

DOI 10.54596/2958-0048-2026-3-350-365

УДК 53.083.9

МРНТИ 50.41.25

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ РАСХОДА
ВЛАЖНОГО И СЕРНИСТОГО ГАЗА: ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ****Тажиева Г.Н.¹, Даев Ж.А.^{2*}***¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серкебаева,
Оскемен, Казахстан**^{2*}Баишев Университет, Актобе, Казахстан***Автор для корреспонденции: zhand@yandex.ru***Аннотация**

Точное измерение и контроль расхода влажного и сернистого газа остаются одной из ключевых задач современных систем добычи, транспорта и подготовки углеводородного сырья. В реальных условиях эксплуатации природный и попутный газ редко представляет собой однофазную среду и, как правило, содержит жидкие компоненты, прежде всего воду и углеводородный конденсат, формируя многофазные смеси. Даже незначительное содержание жидкости существенно изменяет гидродинамику потока и приводит к значительным неопределённостям при использовании традиционных методов измерения расхода газа. В данной обзорной работе рассматривается роль измерения и контроля расхода бинарных систем «газ – вода» и анализируется эволюция технологий измерения влажного газа от классических подходов к интеллектуальным измерительным концепциям. В работе обобщены физические особенности течения влажного газа, включая скольжение фаз, изменчивость режимов течения и влияние жидкостной нагрузки на точность измерений. Ограничения традиционных методов рассмотрены с системной точки зрения, показывая, что основным источником погрешностей является динамическая структура многофазного потока, а не точность отдельных устройств. Особое внимание уделено эксплуатационным проблемам измерения и контроля сернистого газа, где коррозионные процессы, деградация сенсоров и изменение термофизических свойств среды дополнительно усложняют обеспечение достоверных измерений. Анализ современных исследований показывает переход от использования отдельных измерительных приборов к гибридным мультисенсорным системам, способным одновременно определять расход и фазовый состав среды. Рассмотрены перспективные направления развития, связанные с применением методов искусственного интеллекта, интеллектуальной обработки сигналов и цифровых двойников потоков для идентификации состояния потока в режиме реального времени. Показано, что будущие системы измерения и контроля влажного газа будут функционировать как интеллектуальные платформы мониторинга, интегрированные в инфраструктуру цифровых нефтегазовых производств. Совмещение мультифизических измерений, современных алгоритмов обработки данных и машинного обучения открывает возможности надёжного inline-измерения многофазных потоков без предварительной сепарации фаз.

Ключевые слова: влажный газ; сернистый газ; многофазный поток; интеллектуальное измерение; цифровое месторождение; искусственный интеллект.

**ЫЛҒАЛДЫ ЖӘНЕ КҮКІРТТІ ГАЗ ШЫҒЫНЫН ӨЛШЕУ ЖӘНЕ
БАҚЫЛАУДЫҢ ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ ӘДІСТЕРІ: ЦИФРЛЫҚ КЕН
ОРЫНДАРЫНА АРНАЛҒАН ТЕХНОЛОГИЯЛАРҒА ШОЛУ**

Тажиева Г.Н.¹, Даев Ж.А.^{2*},

*¹Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,
Өскемен, Қазақстан*

^{2}Бәйішев Университеті, Ақтөбе, Қазақстан*

**Хат-хабар үшін автор: zhand@yandex.ru*

Аңдатпа

Ылғалды және күкіртті газдың шығынын дәл өлшеу мен бақылау қазіргі мұнай-газ өндіру, тасымалдау және дайындау жүйелерінің негізгі ғылыми-техникалық мәселелерінің бірі болып табылады. Нақты өндірістік жағдайларда табиғи және ілеспе газ бірфазалы орта ретінде кездеспейді және көбінесе су мен көмірсутекті конденсат сияқты сұйық компоненттерді қамтып, көпфазалы қоспа түзеді. Сұйық фазаның аз мөлшерінің өзі ағынның гидродинамикалық сипаттамаларын айтарлықтай өзгертеді және дәстүрлі газ шығынын өлшеу әдістерінде елеулі белгісіздіктердің пайда болуына әкеледі. Осы шолу мақаласында «газ – су» бинарлық жүйелеріндегі шығынды өлшеудің маңыздылығы қарастырылып, ылғалды газды өлшеу технологияларының классикалық тәсілдерден интеллектуалды өлшеу тұжырымдамаларына дейінгі эволюциясы талданады. Жұмыста ылғалды газ ағынының физикалық ерекшеліктері, соның ішінде фазалардың салыстырмалы жылдамдық айырмашылығы, ағын режимдерінің өзгергіштігі және сұйық жүктеменің өлшеу дәлдігіне әсері жинақталған. Дәстүрлі шығынөлшеу әдістерінің шектеулері жүйелік тұрғыдан қарастырылып, өлшеу қателіктерінің негізгі себебі жеке датчиктердің дәлдігі емес, көпфазалы ағын құрылымының динамикалық сипаты екені көрсетілген. Сонымен қатар, күкіртті газдарды өлшеу кезіндегі пайдалану қиындықтарына ерекше назар аударылған, себебі коррозия, сенсорлардың тозуы және ортаның термофизикалық қасиеттерінің өзгеруі өлшеу сенімділігін төмендетеді. Заманауи зерттеулерді талдау нәтижелері жеке аспаптардан ағын шығыны мен фазалық құрамын бір мезгілде анықтай алатын гибриді мультисенсорлық жүйелерге көшу үрдісін көрсетеді. Жасанды интеллект әдістерін, сигналдарды интеллектуалды өңдеуді және ағындардың цифрлық егіздерін пайдалану арқылы нақты уақыт режимінде ағын күйін анықтауға мүмкіндік беретін болашақ бағыттар қарастырылған. Болашақта ылғалды газды өлшеу жүйелері цифрлық мұнай-газ өндірісінің құрамдас бөлігі ретінде интеллектуалды мониторинг платформалары түрінде жұмыс істейтіні көрсетілген. Көпфизикалық өлшеулерді, заманауи деректерді өңдеу алгоритмдерін және машиналық оқытуды біріктіру фазаларды алдын ала бөлусіз көпфазалы ағындарды сенімді inline-өлшеуге мүмкіндік береді.

Кілт сөздер: ылғалды газ; күкіртті газ; көпфазалы ағын; интеллектуалды өлшеу; цифрлық кен орны; жасанды интеллект.

**INTELLIGENT METHODS FOR MEASUREMENT AND CONTROL
OF WET AND SOUR GAS FLOW RATE: A REVIEW OF TECHNOLOGIES
FOR DIGITAL OILFIELDS**

Tazhieva G.N.¹, Dayev Zh.A.^{2*}

¹ D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Oskemen, Kazakhstan

^{2} Baishev University, Aktobe, Kazakhstan*

**Corresponding author: zhand@yandex.ru*

Abstract

Accurate measurement and control of wet and sour gas flow remain critical challenges in modern oil and gas production, transportation, and processing systems. In operating conditions, natural and associated gases rarely exist as single-phase media and commonly contain liquid components, primarily water and hydrocarbon condensates, forming multiphase mixtures. Even insignificant amounts of liquid significantly affect flow hydrodynamics and introduce substantial uncertainties in conventional gas flow measurement methods. This review analyzes the importance of flow rate measurement in binary gas–water systems and examines the evolution

of wet gas metering technologies from traditional approaches toward intelligent measurement concepts. The study summarizes the physical characteristics of wet gas flows, including phase slip, flow regime variability, and the influence of liquid loading on measurement accuracy. The limitations of classical metering techniques are discussed from a system perspective, emphasizing that measurement errors originate mainly from the dynamic structure of multiphase flow rather than from individual sensor inaccuracies. Particular attention is given to operational challenges associated with sour gas environments, where corrosion, sensor degradation, and changing thermophysical properties further complicate reliable measurements. Based on the analyzed literature, current development trends indicate a transition from single-instrument solutions to hybrid and multisensory measurement systems capable of simultaneously estimating flow rate and phase composition. The review highlights emerging directions involving data-driven modeling, artificial intelligence, and digital twin technologies for real-time identification of flow conditions. These approaches enable adaptive measurement strategies that reduce dependence on empirical correlations and improve robustness under variable operating regimes. The review demonstrates that future wet gas metering systems will function as intelligent monitoring platforms integrated into digital oilfield infrastructures. The combination of multiphysical sensing, advanced signal processing, and machine learning provides a pathway toward reliable inline measurement without phase separation. The presented analysis outlines key technological challenges and identifies research directions necessary for developing next-generation intelligent measurement systems for complex multiphase gas flows.

Keywords: wet gas; sour gas; multiphase flow; intelligent metering; digital oilfield; artificial intelligence.

Введение

Современные технологические процессы добычи, подготовки и транспорта углеводородного сырья характеризуются значительным усложнением фазового состава транспортируемых потоков. Природный и попутный нефтяной газ в реальных промысловых условиях практически никогда не представляет собой сухую однофазную среду. В процессе эксплуатации месторождений газовый поток содержит жидкие компоненты – пластовую воду, конденсат, продукты химических реакций и примеси сернистых соединений. Такие потоки относятся к категории влажного газа и представляют собой многокомпонентные двухфазные системы, в которых даже незначительное содержание жидкости существенно влияет на гидродинамические характеристики течения и точность средств измерения и контроля расхода.

Особую практическую значимость представляет бинарная система «газ – вода», являющаяся базовой моделью большинства промысловых потоков. Наличие воды в газе обусловлено как естественными геологическими условиями, так и термодинамическими процессами конденсации влаги при изменении давления и температуры. Влажный газ широко встречается на этапах добычи, транспорта и первичной подготовки продукции скважин, а точное определение расхода газовой и жидкой фаз является критически важным для коммерческого учета, распределения добычи между скважинами и обеспечения устойчивой работы технологического оборудования.

Развитие методов измерения и контроля влажного газа обусловлено необходимостью повышения точности учета продукции месторождений, снижения эксплуатационных рисков и перехода нефтегазовой отрасли к цифровым интеллектуальным системам управления. Согласно современным представлениям, влажным газом принято считать двухфазный поток с объемной долей газа более 90–95 %, однако даже при столь высокой газовой составляющей присутствие жидкой фазы приводит к существенным систематическим ошибкам традиционных средств измерения и контроля расхода. В связи с этим измерение и контроль расхода влажного газа перестает быть задачей классической расходомерии и превращается в задачу

диагностики структуры многофазного потока с помощью информационно-измерительных управляющих систем.

Физические процессы, происходящие в газовойдажных потоках, принципиально отличаются от однофазного течения. Основной сложностью является различие скоростей движения фаз, обусловленное разницей плотностей и действием гравитационных сил. Газовая фаза движется быстрее жидкой, что приводит к возникновению эффекта скольжения фаз и формированию неоднородной структуры потока [1-4].

Для количественного описания влажности газа широко применяется параметр Локхарта – Мартинелли, характеризующий относительное содержание жидкости в двухфазной системе. Данный параметр позволяет оценивать степень увлажнения потока независимо от типа измерительного устройства и используется в большинстве международных стандартов измерения параметров влажного газа. Практически установлено, что режим влажного газа соответствует значениям параметра менее 0,3, однако даже при таких условиях жидкая фаза способна занимать значительную часть поперечного сечения трубопровода, что приводит к существенному искажению результатов измерений расхода. В соответствии с работами [5-7] этот параметр количественно оценивается в виде следующей формулы:

$$X_{LM} = \frac{Q_l}{Q_g} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}}, \quad (1)$$

где Q_l – массовый расход жидкой фазы, Q_g – массовый расход газовой фазы, ρ_l – плотность жидкой фазы, ρ_g – плотность газовой составляющей потока.

Другим количественным показателем соотношения фаз в потоке или соотношения жидкой и газовой фаз является объемная доля газовой фракции (Gas volumetric fraction):

$$GVF = \frac{Q_g}{Q_g + Q_l} = \frac{1}{1 + Q_l/Q_g} = \frac{\sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}}}{X_{LM} + \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}}}. \quad (2)$$

Важным аспектом является различие между объемной долей газа и истинной долей газа в сечении трубопровода. В условиях двухфазного течения данные величины не совпадают из-за различия локальных скоростей фаз. Игнорирование этого фактора приводит к неверной интерпретации измерительных данных и является одной из основных причин ошибок при применении традиционных методов расходомерных систем.

Дополнительную сложность создают режимы течения газожидкостных смесей. В зависимости от давления, скорости фаз и геометрии трубопровода могут формироваться пузырьковый, стратифицированный, волновой, снарядный и кольцевой режимы течения. Для условий влажного газа наиболее характерным является кольцевой режим, при котором жидкость движется в виде пленки вдоль стенок трубопровода, а газ занимает центральную часть потока. Необходимо не только выполнять контроль фаз по формулам (1) или (2), но и учитывать относительное изменение одной из фаз над другой в виде отдельных режимов течения. Изменение режима течения приводит к резкому изменению показаний измерительных приборов и средств автоматизации, составляющих

измерительные каналы системы, что требует учета гидродинамической структуры при построении автоматизированных систем измерения [5-8, 17, 20].

Помимо технологических процессов, где имеет место двухфазный или двух- и многокомпонентный поток, существуют отрасли, в которых возникают такие течения в процессе эксплуатации основных процессов. Например, одной из фундаментальных особенностей современных газовых месторождений является постепенное увеличение обводнённости добываемой продукции по мере истощения пластов. На поздних стадиях разработки содержание жидкости в газовом потоке возрастает, что приводит к переходу режимов течения от условно однофазных к устойчивым газожидкостным структурам. В результате традиционные системы коммерческого учета газа, ориентированные на измерение и контроль расхода и количества сухого газа, начинают демонстрировать значительные систематические отклонения. Практика эксплуатации показывает, что даже доли процента жидкости способны вызвать ошибки измерения и контроля расхода газа, превышающие допустимые метрологические нормы.

Особую актуальность проблема приобретает при добыче сернистого газа. Наличие сероводорода, углекислого газа и водяного пара формирует агрессивную коррозионную среду, которая одновременно воздействует как на технологическое оборудование, так и на измерительные устройства и средства автоматизации. В условиях повышенной влажности ускоряется эрозия чувствительных элементов систем, изменяются коэффициенты истечения, ухудшается стабильность сигналов датчиков давления и скорости потока. Таким образом, задача измерения и контроля расхода влажного газа становится комплексной междисциплинарной проблемой, объединяющей гидродинамику многофазных потоков, метрологию, автоматизацию процессов, материаловедение и методы интеллектуальной обработки данных.

Современный этап развития нефтегазовой отрасли характеризуется переходом к концепции беспарационной добычи и транспортировки продукции. Использование классических сепараторов на каждой кустовой площадке экономически и энергетически неэффективно, особенно для удалённых и морских месторождений. В связи с этим активно развиваются методы inline-измерения расхода влажного газа, позволяющие определять расход фаз непосредственно в трубопроводе без предварительного разделения смеси. Однако реализация таких систем требует глубокого понимания физики двухфазного течения и разработки специальных систем контроля и измерительных алгоритмов.

Точное измерение и контроль расхода и количества влажного газа имеет ключевое значение для технологических и экономических задач современной нефтегазовой отрасли. Во-первых, параметры газовой и жидкой фаз напрямую определяют дебит скважин и используются при распределении добычи между участниками разработки месторождения. Ошибки измерения приводят к неправильной оценке продуктивности скважин и существенным финансовым потерям.

Во-вторых, наличие воды и сернистых компонентов существенно влияет на надежность технологического оборудования. Влага ускоряет процессы коррозии трубопроводов, способствует образованию гидратов и ухудшает условия работы компрессорных станций. Сернистые соединения дополнительно усиливают коррозионную активность среды, повышая требования к непрерывному контролю параметров потока.

В-третьих, современные концепции цифровых месторождений предусматривают отказ от громоздких сепарационных установок и требуют обеспечить переход к

измерениям компонентов или фаз непосредственно в трубопроводах. Это требует разработки высокоточных автоматизированных систем измерения и контроля параметров влажного газа, способных работать в режиме реального времени без предварительного разделения фаз.

Таким образом, системы измерения и контроля параметров влажного газа становятся элементом не только коммерческого учета, но и интеллектуального управления технологическими процессами. Поэтому в рамках настоящей работы ставится задача выполнения обзора современных методов и систем контроля расхода и количества двухфазных (двухкомпонентных) потоков.

Методы и материалы исследования

Настоящее исследование выполнялось в форме аналитического обзора научных публикаций, которые посвящены современным методам и системам измерения и контроля расхода многофазных потоков, интеллектуальным системам и цифровым двойникам технологических процессов. Научный поиск проводился по тематическим ключевым словам и их комбинациям, которые охватывают предметную область настоящего исследовательского обзора.

При отборе публикаций для данного обзора учитывались их тематическое соответствие задачам данного исследования, наличие полного описания физических принципов методов и систем, сведения о технических и метрологических характеристиках, областях применимости и ограничения для этих методов и систем.

Анализ отобранных источников проводился по следующим критериям: используемый физический принцип измерения; зависимость результатов от структуры и режима многофазного потока; диапазон содержания жидкой фазы; возможность определения расхода отдельных фаз; метрологические характеристики; требования к вычислительным ресурсам; возможность интеграции с методами машинного обучения, софт-сенсорами и цифровыми двойниками. Результаты сравнительного анализа были систематизированы в таблицах, которые отражают аппаратно-измерительные и программно-алгоритмические аспекты построения интеллектуальных систем измерения и контроля расхода влажного газа.

Современные методы измерения и контроля влажного газа можно условно разделить на две взаимосвязанные группы: методы определения расхода потока и методы определения фазового состава. Эффективная автоматизированная измерительная система должна одновременно решать обе задачи.

Наиболее распространенными являются методы переменного перепада давлений, основанные на измерении перепада давления при прохождении потока через сужающие устройства. К данной группе относятся диафрагмы, трубы Вентури и конусные расходомеры. Их широкое применение объясняется конструкционной простотой, надежностью и накопленным опытом эксплуатации в нефтегазовой промышленности.

Однако присутствие жидкой фазы приводит к эффекту завышения показаний расхода газа, известному как *over-reading*. Жидкость увеличивает перепад давления, что приводит к ошибочному росту вычисленного расхода. Для компенсации данной ошибки разрабатываются корреляционные модели, учитывающие параметры двухфазного потока, однако их применимость ограничена диапазонами давления, геометрии трубопровода и режимов течения.

Труба Вентури получила наибольшее распространение в системах измерения влажного газа благодаря высокой устойчивости к эрозии, малым потерям давления и способности работать в широком диапазоне расходов. Многие промышленные системы

контроля расхода влажного газа используют именно данный тип преобразователей расхода как базовый элемент автоматизированной измерительной системы [8-14].

Экспериментальные исследования показывают, что величина ошибки на базе систем с трубой Вентури зависит от параметра Локхарта – Мартинелли, плотностного соотношения фаз и режима течения. В практических условиях жидкая пленка на стенках трубопровода может изменять эффективный диаметр проходного сечения, что приводит к нестабильности коэффициента истечения системы.

На примере труб Вентури было показано, что точность измерения газа может быть восстановлена только при использовании корреляционных моделей, учитывающих жидкостную нагрузку и характеристики течения. При этом универсальной коррекции не существует: каждая модель применима лишь в ограниченном диапазоне давлений и геометрических параметров установки. Основной сложностью реализации таких методов является необходимость знания доли жидкости до момента измерения, что фактически превращает задачу измерения и контроля расхода в обратную задачу идентификации двухфазного потока.

Дополнительной проблемой является изменение структуры потока после прохождения сужающего устройства. Эксперименты с многоотверстными и щелевыми диафрагмами показали, что устройство интенсивно атомизирует жидкость, переводя стратифицированный поток в кольцевой или туманообразный режим. Хотя это может улучшать однородность смеси, одновременно усложняется математическое описание процесса и возрастает неопределенность измерения и контроля жидкой фазы.

Альтернативным решением являются конусные расходомеры, обладающие компактностью и меньшими требованиями к длине прямых участков трубопровода. Несмотря на устойчивость к возмущениям потока, точное определение жидкой фазы при их использовании остается сложной задачей.

Помимо перечисленных устройств применяются методы, основанные на динамике потока. Вихревые расходомеры используют частоту образования вихрей, возникающих за обтекаемым телом, что обеспечивает хорошую линейность измерений. Однако их показания существенно зависят от режима течения и вибраций трубопровода. Кориолисовые расходомеры позволяют напрямую измерять массовый расход, но при наличии двух фаз наблюдаются ухудшение повторяемости и нестабильность сигналов вследствие сложного взаимодействия газа и жидкости внутри измерительной трубки.

В частности, системы с вихревыми преобразователями представляют альтернативный подход, основанный на измерении частоты образования вихрей Кармана за обтекаемым телом. Частота вихреобразования линейно связана со скоростью потока, что обеспечивает хорошие метрологические характеристики при измерении и контроле сухого природного газа. В условиях влажного газа принцип работы существенно усложняется. Капли жидкости взаимодействуют с вихревой структурой, изменяя устойчивость вихревого следа. Исследования, приведённые в обзорных работах [14 – 15], показали, что при увеличении содержания жидкости наблюдаются сильные флуктуации сигнала и зависимость погрешности от режима течения растут. При высоких скоростях газа происходит уменьшение удержания жидкости и снижение ошибки, тогда как при переходных режимах возникают скачкообразные изменения показаний.

Практическая реализация вихревых методов усложняется также внешними вибрациями трубопроводов и компрессорного оборудования, частоты которых могут совпадать с частотой вихреобразования. Это требует применения сложных алгоритмов фильтрации сигналов и дополнительных датчиков вибрации. В результате

автоматизированная измерительная система перестает быть простым расходомером и превращается в многоканальную диагностическую установку.

Кориолисовые расходомеры рассматриваются как перспективный инструмент благодаря способности напрямую измерять массовый расход среды. Принцип действия основан на регистрации силы Кориолиса, возникающей при колебании измерительной трубки [15, 16, 17].

Несмотря на высокую точность при работе с жидкостями, применение кориолисовых расходомеров в условиях влажного газа сопровождается серьезными трудностями. Наличие двух фаз вызывает сложные колебательные режимы трубки, что приводит к снижению повторяемости показаний и росту шумов сигнала. Экспериментальные исследования показали, что даже при малом содержании жидкости возможно возникновение нестабильных режимов измерения.

Одной из причин является динамическое перераспределение фаз внутри измерительного канала. Газ и жидкость реагируют на вибрации различным образом, что приводит к фазовым сдвигам сигнала и необходимости применения адаптивных алгоритмов обработки. В современных работах предлагается использовать дополнительный параметр, мощность возбуждения колебаний, как индикатор влажности газа. Однако внедрение подобных методов требует значительных вычислительных ресурсов и усложняет процедуру калибровки каналов системы.

Ультразвуковые расходомеры широко применяются для измерения расхода сухого газа благодаря отсутствию гидравлических потерь и высокой точности. Метод основан на измерении времени прохождения акустического сигнала вдоль и против потока [17-20].

В газожидкостных бинарных смесях распространение ультразвуковых волн существенно изменяется из-за рассеяния сигнала на каплях жидкости и газожидкостных границах. Это приводит к ослаблению сигнала, появлению многолучевых эффектов и нестабильности измерений скорости потока. В ряде экспериментальных работ отмечено, что устойчивое измерение возможно только при очень малом содержании жидкости, тогда как при переходе к кольцевому режиму погрешность резко возрастает.

Сложность реализации ультразвуковых методов заключается также в необходимости точного знания акустических свойств среды, которые зависят от давления, температуры и состава газа. Для сернистых газов дополнительно возникает проблема химической стойкости преобразователей и деградации акустических путей.

Анализ современных исследований в данной области показывает, что наибольший интерес представляет объединение нескольких измерительных принципов в единую систему. Гибридные измерители обычно сочетают преобразователи переменного перепада давлений с датчиками фазовой доли, микроволновыми или инфракрасными сенсорами. Такой подход позволяет одновременно определять расход и фазовый состав смеси.

В обзорной работе [20] отмечается, что большинство коммерческих систем влажного газа представляют собой именно гибридные установки, объединяющие несколько однофазных измерителей потока, работающих совместно. Многоканальные структуры блоков систем могут быть выполнены в виде отдельных агрегированных подсистем, которые реализуются на методах с различными способами практической реализации. Современные методы организации цифровых производств позволяют выполнять эти задачи. Например, быстроразвивающиеся инструменты SCADA-систем позволяют реализовывать цифровые двойники полевых многокомпонентных и

многофазных расходоизмерительных систем, которые разворачиваются в виде подсистем с различным уровнем доступа на цифровом месторождении, с одной стороны. С другой стороны, на таких цифровых месторождениях могут быть вполне реализованы подсистемы принятия решений для гибкого управления технологическими операциями в условиях производства для оперативного персонала. Такие задачи могут быть решены с помощью привлечения метода нечеткой логики, машинного обучения и экспертных систем. Другими словами, автоматизированные и автоматические системы контроля и учета расхода многофазных потоков могут быть реализованы в целях повышения эффективности работы оборудования и процессов добычи на различных месторождениях. Верхний уровень таких систем и обработка информации, которая отправляется из оборудования, смонтированного непосредственно на производственных участках, реализуется довольно быстро и относительно менее затратно, чем инструментальная реализация основных элементов на самом нижнем уровне.

Несмотря на высокую точность различных преобразователей и элементов подсистем на нижнем уровне, их внедрение сопровождается рядом трудностей. Основными из них являются высокая стоимость оборудования, необходимость сложной калибровки на многофазных стендах и зависимость результатов измерения от конкретных условий эксплуатации.

Дополнительной проблемой является отсутствие универсальных математических моделей, способных корректно описывать все режимы течения. Большинство существующих алгоритмов основано на эмпирических корреляциях, полученных для ограниченных диапазонов параметров. При выходе за пределы экспериментальной базы погрешность измерения может существенно возрасти.

Обобщая результаты данного обзора, можно выделить ряд фундаментальных проблем, характерных практически для всех методов измерения и контроля бинарных смесей типа влажного газа.

Во-первых, измерительная автоматизированная система сталкивается с неопределённостью структуры потока. Режим течения может изменяться во времени даже при постоянных расходах фаз, что делает невозможным использование статических калибровочных коэффициентов.

Во-вторых, наблюдается сильная взаимосвязь измеряемых параметров. Давление, скорость, плотность и фазовая доля оказываются зависимыми величинами, поэтому измерение одной характеристики неизбежно требует оценки других параметров.

В-третьих, сернистые компоненты газа создают дополнительные эксплуатационные ограничения, включая коррозию, загрязнение сенсоров и изменение тепловых и акустических свойств среды.

В-четвертых, ключевой сложностью остается отсутствие универсального измерительного преобразователя. Современная практика подтверждает, что высокая точность может быть достигнута только при использовании комплексных измерительных систем, сочетающих физические модели течения, многопараметрические датчики и методы интеллектуальной обработки данных.

Ниже в таблице 1 представлен сравнительный анализ, сделанный на основе изучения последних литературных источников, который демонстрирует и обобщает основные свойства и возможности существующих автоматизированных цифровых систем измерения и контроля расхода и количества двухфазовых потоков. В таблице 1 в качестве опорных технологических основ подобных систем выбраны методы и первичные преобразователи расхода, которые часто применяются в мире и в нашей стране многими компаниями.

Таблица 1. Обобщение свойств и возможностей систем

№	Основной тип преобразователя расхода	Зависимость от структуры потока	Диапазон жидкостной составляющей	Требование гибридного преобразователя	Погрешность измерений
1	Сужающие устройства: диафрагмы, трубы Вентури, сопла	Дисперсно-кольцевой поток	$X_{LM} \leq 0.3$ либо $GVF > 95\%$	Высокая необходимость в дополнительном преобразователе	По газу $\pm 2\% \dots \pm 5\%$; По жидкости $\pm 10\% \dots \pm 20\%$
2	Вихревой преобразователь потока	Мелкодисперсный туман	$GVF > 99\%$	Высокая необходимость в дополнительном преобразователе	По газу $\pm 5\% \dots \pm 7\%$; По жидкости нет
3	Кориолисовые массомеры	Мелкодисперсная или квазигомогенная	$GVF > 98\%$ либо $GVF < 10\%$	Имеются собственные алгоритмы	По газу $\pm 2\% \dots \pm 5\%$;
4	Ультразвуковые преобразователи	Гомогенный поток либо расслоение	$GVF > 99\%$	Высокая необходимость в дополнительном преобразователе	По газу $\pm 5\% \dots \pm 10\%$

Анализ основных методов и показателей из таблицы 1 показывает, что чем выше чувствительность первичного преобразователя расхода к структуре газожидкостной смеси, тем сильнее сказываются требования к стабильности этого режима течения, а это приводит к более сложным требованиям математического аппарата моделей. Большинство систем измерения расхода требуют большого количества газовой фракции, также многие системы требуют гомогенную структуру потока. Расслоение потока и появление в нем крупных жидкостных конгломератов сильно увеличивает погрешность измерений расхода и количества газа. Требование низкого содержания жидкой фракции приводит к невозможности измерения расхода и количества жидкой фазы. Алгоритмы и основные физические закономерности многих систем являются довольно сложными и не до конца изучены, поэтому их реализация требует дополнительных устройств на базе микропроцессорной техники на более высоком уровне, где эти алгоритмы могут быть реализованы.

Последнее может значительно усложнить код программы и потребовать более сложных алгоритмов при программной реализации систем. Точность систем также сохраняется до тех пор пока показатели обводненности потока не начинают расти за пределы рекомендуемых значений.

Данный аналитический обзор обосновывает неизбежность перехода от чисто физических моделей расходомерии к интеллектуальным виртуальным датчикам (софт-сенсорам) на базе методов машинного обучения. Например, поскольку точный учет эффектов асимметричного сдвига фаз и волнового преломления акустических лучей на межфазных границах приводит к системам дифференциальных уравнений, не имеющим аналитического решения в реальном времени, применение алгоритмов искусственного интеллекта становится единственным инструментом обеспечения высокоточного коммерческого и оперативного учета. Таким образом, структурирование областей применимости физических методов позволяет определить оптимальные входные векторы признаков для нейросетевых моделей цифровых двойников нефтегазовых потоков, комбинируя стабильность сужающих устройств с диагностической емкостью кориолисовых и ультразвуковых преобразователей.

Наконец, можно заключить, что реализация практически любых алгоритмов, которые сопровождали бы отдельный учет отдельных фаз и компонентов потока при получении валидированных методов, доступна для реализации на самом верхнем уровне систем автоматизации цифрового месторождения для более эффективного и гибкого управления производством.

Результаты исследования и обсуждение

Анализ современных исследований измерения и контроля параметров влажного и сернистого газа показывает, что ключевые изменения происходят не на уровне отдельных измерительных устройств, а на уровне концепции измерения и контроля в целом. Исторически развитие расходомерии основывалось на предположении, что измеряемая среда может быть описана усреднёнными параметрами потока. Однако для влажного газа данное предположение оказывается принципиально неверным. Полученные в многочисленных экспериментальных исследованиях результаты демонстрируют, что основным источником неопределённости измерений является не погрешность датчиков, а динамическая изменчивость структуры многофазного потока.

В условиях бинарных систем «газ – вода» поток представляет собой нелинейную самоорганизующуюся систему, в которой распределение фаз непрерывно изменяется под действием давления, температуры и геометрии трубопровода. Следствием этого является фундаментальное ограничение традиционной метрологии: измерение расхода влажного газа невозможно свести к измерению одной физической величины. Вместо этого возникает задача оценки скрытого состояния среды [17].

Таким образом, главный результат проведённого анализа заключается в переходе научного сообщества от приборо-ориентированного подхода к информационно-ориентированному измерению, где измерительная автоматизированная система контроля и управления рассматривается как инструмент идентификации состояния потока.

Сопоставление экспериментальных данных различных исследований показывает наличие общего противоречия. С увеличением сложности измерительных приборов точность измерения возрастает лишь в ограниченном диапазоне условий эксплуатации. При изменении режима течения, состава газа или уровня жидкостной нагрузки наблюдается деградация метрологических характеристик независимо от принципа измерения [17].

Причина данного явления заключается в том, что большинство существующих методов основывается на статических корреляциях, полученных в лабораторных условиях. Эти корреляции предполагают квазистационарность потока, тогда как реальные промышленные системы характеризуются стохастическими колебаниями параметров. В результате измерительная система фактически работает вне области валидности собственных моделей.

Выявленная проблема указывает на фундаментальный вывод: дальнейшее повышение точности невозможно за счёт совершенствования отдельных датчиков. Необходим переход к методам, способным адаптироваться к изменяющемуся состоянию среды.

Современные тенденции развития измерения и контроля расхода влажного газа демонстрируют формирование нового класса систем – интеллектуальных многофизических измерительных комплексов. В отличие от традиционных расходомерных систем, такие системы используют совокупность разнородных сигналов:

давление, вибрации, акустические характеристики, флуктуации скорости, энергетические параметры потока [18].

Ключевым элементом становится не сам преобразователь или датчик, а алгоритм интерпретации данных. Измерение и контроль превращаются в задачу восстановления параметров потока по косвенным признакам. Это соответствует современной концепции «soft sensing», широко применяемой в сложных технологических процессах [18, 19, 21, 22, 23, 24, 25].

В данном контексте влажный газ рассматривается как скрытая динамическая система, состояние которой не может быть измерено напрямую [21, 22, 25]. Следовательно, измерительная автоматизированная система должна выполнять функции наблюдателя состояния, аналогично задачам современной теории управления.

Наиболее значимое направление будущего развития связано с внедрением методов искусственного интеллекта и машинного обучения. Проведённый анализ показывает, что именно алгоритмы машинного обучения способны преодолеть ключевые ограничения классических моделей.

Основное преимущество методов искусственного интеллекта заключается в способности выявлять нелинейные зависимости между параметрами потока без явного задания физической модели. В условиях влажного газа, где взаимодействие фаз носит сложный стохастический характер, такие методы позволяют реконструировать структуру потока по многомерному набору измерительных сигналов. Поэтому перспективными направлениями являются применение нейронных сетей для оценки фазовой доли, применение ансамблевых моделей прогнозирования расхода, глубокое обучение для классификации режимов течения и построение гибридных физико-информационных моделей.

Особенно важным является возможность непрерывного самообучения измерительной автоматизированной системы на основе эксплуатационных данных месторождения. Это принципиально меняет философию метрологии: вместо универсального расходомера появляется адаптивная измерительная платформа, оптимизирующая собственные параметры в процессе работы.

Альтернативным и одним из наиболее перспективных направлений развития является создание цифровых двойников многофазного потока. Цифровой двойник представляет собой вычислительную модель трубопроводной системы, работающую синхронно с реальным объектом и постоянно обновляющуюся на основе измерительных данных.

В рамках такой концепции измерение и контроль расхода перестает быть конечной целью. Вместо этого формируется непрерывная оценка состояния потока, включающая распределение фаз, вероятность возникновения slug-режимов, образование гидратов, изменения гидравлического сопротивления.

Использование цифровых двойников позволяет компенсировать отсутствие прямых измерений и существенно снижает зависимость результатов от конкретного типа расходомерного преобразователя.

Анализ современных публикаций показывает тенденцию к объединению функций измерения и управления. Измерительная система влажного газа постепенно превращается в элемент системы принятия решений.

В будущей системе измерения и контроля расхода будет выполняться одновременно несколько функций, как измерение, диагностика состояния трубопровода, прогноз аварийных режимов, оптимизация режима добычи.

Особенно важна данная тенденция для сернистых газов, где раннее обнаружение изменений структуры потока позволяет предотвращать ускоренную коррозию и аварийные ситуации.

Как было описано выше перенос основных функций систем измерения с аппаратно-физических концептов на программно-алгоритмический уровень развития систем требует четкой классификации методов реализации этих направлений со строгим сравнительным анализом программных компонентов. Поэтому в таблице 2 приведена структурированная система критериев и методов реализации программно-алгоритмической части систем на верхнем уровне.

Систематизация и анализ информации в таблице 2, позволяет распределить программные компоненты алгоритмов по уровням автоматизации цифрового месторождения. Детерминированные уровни с небольшими итерациями в алгоритмах можно легко организовать на уровне программируемых логических контроллеров (ПЛК) для того, чтобы обеспечить режим реального времени для исследуемых систем. Методы и алгоритмы, которые строят предиктивные модели для софт-сенсорных систем, должны быть реализованы на методах машинного обучения и гибридных цифровых двойников, потому что требуют агрегации большого количества данных из систем диспетчерского управления типа SCADA-систем и систем управления базами данных реального времени.

Таблица 2. Методы программной реализации алгоритмов и обработки данных систем

№	Наименование метода реализации программного компонента	Описание алгоритмической основы	Вычислительные ресурсы для реализации	Входные признаки нижнего уровня	Риски реализации
1	Жесткие объектные модели на основе физики процессов	Численное решение систем нелинейных уравнений (итерационные циклы Рафсона, коррекции Чисхолма и т.п.)	Низкие ресурсы. Реализуются на уровне контроллеров (ПЛК) или промышленных компьютеров	Первичные измерительные данные с полевых устройств и преобразователей	Накопление погрешностей при выходе за рекомендуемые границы параметров
2	Статистические софт-сенсорные модели	Статистический анализ временных рядов, авторегрессионные модели	Средние ресурсы. Уровень SCADA-серверов	Первичные данные, контроль флуктуаций параметров, статистические наблюдения	Высокая чувствительность к задержкам передачи данных
3	Машинное обучение и интеллектуальные модели	Глубокие нейронные сети, решающие деревья (MLP, LSTM, RF) и т.п.	Высокие ресурсы. Серверный уровень вычислений и обработки	Исторический массив данных глубиной десятки лет	Склонность к переобучению, зависимость от данных постоянна
4	Гибридные цифровые двойники	Интеграция нейросетевых моделей с жесткими балансовыми уравнениями	Очень высокие ресурсы. Распределенная микросервисная архитектура сетей	Сквозной вектор данных из поля с массивом исторических данных	Экстремальная сложность синхронизации данных и обработки результатов

Таким образом, измерительная автоматизированная система становится частью киберфизической инфраструктуры цифрового месторождения. Несмотря на очевидные преимущества, внедрение интеллектуальных методов измерения и контроля сталкивается с рядом серьёзных ограничений.

Первым барьером является отсутствие стандартизированной метрологической базы для алгоритмов искусственного интеллекта. В отличие от классических приборов, модели машинного обучения трудно поверять традиционными методами.

Вторым ограничением является дефицит репрезентативных обучающих данных. Многофазные стенды обладают высокой стоимостью эксплуатации, поэтому экспериментальные базы данных остаются ограниченными.

Третьим фактором является необходимость устойчивой работы алгоритмов в агрессивной среде сернистого газа, где возможны деградация сенсоров и изменение характеристик сигналов. Поэтому преодоление указанных барьеров требует совместного развития метрологии, вычислительных технологий и промышленных стандартов.

На основании проведённого анализа можно сформулировать вероятную архитектуру будущих систем измерения и контроля расхода влажного газа. Такие системы будут обладать следующими характеристиками:

- мультисенсорная структура;
- непрерывная идентификация режима течения;
- самообучающиеся алгоритмы;
- интеграция с цифровыми двойниками;
- прогнозирование технологических рисков.

Иными словами, развитие данного направления движется от измерительного прибора к автоматизированной интеллектуальной информационной системе.

Заключение

Проведённый обзор методов измерения и контроля расхода влажного и сернистого газа показал, что современные газовые потоки нефтегазовой отрасли представляют собой сложные многофазные системы, для которых классические подходы однофазной расходомерии оказываются недостаточными. Основным источником неопределённости измерений и контроля является изменчивая структура бинарных газожидкостных смесей, прежде всего системы «газ – вода», определяющая гидродинамическое поведение потока и метрологические характеристики измерительных устройств.

Анализ существующих методов свидетельствует, что повышение точности измерения не может быть достигнуто исключительно за счёт совершенствования отдельных приборов. Ограничения традиционных подходов обусловлены нелинейностью многофазного течения, зависимостью результатов измерений от режима потока и влиянием эксплуатационных факторов, включая агрессивные свойства сернистых компонентов газа. В связи с этим современное развитие подобных систем характеризуется переходом от прибороориентированных решений к комплексным мультисенсорным измерительным системам контроля.

Перспективным направлением является интеграция физических моделей многофазного течения с методами искусственного интеллекта, позволяющими выполнять идентификацию состояния потока в режиме реального времени. Использование алгоритмов машинного обучения, цифровых двойников и интеллектуальных систем обработки данных открывает возможность создания адаптивных измерительных комплексов, способных функционировать в широком диапазоне технологических условий без предварительной сепарации фаз.

Таким образом, дальнейшее развитие методов измерения расхода влажного газа связано с формированием интеллектуальных киберфизических систем мониторинга, обеспечивающих не только высокоточную оценку расхода, но и поддержку управления технологическими процессами добычи, транспорта и подготовки углеводородного сырья. Реализация данного подхода является ключевым условием повышения эффективности цифровых нефтегазовых производств и обеспечения промышленной безопасности при эксплуатации месторождений сложного состава.

Во время подготовки данной рукописи авторы использовали инструменты искусственного интеллекта (ChatGPT, Gemini) для помощи в редактировании текста. Все научные интерпретации были выполнены авторами. Инструменты с поддержкой ИИ не применялись для сбора данных или статистического анализа. Все содержание материала было проверено и верифицировано авторами, которые несут полную ответственность за содержание и оригинальность рукописи статьи.

References:

1. Zheng W., Liang R., Zhang X., Liao R., Wang D., Huang L. Wet gas measurements of long-throat Venturi tube based on forced annular flow // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2021. – Vol. 81. – Article 102037. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2021.102037>
2. He D., Bai B., Zhang J., Wang X. Online measurement of gas and liquid flow rate in wet gas through one V-Cone throttle device // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2016. – Vol. 75. – P. 129–136. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.11.016>
3. Zhang Y., Wang J. Review of metering and gas measurements in high-volume shale gas wells // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2022. – Vol. 12. – P. 1561–1594. <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01395-9>
4. Liu W., Ma Y., Lyu J., Shao J., Wang S. Wet gas pressure drop across orifice plate in horizontal pipes in the region of flow pattern transition // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2020. – Vol. 71. – Article 101678. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2019.101678>
5. Lockhart R.W., Martinelli R.C. Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes // *Chemical Engineering Progress*. – 1949. – Vol. 45, No. 1. – P. 39–48.
6. Chisholm D. A theoretical basis for the Lockhart – Martinelli correlation for two-phase flow // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 1967. – Vol. 10, No. 12. – P. 1767–1778.
7. Chisholm D. Research note: two-phase flow through sharp-edged orifices // *Journal of Mechanical Engineering Science*. – 1977. – Vol. 19, No. 3. – P. 128–130.
8. Steven R. Wet gas measurements // *Proceedings of the 87th Annual International School of Hydrocarbon Measurement*. – Oklahoma City, USA, 2012. – P. 176–178.
9. Zhang J., Hu W., Tan Z., Zhu H. Study on double differential pressure measurement method of gas-liquid two-phase flow in high gas content wells // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2023. – Vol. 91. – Article 102344. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2023.102344>
10. Pan Y., Hong Y., Sun Q., Zheng Z., Wang D., Niu P. A new correlation of wet gas flow for low pressure with a vertically mounted Venturi meter // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2019. – Vol. 70. – Article 101636. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2019.101636>
11. Ma Y., Ma Y., Lyu J., Liu W. Wet gas pressure drop across multi-orifice plate in horizontal pipe in low gas-phase Froude number region // *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. – 2021. – Vol. 127. – P. 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2021.08.019>
12. Hua C., Geng Y. Wet gas metering technique based on slotted orifice and swirlmeter in series // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2013. – Vol. 30. – P. 138–143. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2013.02.001>
13. He D., Bai B. Numerical investigation of wet gas flow in Venturi meter // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2012. – Vol. 28. – P. 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2012.07.008>
14. Lupeau A., Platet B., Gajan P., Strzelecki A., Escande J., Couput J.P. Influence of the presence of an upstream annular liquid film on the wet gas flow measured by a Venturi in a downward vertical

- configuration // Flow Measurement and Instrumentation. – 2007. – Vol. 18, No. 1. – P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2006.09.002>
15. Dayev Z.A., Yuluyev V.T. Invariant system for measuring the flow rate of wet gas on Coriolis flowmeters // Flow Measurement and Instrumentation. – 2019. – Vol. 70. – Article 101653. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2019.101653>
16. Tan C., Murai Y., Liu W., Tasaka Y., Dong F., Takeda Y. Ultrasonic Doppler technique for application to multiphase flows: a review // International Journal of Multiphase Flow. – 2021. – Vol. 144. – Article 103811. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021.103811>
17. Salehi S.M., Lao L., Xing L., Simms N., Drahm W. Devices and methods for wet gas flow metering: a comprehensive review // Flow Measurement and Instrumentation. – 2024. – Vol. 96. – Article 102518. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2023.102518>
18. Dayev Z.A. General theory of invariant methods for measuring the flow rate of multicomponent flows // Flow Measurement and Instrumentation. – 2022. – Vol. 85. – Article 102145. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2022.102145>
19. Dayev Z.A., Shopanova G., Toksanbaeva B., Yetilmezsoy K., Sultanov N., Sihag P., Bahramian M., Kryan E. Modeling the flow rate of dry part in the wet gas mixture using decision tree/kernel/non-parametric regression-based soft-computing techniques // Flow Measurement and Instrumentation. – 2022. – Vol. 86. – Article 102195. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2022.102195>
20. Beecroft D. Is a wet gas (multiphase) mass flow ultrasonic meter just a pipe dream? // Measurement and Control. – 1998. – Vol. 31 (10). – P. 302–308. <https://doi.org/10.1177/002029409803101003>
21. Sravani V., Santhosh K.V. Soft sensor for an orifice flowmeter in presence of disturbances // Flow Measurement and Instrumentation. – 2022. – Vol. 86. – Article 102178. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2022.102178>
22. Xu F., Wang J., Sakurai K., Sakai Y., Sabu S., Kanayama H., Zhang R., Satou D., Kansha Y. Soft-sensor model for indoor temperature prediction under heating conditions // Thermal Science and Engineering Progress. – 2024. – Vol. 51. – Article 102656. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102650>
23. Gao K., Cheng M., Wu J., Li X., Huang X., Luo X. Flow soft sensing for hydraulic valve with wear degradation based on a data-based orifice flow model // Measurement. – 2026. – Vol. 262. – Article 120111. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.120111>
24. Gryzlov A., Leskens M., Mudde R.F. Soft sensing for two-phase flow using an ensemble Kalman filter // IFAC Proceedings Volumes. – 2009. – Vol. 42. – P. 584–589. <https://doi.org/10.3182/20090712-4-TR-2008.00094>
25. Chen R., Liang J., Li M., Meng E. Recent progress in blood flow sensing // Sensors and Actuators A: Physical. – 2025. – Vol. 387. – Article 116457. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2025.116457>

Information about the authors

G.N. Tazhieva – Master of Automation and Control, Doctoral student, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Oskemen, Kazakhstan; e-mail: akt_zhubatova@mail.ru;

Zh.A. Dayev – corresponding author, Full Professor, Doctor of Technical Sciences, Higher School of Social and Technical Sciences, Baishev University, Aktobe, Kazakhstan; e-mail: zhand@yandex.ru; ORCID:0000-0002-7685-2862.