

Влияние объемных долей газа на измерение многофазного потока и обработку адаптивного управления

Х. С. Алмгаташи¹, П. В. Соколов²

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

¹humam.almltashi.81@gmail.com, ²pvsokolov@etu.ru

Аннотация. Измерение многофазного расхода (MPFM) критически важно в нефтегазовой отрасли. В отчете анализируется влияние объемной доли газа (ВПД) на точность систем MPFM, проблемы изменения режимов потока и фазового распределения. Рассматриваются адаптивное управление и автоматизация, как решения для корректировки в реальном времени. Обсуждается интеграция сенсоров, вычислительных моделей и адаптивных алгоритмов для повышения точности в динамических условиях. Исследование выявляет ограничения традиционных методов и пути оптимизации MPFM для промышленного применения при различных РЦТ.

Ключевые слова: многофазное измерение расхода (МПСМ), объемная доля газа (ГРС), характеристика режима потока, адаптивные системы управления, обработка данных в реальном масштабе времени

I. ВВЕДЕНИЕ

Измерение многофазного потока, которое имеет жизненно важное значение в обрабатывающей промышленности, такой как нефтегазовая промышленность, в значительной степени зависит от объемной доли газа (GVF), которая влияет на поведение потока и точность измерений. Изменения в GVF приводят к дрейфу из-за сложностей в режимах течения (например, пробковые, кольцевые, пузырьковые потоки), которые создают нелинейности и неопределенности, которые трудно использовать в традиционных методах [4][2]. В обычных многофазных расходомерах (MPFM) обычно используются статические модели и эмпирические корреляции, которые не могут отразить динамическую природу потоков, особенно при высоких GVF, где преобладают фазовая стратификация и прерывистые потоки [1][6]. Новые разработки решают эту проблему в аспекте автоматизации и адаптивных практик управления [7]. Они используют актуальные данные от датчиков, таких как плотномеры гамма-луча [1] и электроимпедансная томография [3], в сочетании с машинным обучением для осуществления динамической настройки параметров [5]. Адаптивные системы управления, в которых модели постоянно обновляются с использованием входной информации, предлагают возможное решение за счет компенсации вариаций GVF для обеспечения точности [7]. В данной статье рассматривается практика и теория этих технологий в системах MPFM, такие как задачи GVF, принципы адаптивного управления и промышленные кейсы.

II. ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ МНОГОФАЗНОГО ПОТОКА, ВЫЗВАННЫЕ ОБЪЕМНОЙ ДОЛЕЙ ГАЗА (GVF)

Объемная доля газа (GVF) влияет на формирование и изменение различных режимов течения (например, пузырьковых, пробковых или кольцевых) в многофазных трубопроводах. По мере увеличения GVF поведение потока изменяется, что затрудняет точные измерения.

Одним из важных уравнений, используемых для прогнозирования переходов между модами, является модель Тейтеля–Дюклера, которая помогает определить, когда в горизонтальных трубах возникает режим пробки:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{2f_{G\rho_G}}{D} \quad (1)$$

Градиент давления (dx/dP) для газожидкостного потока зависит от коэффициента трения газа (f_G), плотности (ρ_G), скорости (U_G) и диаметра трубы (D), где f_G определяется эмпирически (например, диаграмма Мууди) [4], [8]. Более высокие U_G или меньшие D увеличивают градиент, формируя основу для стратифицированных/кольцевых течений, но требуя дополнительных членов для таких режимов, как пробковый поток [4], [8].

A. Ограничения традиционных методов измерения

Традиционные методы измерения сталкиваются со значительными трудностями при точном определении параметров многофазного потока, особенно при переменной объемной доле газа (GVF). Эти ограничения вызваны допущениями, динамикой потока и ограничениями процесса.

1. Неточности из-за зависимости от режима потока. Традиционные расходомеры (например, дифференциальный, турбинный) часто предполагают однородный расход, что приводит к ошибкам при непредсказуемых переходах между режимами потока (например, пробковый, кольцевой). Относительная погрешность измеренного расхода (Q_{error}) увеличивается, когда калибровка для однородной фазы неприменима:

$$Q_{error} = \left| \frac{Q_{measured} - Q_{actual}}{Q_{actual}} \right| \quad (2)$$

Особенно велика эта ошибка в условиях с высокой ГВФ, когда распределение фаз становится неоднородным [1].

2. Ошибки из-за проскальзывания фазы и неправильной оценки удержания газа. Когда газ движется быстрее жидкости (проскальзывание), это искажает оценку доли фаз. Задержка газа (α_G) зависит от коэффициента проскальзывания:

$$\alpha_G = \frac{U_{SG}}{U_G} \quad (3)$$

Традиционные расходомеры часто пренебрегают проскальзыванием между поверхностной скоростью газа (U_{SG}) и фактической скоростью газа (U_G), что приводит к значительным погрешностям измерения объемной доли [2].

3. Ограниченный рабочий диапазон при экстремальных значениях GVF. Обычные устройства (например, мембраны) плохо работают за пределами узких диапазонов PVF (<5% или >95% газа). Однородные модели, предполагающие однородные свойства смеси, теряют точность в следующих экстремальных условиях:

$$\Delta P = K \cdot \rho_m U_m^2 \quad (4)$$

Здесь ΔP – перепад давления, K – постоянная, ρ_m – плотность смеси, U_m – скорость смеси. Эта упрощенная модель нарушается разделением или стратификацией фаз [10].

4. Неспособность адаптироваться к динамическим изменениям потока. Методы статической калибровки не могут адаптироваться к изменениям потока в реальном времени (например, к всплескам на нефтяных месторождениях). Адаптивные наблюдатели позволяют динамически корректировать измерения (y):

$$\hat{x} = A \hat{x} + L \left(y - \hat{x} \right) \quad (5)$$

В. Примеры погрешностей измерений в средах с высоким ГВЦ

Условия большого объема газа (GVF) создают значительные проблемы при измерении многофазных потоков, что часто приводит к значительным ошибкам. Ниже приведены основные примеры:

1. Завышение расхода жидкости в пробковом режиме Сценарий: В горизонтальном трубопроводе с ПГС > 90% наблюдался ярко выраженный пробковый поток. **Ошибка:** Обычный расходомер перепада давления завышал расход жидкости на 35% при переходе из пробкового в кольцевой режим. **Причина:** Расходомер предполагал постоянный поток, в то время как пробки создавали нерегулярные колебания давления. **Уравнение:** Фактический расход жидкости (Q_L) отклонился от измеренного из-за переходных процессов:

$$Q_{L, actual} = Q_{L, measured} \times \frac{\Delta P_{slug}}{\Delta P_{steady}} \quad (6)$$

где ΔP_{slug} – неравномерный перепад давления в режиме пробки [5].

2. Погрешность оценки удержания газа в кольцевом потоке Сценарий: В вертикальном потоке с объемной долей газа (GVF) = 95% мониторинг с помощью гамма-денситометра привел к ошибке: измеренное удержание газа (α_G) оказалось на 20% ниже истинного значения. Причиной стало то, что модель линейного затухания датчика не смогла обнаружить тонкую жидкую пленку в кольцевом потоке. **Уравнение:** Для правильного удержания требуется регулировка толщины пленки (h_f).

$$\alpha_G = 1 - \frac{4h_f}{D} + \frac{4h_f^2}{D^2} \quad (7)$$

где D – диаметр трубы [9].

3. Сценарий идентификации ложного режима потока: Поток влажного газа А (GVF > 97%) был ошибочно классифицирован как туман из-за ограничений датчиков, что привело к ошибке загрузки жидкости в 50%, поскольку алгоритмы, основанные на скорости, игнорировали перенос капель. Традиционные датчики из проволоочной сетки не могли различать капли из газового ядра на высоких скоростях, что требовало коррекции размера капель (d_d) для точной жидкой фракции (β_L) [13].

$$\beta_L = \beta_{L, measured} \times \left(1 + \frac{U_G^2}{gd_d} \right) \quad (8)$$

4. Погрешности эрозии в кориолисовых расходомерах: Поток газового конденсата с высоким РЦН (99%) вызвал эрозию расходомера в течение 6 месяцев, что привело к отклонению массового расхода на 15% от декалибровки датчика. Это произошло из-за того, что турбулентность в газовой фазе и удары частиц изменили вибрационные характеристики трубы, где скорость эрозии (E) коррелирует с кинетической энергией газа [11].

$$E \propto \rho_G U_G^3 \quad (9)$$

III. ПРИНЦИПЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ РАСХОДОМЕРАХ (MPFM)

Многокомпонентные системы измерения расхода сталкиваются со значительными проблемами из-за изменчивого характера газожидкостных смесей, особенно при высоких ПНЧ. Адаптивное управление решает эти проблемы путем непрерывной регулировки параметров измерений в режиме реального времени, обеспечивая точность в различных режимах потока. Такой подход опирается на три основные составляющие: адаптивные алгоритмы, обработку данных в режиме реального времени и интеграцию с современными сенсорными технологиями.

А. Адаптивные алгоритмы управления

Традиционные расходомеры испытывают трудности в переходных режимах, таких как пробковый поток или разделение фаз. Адаптивные алгоритмы, такие как системы адаптации эталонных моделей (MRAS), корректируют измерения путем сравнения данных

датчиков с выходными данными эталонной модели, рассчитывается по формуле:

$$e(t) = y(t) - y_{ref}(t) \quad (10)$$

Этот сигнал об ошибке управляет обновлением параметров, позволяя системе адаптироваться к изменениям в составе потока. Наблюдатели, основанные на методе Ляпунова, повышают устойчивость за счет оценки неизмеримых состояний, таких как фазовые скорости, с помощью закона обновления состояния:

$$\dot{\hat{x}} = A \hat{x} + L(y - C \hat{x}) \quad (11)$$

Здесь $\hat{x}$ – оцениваемое состояние, а L – коэффициент сходимости. Методы машинного обучения, такие как нейронные сети, также используются для прогнозирования переходов между режимами. Такие модели связывают входные данные, такие как скорость U_G газа и удержание α_G , с выходными данными, такими как расход жидкости Q_L :

$$Q_L = f_{NN}(U_G, \alpha_G) \quad (12)$$

Последние исследования показывают, что такие гибридные подходы снижают погрешности измерений до 30% в условиях высокой ГПС [14, 15].

В. Сбор и обработка данных в режиме реального времени

Эффективность адаптивного управления основана на высокоскоростной обработке и объединении данных от гамма-денситометра, ультразвуковых датчиков и датчиков давления для устранения неоднозначностей фазового распределения. Пример: Спектральный анализ колебаний давления идентифицирует пробковый поток через спектральную плотность мощности:

$$P(f) = \left| \int p(t) e^{-2\pi i f t} dt \right|^2 \quad (13)$$

Периферийные вычисления сокращают задержки за счет локальной обработки данных, реагируя на нестабильность потока за <1 секунду. Это предотвращает ошибки при резких переходах потока, когда задержки вызывают значительные искажения измерений [16, 17].

С. Интеграция с современными сенсорными технологиями

В современных системах MPFM используются передовые датчики для получения высокоточных данных. Например, электрическая томография восстанавливает распределение фаз путем измерения изменений импеданса по поперечному сечению трубы. Распределение проводимости $\sigma(x, y)$ рассчитывается как взвешенная сумма фазовых проводимостей:

$$\sigma(x, y) = \sum \alpha_i \sigma_i \quad (14)$$

Оптоволоконные датчики добавляют дополнительный уровень надежности, измеряя распределенную температуру и напряжение, которые коррелируют со скоростью потока. Зависимость между градиентом температуры ΔT и скоростью v выражается уравнением:

$$v = \frac{A \Delta T}{\tau C_p} \quad (15)$$

где τ – время релаксации, а C_p – теплоемкость. Такие датчики особенно ценны в коррозионных средах, где традиционные зонды могут выйти из строя из-за эрозии или загрязнения [18].

IV. АВТОМАТИЗАЦИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ MPFM

Многокомпонентные системы измерения расхода (MPFM) все чаще используют методы автоматизации для преодоления традиционных ограничений, применяя передовые вычислительные стратегии для повышения точности:

Машинное обучение для определения режимов потока. Традиционные карты режимов течения, основанные на эмпирических корреляциях, часто терпят неудачу при экстремальных многокомпонентных потоках GVF. Алгоритмы машинного обучения (например, SVM) позволяют классифицировать режимы течения в режиме реального времени с высокой точностью:

$$f(x) = \text{sign} \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i y_i(x_i, x) b \right) \quad (16)$$

Такие $K(x_i, x)$ α_i модели показывают точность классификации более 90% для пробковых и кольцевых режимов [5, 15]. Ненаблюдаемые методы, такие как кластеризация, позволяют обнаруживать новые режимы без предварительной разметки. K -означает состояния потока заказов по безразмерным параметрам, таким как модифицированное число Фрауда:

$$Fr' = \frac{U_G}{\sqrt{gD(\rho_L - \rho_G)/\rho_L}} \quad (17)$$

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В исследовании подчеркивается критическое влияние газофазной фракции (ВГП) на точность измерений многокомпонентного расхода и демонстрируется преобразующий потенциал адаптивного управления и автоматизации в решении этих проблем. Применяя динамические подходы, основанные на данных, промышленность может достичь более высокой точности и надежности в системах MPFM даже в условиях нестабильного потока. Будущие исследования должны быть сосредоточены на совершенствовании адаптивных алгоритмов и расширении их применения в экстремальных условиях, обеспечении стабильной работы во всем диапазоне GVF.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Thorn, Richard, Geir A. Johansen, and Bjørn T. Hjertaker. "Измерение трёхфазного потока в нефтяной промышленности." *Measurement Science and Technology*, 24, № 1 (2012): 012003.
- [2] Falcone, Gioia, G. F. Hewitt, Claudio Alimonti, и B. Harrison. "Измерение многокомпонентного потока: текущие тренды и будущие направления." *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, SPE-71474, 2001.
- [3] Plaskowski, Andrzej, M. S. Beck, R. Thorn, и Tom Dyakowski. *Изображение промышленных потоков: применение электрической томографии процессов*. CRC Press, 1995.
- [4] Shoham, Ovadia. "Механистическое моделирование двухфазного потока газ–жидкость в трубах." (2006).
- [5] Li, Zhuochao и др. "Оценка безопасной транспортировки в многокомпонентных трубопроводах с использованием механизмов и моделей машинного обучения." *Measurement*, 236 (2024): 115150.
- [6] Kendoush, Abdullah Abbas. "Отдел ядерной инженерии, Технический колледж Августы, Джорджия, США."
- [7] Varvani Farahani, Abolfazl, и Mohsen Montazeri. "Измерение многокомпонентного потока на газовом заводе с использованием децентрализованного адаптивного наблюдателя на основе Ляпунова." *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 43, № 3 (2021): 700–716.
- [8] Taitel, Yehudah, Naugab Lee, и A. E. Dukler. "Переходы режимов течения газа и жидкости в горизонтальных трубах: моделирование." *AIChE Journal*, 24, № 5 (1978): 920–934.
- [9] Meng, Jia и др. "Экспериментальное исследование характеристик завихряющегося потока газ–жидкость в горизонтальной трубе с использованием двухпроводочных датчиков." *International Journal of Multiphase Flow*, 149 (2022): 103971.
- [10] Falcone, Gioia. "Основы многокомпонентных потоков." *Developments in Petroleum Science*, 54 (2009): 1–18.
- [11] Knudsen, Halfdan Rognes. "Проверка характеристик многокомпонентных потоков." *Магистерская диссертация*, Институт энергетики и процессов, 2013.
- [12] Hansen, Lærke Skov, Simon Pedersen и Petar Durdevic. "Измерение многокомпонентных потоков в трубопроводах при транспортировке нефти и газа на морских платформах: тенденции и перспективы." *Sensors*, 19, № 9 (2019): 2184.
- [13] Dong, Feng и др. "Идентификация режимов потока на основе многоуровневых признаков для двухфазного потока газ–жидкость в горизонтальной трубе." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70 (2021): 1–11.
- [14] Xu, Ziming и Juliana Y. Leung. "Динамическое прогностическое моделирование в реальном времени для сложных подземных потоков с переменной длиной входных данных." *SPE Journal*, 29, № 09 (2024): 4510–4526.
- [15] Barbariol, Tommaso, Enrico Feltresi и G. A. Susto. "Оценка достоверности и согласованности данных MPFM с помощью системы на основе машинного обучения." *37-я Североморская конференция по измерениям потока* (2019).
- [16] Xue, Naobai и др. "Новый алгоритм слияния данных с нескольких датчиков на основе анализа неопределённости." *Sensors*, 21, № 8 (2021): 2713.
- [17] Rathi, Vipin Kumar и др. "Система мониторинга здоровья с поддержкой Edge AI и IoT для умных городов." *Computers & Electrical Engineering*, 96 (2021): 107524.
- [18] Naser, Ahmed Mujtaba Al, Fatema Zerir Jaba и Fariha Anzum. "Датчик на основе интерферометра Маха–Цендера с разделением поверхностного плазмонного режима." *Докторская диссертация*, Департамент электротехники, Исламский университет технологий, 2022.