л. Ультразвуковая эхоскопия. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-е, 1988. – 276 с.
4. Ильиных А.В., Кузяков О.Н. Система для идентификации многофазной смеси в нефтепроводе // Новые технологии – нефтегазовому региону: материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Т. 3, (Тюмень, 20 марта 2015 г.). – Тюмень, 2015. – С. 330–333.
5. Кузяков О.Н. Исследование условий образования водоземulsionного потока // Известия вузов. Нефть и газ. – 2001. – № 3. – С. 42–46.
6. Кузяков О.Н., Дудко С.А. Способ контроля многофазного потока в трубопроводе // Патент России № 2198397. 2003. Бюл. № 4.
7. Кузяков О.Н., Пиндак А.В. Способ определения режима течения многофазного потока в трубопроводе // Патент России № 2311633. 2007. Бюл. № 33.
8. Кузяков О.Н., Пиндак А.В. Устройство для контроля многофазного потока в трубопроводе // Патент России № 2198397.2006. Бюл. № 31.
9. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля; под общ. ред. И.Н. Ермолова. – М.: Машиностроение, 1986. – 280 с.
10. Jepson W.P., Gopal M. Proposal on multiphase flow metering. NSF, I/UCRC Corrosion in multiphase system center, 1998.