

На правах рукописи

КОЛОБАЕВ Виктор Александрович

**Стандартные справочные данные о свойствах природного газа, обеспечивающие
повышение точности измерений его расхода и количества**

**Специальность 2.2.4 – Приборы и методы измерений (по видам измерений
(свойства веществ и материалов))**

Автореферат

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва-2024

Работа выполнена в
Федеральном государственном бюджетном учреждении
«Всероссийский научно-исследовательский институт
метрологической службы» (ФГБУ «ВНИИМС»)

- Научный руководитель: Козлов Александр Дмитриевич,
доктор технических наук,
руководитель ГНМЦ «ССД» ФГБУ «ВНИИМС»
- Официальные оппоненты: Григорьев Евгений Борисович,
доктор технических наук, доцент,
главный научный сотрудник Московского центра
исследования пластовых систем (керна и флюиды)
ООО «Газпром ВНИИГАЗ»
Щелчков Алексей Валентинович,
доктор технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник научно-
исследовательского отдела метрологического
обеспечения средств и систем измерений расхода и
количества жидкости ВНИИР - филиал
ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Калининградский
государственный технический университет»
(ФГБОУ ВО «КГТУ»)

Защита диссертационной работы состоится « ____ » _____ 2024 г. в ____ на заседании диссертационного
совета Д 32.1.006.01 при ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической
службы» по адресу: 119361, Москва, ул. Озерная, д.46.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБУ «ВНИИМС» и веб сайте
_____.

Автореферат разослан « ____ » _____ 202_ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 32.1.006.01

Лысенко Валерий Григорьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Настоящая работа посвящена актуальной задаче повышения точности измерений расхода и количества природного газа (ПГ) при учетных операциях за счет применения стандартных справочных данных (ССД). В соответствии с Федеральным законом «Об обеспечении единства измерений» (№ 102-ФЗ от 26 июня 2008 года) – к измерениям, осуществляемым при выполнении государственных учетных операций и учете количества энергетических ресурсов, установлены обязательные метрологические требования.

Наша страна обладает самыми богатыми доказанными запасами ПГ – 38,94 трлн. м³. Идущий на втором месте Иран обладает 31,93 трлн. м³ газа. Сравнение запасов ПГ России и других государств приведено на рисунке 1.

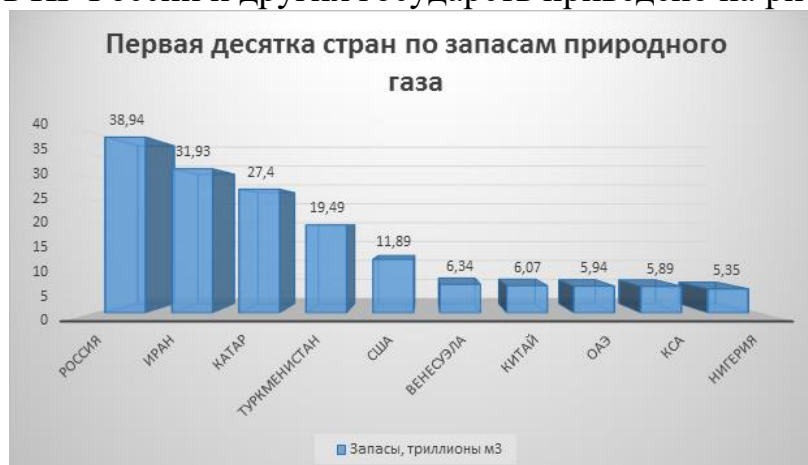


Рисунок 1 – Сравнение запасов ПГ России и других государств

Добыча ПГ колеблется по годам, но ни разу за последние десять лет она не падала ниже 630 млрд. м³. Последние два года добывали свыше 700 млрд. м³, что является абсолютным рекордом. Экспорт ПГ в 2021 году принес в бюджет 5,145 трлн. рублей. По ряду объективных и субъективных причин в 2022 и 2023 годах наблюдается тенденция на 10 % снижение добычи, по сравнению с 2021 годом, но это исключение из системы добычи ПГ, связанное с международными событиями.

В России добычу ПГ осуществляет более 250 предприятий, в том числе:

- 80 входящих в состав вертикально-интегрированных нефтяных компаний (ВИНК);
- 15 дочерних компаний в составе Газпрома;
- 9 структурных подразделений НОВАТЭК;
- 144 независимых нефтегазодобывающих компаний;
- 3 предприятия, работающие на условиях соглашений о разделе продукции (операторы СРП).

Учитывая это ПГ имеет большое значение в структуре экономики государства как важное стратегическое сырье, а организация измерения его расхода и количества является сложной, но важной научно-технической задачей. Решение этой задачи должно приводить к повышению точности измерений расхода и количества ПГ при его коммерческом учете.

Целью измерений при учетных операциях является определение объемов ПГ, проходящего через систему газораспределения, для проведения взаимных расчетов. Главными вопросами учета ПГ являются достоверность учета и

обеспечение совпадения результатов измерения на узлах учета поставщика и потребителей. Измерение расхода и количества ПГ обеспечивается средствами измерений (СИ), которые, в том числе, выполняют операции вычисления расхода, интегрирование и приведение количества газа к стандартным условиям. Программное обеспечение СИ содержит данные о теплофизических свойствах ПГ. От точности этих данных напрямую зависит точность измерений расхода и количества ПГ. Кроме того, для исключения споров между поставщиками и потребителями ПГ данные о свойствах ПГ должны быть признаны всеми сторонами, в том числе государственными органами. Такими данными о свойствах веществ и материалов в нашей стране являются ССД, обладающие наивысшей точностью и утверждаемые полномочным государственным органом – Росстандартом.

Учитывая выше сказанное, повышение точности измерений расхода и количества ПГ на предприятиях нефтегазового комплекса (НГК) за счет разработки и внедрения ССД, основанных на усовершенствованных алгоритмах расчета теплофизических свойств многокомпонентных газовых смесей, представляет собой актуальную задачу, решению которой и посвящена данная диссертационная работа.

Целью диссертационной работы является повышение точности измерений расхода и количества ПГ за счет совершенствования алгоритмов расчета данных о теплофизических свойствах многокомпонентных газовых смесей.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе было необходимо решить следующие **научные задачи**:

1. Провести анализ методов и СИ расхода и количества ПГ для обоснования приоритетного направления исследований по повышению точности измерений при учетных операциях и определения заданных параметров и состава ПГ и требуемой точности измерений.

2. Провести исследования по совершенствованию алгоритмов расчета теплофизических свойств ПГ для уточнения данных о термодинамических свойствах газовых смесей различного компонентного состава в газовой фазе и во флюидной области при востребованных температурах и повышенных давлениях.

3. Провести исследование по применению фундаментального уравнения состояния GERG 2008 для повышения точности расчетов данных, необходимых при измерениях расхода и количества ПГ.

4. Разработать усовершенствованный алгоритм расчета теплофизических свойств многокомпонентных влажных газовых смесей при заданных температуре, давлении и значениях молярных долей "сухих" компонентов, обеспечивающий повышение точности измерений расхода и количества влажных газовых смесей.

5. Разработать расчетную методику на основе модифицированного ФУС GERG-2008 и рассчитать ССД в заданных интервалах параметров, в том числе и для многокомпонентных влажных газовых смесей.

Объектом исследования являются методы и средства измерений расхода и количества ПГ, применяемые для учетных операций в широком диапазоне температур, давлений и состава газа.

Предметом исследований являются теплофизические свойства многокомпонентных газовых смесей, данные о которых используются при проведении измерений расхода и количества ПГ при учетных операциях.

Научная новизна результатов диссертационной работы

1. Получены новые знания по алгоритмам расчетов теплофизических свойств ПГ в широком диапазоне давлений, для востребованных температур и увеличенного компонентного состава.

2. Разработан усовершенствованный алгоритм определения значения предельной равновесной молярной доли (растворимости) водяных паров в газовой смеси при заданных температуре, давлении и значениях молярных долей "сухих" компонентов, что повысило точность расчета теплофизических свойств влажных многокомпонентных газовых смесей.

3. Проведена модификация ФУС GERG-2008, заключающаяся в переопределении значений параметров бинарного взаимодействия водяного пара (H_2O) с основными «сухими» компонентами рассматриваемых газовых смесей, основанная на результатах обработки экспериментальных данных по растворимости H_2O в соответствующих газах, которая позволила повысить точность расчета теплофизических свойств влажных газовых смесей и точность измерения расхода и количества многокомпонентных влажных газовых смесей.

Теоретическая значимость работы

1. Разработан алгоритм расчета теплофизических свойств многокомпонентных газовых смесей, позволяющий определять значения предельной равновесной молярной доли (растворимости) водяных паров в газовой смеси при заданных температуре, давлении и значениях молярных долей "сухих" компонентов, что в итоге повысило точность расчета теплофизических свойств влажных многокомпонентных газовых смесей.

2. Получено модифицированное ФУС, позволяющее рассчитывать более точные данные о теплофизических свойствах влажных газовых смесей и повысить точность измерения расхода и количества многокомпонентных влажных газовых смесей.

Практическая значимость работы

1. Разработанные в диссертации алгоритмы расчетов теплофизических свойств многокомпонентных газовых смесей внедрены в программное обеспечение 17 типов СИ расхода и количества газа.

2. Проведенные исследования и полученные результаты работы использованы при разработке 17 таблиц ССД, четырех методик ГСССД, пяти национальных стандартов системы ГСИ, пяти таблиц ССД СНГ, трех рекомендаций по метрологии (МИ).

3. Результаты работы используются для повышения точности и обеспечения единства измерений расхода и количества ПГ при учетных операциях энергоресурсов за счет внедрения ССД. Разработанные таблицы ССД и методики ГСССД используются так же для расчетов технологического оборудования, трубопроводов, хранилищ ПГ и других задач на предприятиях НГК.

4. Разработанные в ходе диссертационной работы алгоритмы расчетов теплофизических свойств ПГ и многокомпонентных газовых смесей в широком диапазоне температур и давлений применены на 20 предприятиях топливо-

энергетического комплекса (ТЭК).

Научные положения, выносимые на защиту

1. Основным направлением исследований, обеспечивающим повышение точности измерений расхода и количества ПГ, является изучение и уточнение данных о теплофизических свойствах многокомпонентных газовых смесей (плотности, фактора сжимаемости, скорости звука, показателя адиабаты и коэффициента динамической вязкости) и разработка алгоритмов их расчета в рабочем диапазоне температур и давлений.

2. Разработанные уравнения состояния на базе ФУС GERG 2008 позволили повысить в 1,5 и более раз точность расчетов теплофизических свойств ПГ в широком диапазоне давлений, для расширенного состава компонентов и востребованных температур.

3. Модифицированное ФУС GERG-2008 позволило повысить более чем в 1,5 раза точность расчета теплофизических свойств влажных газовых смесей и, как следствие, обеспечило повышение точности измерений расхода и количества многокомпонентных влажных газовых смесей.

4. Полученные данные по свойствам ПГ, утвержденные в качестве ССД, обеспечили повышение точности измерений расхода и количества многокомпонентных газовых смесей в 1,2 и более раз.

Апробация результатов

Основные положения и выводы диссертации доложены на 13 научных конференциях (в том числе на 10 международных или с международным участием).

1. Международная научно-техническая конференция «Метрология-2024» (г. Минск, Республика Беларусь с 8 по 11 апреля 2024 г.).

2. XI Международная метрологическая конференция «Актуальные вопросы метрологического обеспечения измерений расхода и количества жидкостей и газов. Качество углеводородного сырья (нефти и природного газа)» (г. Казань, 31 августа- 1 сентября 2023 г.).

3. Конференция метрологов «Актуальные вопросы обеспечения единства измерений и метрологического обеспечения учета и контроля качества углеводородного сырья и нефтепродуктов в ПАО «Газпром нефть» (г. Москва, 18 - 19 апреля 2022 г.).

4. XVI Конференция «НЕФТЕГАЗСТАНДАРТ-2022» (г. Н. Новгород, 17 ноября 2022 г.).

5. Международный научно-практический семинар «Экспериментальные методы исследования пластовых систем: проблемы и решения» (MERSS-2021) (ООО «Газпром-ВНИИГАЗ» (г. Москва, 1-2 июля 2021 г.).

6. VIII Международная метрологическая конференция «Актуальные вопросы метрологического обеспечения измерений расхода и количества жидкостей и газов» (г. Казань, 2-4 сентября 2020 г.).

7. XV Юбилейная международная конференция «НЕФТЕГАЗСТАНДАРТ - 2021» (г. Санкт-Петербург, 14-16 декабря 2021 г.).

8. XIV Международная конференция «НЕФТЕГАЗСТАНДАРТ» (г. Уфа, 7 - 10 октября 2019 г.).

9. Всероссийская научно-практическая конференция «Законодательная метрология: текущее состояние и основные направления совершенствования

нормативно-правового регулирования» (г. Москва, 2-4 апреля 2019 г.).

10. VIII научно-практическая конференция «Обеспечение единства измерений в области использования атомной энергии» (г. Сочи, 2-4 октября 2018 г.).

11. II Международная научно-практическая конференция: «Актуальные вопросы исследования нефтегазовых пластовых систем» (ООО «Газпром-ВНИИГАЗ» (г. Москва, 19-21 сентября 2018 г.).

12. Конференция «Метрологическое обеспечение нефтегазовой отрасли на Международной выставке нефть и газ» (г. Москва, 18-21 июня 2018 г.).

13. Международная научная конференция «Проблемы и перспективы метрологического обеспечения учета нефти и нефтепродуктов» (ООО «НИИ Транснефть» (г. Москва, 12-13 декабря 2017 г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 15 научных статей – из них 11 статей в журналах, включенных в перечень ВАК, и 3 статьи в Российской газовой энциклопедии, том 3, 2023 г.

Личный вклад автора

1. Все научные положения, выносимые на защиту, и результаты, приведенные в настоящей диссертационной работе, получены автором лично или при его участии.

2. Автор провел анализ:

– методов измерений расхода и количества ПГ для определения необходимых данных и их параметров (7628 ед.), для повышения точности и обеспечения единства измерений учетных операций;

– парка всех типов СИ расхода газа (2355 ед.), на основе официальных данных Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений (ФИФ) для определения направления исследования и разработки необходимых ССД и точностных характеристик свойств и параметров измерения (температура, давление, скорость звука) ПГ;

– нормативных документов (НД), применяемых для измерения расхода и количества ПГ на предприятиях НГК.

3. Автор является ответственным исполнителем в разработке нормативно-методических документов Государственной службы стандартных справочных данных (ГСССД) по созданию и аттестации ССД, а также по повышению точности измерения расхода и количества ПГ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, основных выводов, заключения, списка литературы в количестве 88 наименований и 8 приложений. Текст диссертации изложен на 190 страницах машинописного текста, содержит 23 таблицы, 32 рисунка и 124 формулы.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении формулируется комплекс рассматриваемых вопросов, обосновывается актуальность выбранной проблематики, определяются объект, предмет и область исследования, излагаются цель и основные задачи диссертации, отражаются научная новизна и практическая значимость работы, фиксируются положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлены данные по компонентному составу ПГ, показано значение ССД о свойствах веществ и материалов для обеспечения единства измерений, приведены результаты анализа методов, СИ и нормативных документов, применяемых для измерения расхода и количества ПГ, определено приоритетное направление исследований по повышению точности измерений расхода и количества ПГ при учетных операциях.

ПГ, добываемый из газовых, нефтяных и газоконденсатных месторождений, состоит из углеводородов гомологического ряда метана с общей формулой C_nH_{2n+2} , а также не углеводородных компонентов: азота (N_2), углекислого газа (CO_2), сероводорода (H_2S), меркаптанов (RSH), редкоземельных (инертных) газов (гелия, аргона, криптона, ксенона) (R), ртути Hg . Число углеродных атомов в молекулах углеводородов может достигать 18 и более. На рисунке 2 представлен примерный состав ПГ.

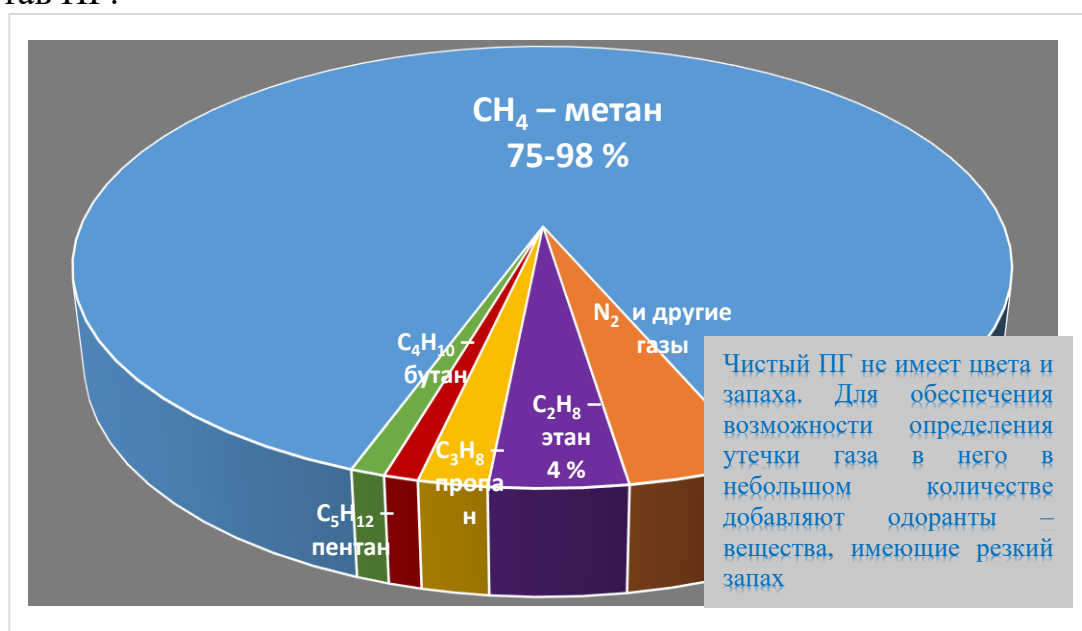


Рисунок 2 – Примерный состав природного газа

Для обеспечения точности измерений расхода и количества ПГ необходимо иметь достоверные данные по теплофизическим свойствам его компонентного состава. Такими данными являются ССД, которые разрабатываются в целях обеспечения единства измерений и представляют собой систематизированные данные о физических константах и свойствах веществ и материалов. ССД имеют статус нормативно-справочных данных и применяются в науке, метрологии, технике и технологиях как данные высшей степени достоверности. Достоверность ССД характеризуют доверительным интервалом, который содержит истинное значение свойства с заданной степенью вероятности. Допустимые значения

характеристик достоверности ССД должны соответствовать требуемому уровню точности измерений и достигнутому уровню научно-технических знаний в рассматриваемой области деятельности. Достоверность ССД определяют в соответствии с ГОСТ Р 34100.3–2017 и Р 50.2.067–2009.

Организация разработки, аттестации и практического внедрения ССД на предприятиях НГК осуществляется в рамках деятельности ГСССД. На рисунке 3 представлена структурная схема ГСССД.



Рисунок 3 – Структурная схема ГСССД

По состоянию на 1 января 2023 г. разработано 49 ССД для НГК, применяемых для повышения точности измерений расхода и количества ПГ. В ходе диссертационной работы обоснован выбор веществ из компонентного состава ПГ, для которых разработаны или актуализированы ССД об их теплофизических свойствах.

С целью определения приоритетного направления исследований по повышению точности измерений расхода и количества ПГ при учетных операциях был проведен анализ НД, СИ и методов измерений.

Для измерения расхода и количества ПГ в НГК самыми востребованными являются межгосударственные стандарты ГОСТ 30319.1 – ГОСТ 30319.3–2015 «Газ природный. Методы расчёта физических свойств». Также проведен анализ основополагающих НД, включающих 10 межгосударственных стандартов, 19 национальных стандартов, 15 стандартов организации, в том числе и СТО ПАО «Газпром».

В результате анализа НД установлены требуемые пределы допускаемой относительной погрешности измерений расхода и количества ПГ, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – Требования к пределам допускаемой относительной погрешности измерений расхода и количества ПГ

Категория узла измерений в зависимости от расхода (рабочий расход, м ³ /ч)	Пределы допускаемых относительных погрешностей измерений расхода и количества газа, %			
	ПП РФ № 1847 (Приказ № 179)	МИ–3082	СТО 5.32–2009	
			А	В
I (более 6000)	1,5	1,0	0,8	1,5
II (более 1200 до 6000 включительно)	2,5	1,5	0,8	1,5
III (более 60 до 1200 включительно)	3,0	2,5	0,8	2,0
IV (до 60 включительно)	4,0	от 3,0 до 4,0	0,8	2,0

А – газоизмерительная станция (ГИС), газораспределительная станция (ГРС), пункты замера расхода газа на границе России и между ОАО «Газпром» и не зависимыми поставщиками».

В – ГРС, автоматизированная газораспределительная станция (АГРС) и пункты, предназначенные для измерения объемов газа, поставляемого отечественным потребителям

Проведенный анализ СИ и методик измерений, применяемых для измерений расхода и количества ПГ, показал, что по состоянию на 1 января 2024 г. в ФИФ зарегистрировано 2355 единиц утвержденных типов СИ расхода и количества ПГ, из них 47 % с применением ССД, и 7628 аттестованных методик (методов) измерений газа, из которых 47 % с применением ССД.

Также установлено, что измерения расхода и количества ПГ, осуществляются одним из методов, указанных на рисунке 4.



Рисунок 4 – Методы измерений расхода и количества ПГ

В таблице 2 приведены основные принципы работы СИ расхода и количества газа с учетом применяемых методов, а также указаны параметры, необходимые для измерения расхода и количества ПГ.

Таблица 2 – Основные принципы работы СИ расхода и количества газа

Метод	Принцип работы	Перечень параметров, необходимых для измерения расхода и количества газа
Диафрагменный	Основан на перемещении подвижных перегородок измерительных камер под давлением измеряемого газа	$\Delta P, P_v, T_v, \rho_c, X_A$ и X_Y , состав газа
Ротационный	Основан на вращении двух соосно расположенных роторов под воздействием поступающего газа	
Турбинный	Основан на вращении турбинного колеса под воздействием потока измеряемого газа, скорость движения которого пропорциональна объемному расходу	$q_v, V, P_v, T_v, \rho_c, X_A$ и X_Y состав газа
Вихревой	Основан на зависимости частоты образования и срыва вихрей, возникающих при обтекании тел, размещенных в потоке, от расхода измеряемого газа.	
Ультразвуковой	Основан на зависимости времени распространения ультразвуковых колебаний через поток измеряемого газа в трубопроводе заданного диаметра.	
Струйный	Основан на измерении частоты переключения струйного генератора, пропорциональной скорости (расходу) газа	$\Delta P, P_v, T_v, \rho_c, X_A$ и X_Y , состав газа
Сужающие устройства	Основан на измерении перепада давлений за счет перехода потенциальной энергии в кинетическую и зависящую от расхода вещества	
Осредняющая напорная трубка	Основан на измерении разности давлений (перепада давлений) между полным давлением потока измеряемой среды и статическим давлением, возникающим при обтекании потоком осредняющей трубки	
Термоанемометрический	Основан на измерении теплосъема сигнала с нагревательного элемента, который при известной теплопроводности среды пропорционален массовому расходу	q_m, m, ρ_c состав газа
Кориолисовый	Основан на измерении ускорения, сообщаемого потоку измеряемого газа колеблющимся трубопроводом, и связанного с массовым расходом	

где: ΔP – перепад давления (Па), P_v – абсолютное давление газа при рабочих условиях (Па), T_v – температура газа при рабочих условиях ($^{\circ}\text{C}$), q_v – объемный расход газа ($\text{м}^3/\text{с}$), V – объем газа при рабочих условиях (м^3), ρ_c – плотность газа при стандартных условиях ($\text{кг}/\text{м}^3$), q_m – массовый расход газа ($\text{кг}/\text{с}$), m – масса газа (кг), X_A, X_Y – молярные доли азота и диоксида углерода в природном газе (%).

По результатам проведенного анализа НД, СИ и методов, применяемых для измерения расхода и количества ПГ, сделан вывод, что для повышения точности измерений расхода и количества ПГ приоритетными являются исследования

теплофизических свойств ПГ: плотности, фактора сжимаемости, скорости распространения звука в среде ПГ, показателя адиабаты и коэффициента динамической вязкости.

Во второй главе рассмотрены принципы работы (устройство) основных типов расходомеров ПГ, формулы расчетов, проводимых при измерениях расхода и количества ПГ, проведен анализ разработанных ССД и методик ГСССД, применяемых для измерений расхода и количества ПГ, а также представлены результаты теоретического исследования применяемых алгоритмов расчета теплофизических свойств ПГ на предприятиях НГК.

Для повышения точности измерений расхода и количества ПГ были рассмотрены принципы работы (устройство) основных типов расходомеров ПГ с формулами расчетов массового и объемного расхода.

Среди СИ для расхода ПГ чаще всего применяют расходомеры, определяющие перепад давления на неподвижном сужающем устройстве, что объясняется целым рядом преимуществ по сравнению с другими типами расходомеров. Такими преимуществами являются: исключительная универсальность применения в широком диапазоне изменения давления, температур и расходов. Сужающими называются технические устройства со сквозным отверстием, устанавливаемые в измерительном трубопроводе круглого сечения для создания перепада давления среды путём уменьшения площади сечения трубопровода (сужения потока). Метод измерения расхода и количества ПГ основан на создании в измерительном трубопроводе с помощью сужающего устройства локального сужения потока. При этом, часть потенциальной энергии потока переходит в кинетическую, средняя скорость потока в месте сужения повышается, а статическое давление становится меньше статического давления перед сужающим устройством. Разность давления тем больше, чем больше расход среды, и, следовательно, она может служить мерой расхода.

Расход ПГ в сужающем устройстве измеряют в единицах массового расхода, объёмного расхода в рабочих условиях и объёмного расхода, приведённого к стандартным условиям.

Массовый расход среды при этом рассчитывают по формуле:

$$q_m = 0,25\pi d_{20}^2 K_{cy}^2 K_{ш} K_{п} C E \varepsilon \sqrt{2\rho \Delta p}, \quad (1)$$

где q_m – массовый расход среды, кг/с; d_{20} – диаметр отверстия сужающего устройства при температуре среды 20 °С, м; K_{cy} – коэффициент, учитывающий изменение диаметра отверстия сужающего устройства, вызванное отклонением температуры среды от 20 °С; $K_{ш}$ – поправочный коэффициент, учитывающий шероховатость внутренней поверхности измерительного трубопровода; $K_{п}$ – поправочный коэффициент, учитывающий притупление входной кромки диафрагмы; C – коэффициент истечения; E – коэффициент скорости входа; ε – коэффициент расширения; ρ – плотность среды, кг/м³; Δp – разность давлений до и после сужающего устройства, Па.

Объёмный расход среды при рабочих условиях рассчитывают по формуле:

$$q_v = 0,25\pi d_{20}^2 K_{cy}^2 K_{ш} K_{п} C E \varepsilon \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}. \quad (2)$$

Объёмный расход среды, приведённый к стандартным условиям,

рассчитывают по формуле:

$$q_V = 0,25\pi d_{20}^2 K_{cy}^2 K_{ш} K_{п} C E \varepsilon \frac{\sqrt{2\Delta p}}{\rho_c}, \quad (3)$$

где ρ_c – плотность среды при стандартных условиях, кг/м³.

Расчёт расхода ПГ выполняют по одной из вышеприведённых формул при известных значениях её составляющих. Часть составляющих определяется путём прямых измерений, другая косвенных, т.е. расчётным методом, как правило, с использованием ССД. При этом методическая погрешность или неопределённость расчёта теплофизических характеристик зависит от используемых справочных данных, от выбранного метода расчёта, компонентного состава и физико-химических параметров ПГ.

Повышение точности и единства измерений при учетных операциях углеводородов как правило происходит за счет применения ССД и методик ГСССД. Применение ССД по свойствам углеводородов способствует получению достоверных данных при измерениях расхода и количества ПГ, т.к. ССД являются наиболее точными, эталонными данными. С этой целью организована работа по разработке и аттестации справочных данных по углеводородам для предприятий НГК. По состоянию на 1 января 2017 г. были разработаны и аттестованы – 49 таблиц ССД и 27 методик ГСССД, являющихся нормативно-справочными данными (НСД) для предприятий НГК. В настоящее время этого недостаточно т.к. реально на предприятиях НГК организован учет большего количества углеводородов.

Проведенный анализ разработанных НСД показал необходимость исследования и разработки ССД по следующим веществам компонентного состава ПГ – этан, пропан, изобутан, нормальный бутан, сероводород.

В ходе проведения теоретического исследования алгоритмов расчета теплофизических свойств ПГ на предприятиях НГК, определено, что, как правило, для измерения расхода и количества ПГ используются межгосударственные стандарты ГОСТ 30319.1 – ГОСТ 30319.3–2015 «Газ природный. Методы расчёта физических свойств», содержащие методы расчёта коэффициента сжимаемости, плотности, показателя адиабаты, коэффициента динамической вязкости и скорости звука ПГ, а также методика ГСССД МР 113–2003 «Определение плотности, фактора сжимаемости, показателя адиабаты и коэффициента динамической вязкости влажного нефтяного газа в диапазоне температур 263...500 К при давлениях до 15 МПа».

Описанные в ГОСТ 30319.1–2015 методы расчёта неприменимы для ПГ, находящегося в жидком или двухфазном состояниях. Состав рассчитываемого ПГ включает только 8 компонентов и ограничен диапазонами мольных долей.

Методы расчёта плотности и коэффициента сжимаемости в ГОСТ 30319.2–2015 основаны на применении уравнения состояния из международного стандарта ISO 12213–3:2006(E) Natural gas — Calculation of compression factor — Part 3: Calculation using physical properties. Расчёт возможен для газа, находящегося при давлениях не выше 7,5 МПа и температурах от 250 К до 350 К.

Методы расчёта плотности, коэффициента сжимаемости, показателя адиабаты и скорости звука в ГОСТ 30319.3–2015 основаны на использовании уравнения состояния AGA8, приведённого в международном стандарте ISO 20765–

1:2005(E), а перевод этого стандарта на русский язык представлен в ГОСТ Р 8.662–2009. Область применения ГОСТ 30319.3–2015 шире, чем у ГОСТ 30319.2–2015: газ может находиться при давлениях до 30 МПа, температурный диапазон от 250 К до 350 К, компонентный состав ПГ, для которого возможен расчёт по данному методу увеличен до 10 веществ, но этого тоже недостаточно, т.к. реальное количество компонентов ПГ более 15 веществ.

Методика ГСССД МР 113–2003 позволяет рассчитывать плотность, фактор сжимаемости, показатель адиабаты и коэффициент динамической вязкости сухих и влажных многокомпонентных газовых смесей переменных составов, характерных для нефтяного газа при давлениях от 0,1 до 15 МПа, что является недостаточным, т.к. реально давление измеряемой среды находится в пределах от 0,1 до 30 МПа.

В ходе исследования установлено, что в ФУС GERG–2008 (далее ФУС) предложены инновационные подходы к расчетам теплофизических свойств ПГ, т.к. имеется два диапазона применимости по параметрам состояния: нормальный и расширенный. В первом случае газовая смесь может находиться при температурах от 90 К до 450 К и давлениях до 35 МПа. Расширенный диапазон позволяет проводить расчет при рабочих температурах от 60 К до 700 К и давлениях до 70 МПа. Газовая смесь может состоять из того же 21 компонента, что и для AGA8. Преимущество в том, что это уравнение может быть экстраполировано за пределы расширенного диапазона применения, где мольное содержание каждого компонента допустимо от 0 до 100 %. Это уравнение состояния также применимо для расчёта свойств для каждого отдельного компонента газовой смеси.

ФУС представляет собой выражение, записанное для приведённой энергии Гельмгольца как функции плотности, температуры и мольной концентрации компонентов смеси. Такая формулировка позволяет аналитически выразить все термодинамические свойства как функции свободной энергии и ее производных по отношению к условиям состояния температуры и плотности. Как правило, нет необходимости в численном дифференцировании или интегрировании в рамках какой-либо компьютерной программы, реализующей этот метод.

По результатам проведенного анализа и теоретического исследования алгоритмов расчета теплофизических свойств ПГ на предприятиях НГК для дальнейшего решения задачи по повышению точности измерений расхода и количества ПГ предложена разработка методики расчета теплофизических свойств расхода и количества ПГ на основе ФУС.

В третьей главе представлена разработанная методика расчета теплофизических свойств многокомпонентных газовых смесей на основе модифицированного ФУС, приведены разработанные ССД по компонентному составу ПГ с оценкой показателей точности данных, а также представлены результаты практического внедрения разработанной методики.

Фундаментальное уравнение состояния GERG–2008 применимо для расчета термодинамических свойств смесей, находящихся в газообразном, жидком и сверхкритическом (флюидном) состояниях. Компонентный состав рассматриваемых смесей может включать в различных комбинациях следующие вещества: метан, азот, диоксид углерода, этан, пропан, н-бутан, изобутан, н-пентан,

изопентан, н-гексан, н-гептан, н-октан, н-нонан, н-декан, водород, кислород, монооксид углерода, вода, сероводород, гелий и аргон. Число компонентов смеси N может варьироваться в диапазоне $1 \leq N \leq 21$.

ФУС имеет следующий вид:

$$F(\rho, T, \vec{x}) = F_0(\rho, T, \vec{x}) + F_{res}(\rho, T, \vec{x}), \quad (4)$$

где F , F_0 и F_{res} – полная свободная энергия, идеально-газовая и неидеальная составляющие свободной энергии, соответственно.

ФУС в безразмерном виде записывается как:

$$f(\omega, \tau, \vec{x}) = f_0(\rho, T, \vec{x}) + f_{res}(\omega, \tau, \vec{x}), \quad (5)$$

где f , f_0 и f_{res} – безразмерная полная свободная энергия, идеально-газовая и неидеальная составляющие свободной энергии, соответственно; относительная плотность $\omega = \rho/\rho_{cm}$; относительная температура $\tau = T/T_{cm}$; ρ_{cm} и T_{cm} – псевдокритические плотность и температура смеси, соответственно.

Уравнение для идеально-газовой составляющей свободной энергии имеет следующий вид:

$$f_0(\rho, T, \vec{x}) = \sum_{i=1}^N x_i [f_{0i}(\rho, T) + \ln(x_i)] \quad , \quad (6)$$

где N – число компонентов смеси, f_{0i} – безразмерная идеально-газовая свободная энергия Гельмгольца i -го компонента, x_i – молярная доля i -го компонента смеси.

Уравнение для неидеальной составляющей свободной энергии имеет следующий вид:

$$f_{res}(\omega, \tau, \vec{x}) = f_{res1}(\omega, \tau, \vec{x}) + f_{res2}(\omega, \tau, \vec{x}); \quad (7)$$

$$f_{res1}(\omega, \tau, \vec{x}) = \sum_{i=1}^N x_i f_{ri}(\omega, \tau); \quad (8)$$

$$f_{res2}(\omega, \tau, \vec{x}) = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N x_i x_j \Psi_{ij} f_{rij}(\omega, \tau). \quad (9)$$

В выражениях (8, 9) f_{ri} – безразмерная неидеальная составляющая свободной энергии i – го компонента смеси; f_{rij} – безразмерная неидеальная составляющая свободной энергии бинарной смеси, состоящей из компонентов (i, j) ; Ψ_{ij} – параметры (константы) для бинарной смеси, состоящей из компонентов (i, j) .

Уравнения для f_{ri} и f_{rij} имеют следующий вид:

$$f_{ri} = \sum_{k=1}^{M_i} b_{ik} \varphi_{ik}, \quad (10)$$

где:

$$\varphi_{ik} = \omega^{r_{ik}} \tau^{-t_{ik}} \exp(g_{ik} \omega^{l_{ik}}). \quad (11)$$

$$f_{rij} = \sum_{k=1}^{M_{ij}} c_{ijk} \theta_{ijk}, \quad (12)$$

где:

$$\theta_{ijk} = \omega^{r_{ijk}} \tau^{-t_{ijk}} \exp[-\alpha_{ijk}(\omega - \varepsilon_{ijk})^2 - \beta_{ijk}(\omega - \gamma_{ijk})]. \quad (13)$$

Псевдокритические плотность $\tilde{\rho}_{cm}$ и температура T_{cm} смеси рассчитываются по следующим правилам комбинирования:

$$\tilde{\rho}_{cm}^{-1} = \tilde{v}_{cm} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_i x_j \tilde{v}_{cij}, \quad (14)$$

$$\tilde{v}_{cij} = \beta_{vij} \cdot \gamma_{vij} \cdot \frac{x_i + x_j}{\beta_{vij}^2 x_i + x_j} \left[\frac{(1/\tilde{\rho}_{ci})^{1/3} + (1/\tilde{\rho}_{cj})^{1/3}}{2} \right]^3. \quad (15)$$

$$T_{cm} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_i x_j T_{cij}, \quad (16)$$

$$T_{cij} = \beta_{Tij} \cdot \gamma_{Tij} \cdot \frac{x_i + x_j}{\beta_{Tij}^2 x_i + x_j} (T_{ci} \cdot T_{cj})^{0,5}. \quad (17)$$

В формулах (15) и (17) $\{\beta_{vij}\}$, $\{\gamma_{vij}\}$, $\{\beta_{Tij}\}$, $\{\gamma_{Tij}\}$ - параметры бинарного взаимодействия, $\{\tilde{\rho}_{ci}$, $\tilde{\rho}_{cj}\}$, $\{T_{ci}$, $T_{cj}\}$ – критические молярные объемы и критические температуры для пар компонентов (i, j).

ФУС было положено в основу международного стандарта ISO 20765–2:2015(E) 2015 г., регламентирующего методы расчетного определения термодинамических свойств смесей. Однако, в этом стандарте даны оценки неопределенности расчетных значений термодинамических свойств только для «сухих» газовых смесей с молярной долей водяного пара $x_{H_2O} \leq 0,02$ %; в то же время на практике часто требуется расчетное определение свойств «влажных» газовых смесей, в которых молярная доля водяного пара физически ограничена лишь предельной равновесной молярной долей (растворимостью) x_p : $x_{H_2O} \leq x_p$. Например, при стандартных условиях ($t = 20$ °C и $p = 0,101325$ МПа) значение x_{H_2O} может достигать $\approx 2,3$ %. В том случае, когда $p \leq p_{sH_2O}(T)$, $x_p = 1$; $p_{sH_2O}(T)$ – давление водяного пара находится на линиях насыщения или сублимации. В противном случае необходим расчет.

В предположении, что при фазовом равновесии влажный газ – конденсированная фаза, а конденсированной фазой является чистая вода или лед, уравнение для расчета растворимости имеет следующий вид:

$$\mu_{wg}(T, p, x_1, x_2, \dots, x_{N-1}, x_p) = \mu_{wl}(T, p), \quad (18)$$

где μ_{wg} - химический потенциал водяного пара во влажном газе – рассчитывается по ФУС, μ_{wl} – химический потенциал чистой воды или льда в конденсированной фазе (потенциал Гиббса). Начальное значение $x_p^{(0)}$ определяется по формуле (закон Дальтона):

$$x_p^{(0)} = \frac{P_{sH_2O}(T)}{P}. \quad (19)$$

Молярные доли всех компонентов (кроме водяного пара) определяются как:

$$x_i = x_{id} (1 - x_p), \quad i = 1, \dots, N-1, \quad (20)$$

где x_{id} - молярная доля i -го компонента в сухом газе. После соответствующих преобразований уравнение растворимости (18) можно записать в следующем виде:

$$F_\mu(T, P, x_1, \dots, x_{N-1}, x_p) = f_{rH_2O} - f_{res2} + A_0 \cdot (1 + \tilde{\rho}_{c_m} d\tilde{v}_{c_m}) - A_4 dT_{c_m} / T_{c_m} + \ln(\tilde{\rho}) + \ln(x_p) - G_{H_2O}(T, P) = 0. \quad (21)$$

Решение уравнения (21) относительно x_p осуществляется в итерационном процессе методом Ньютона с численным расчетом производных; значения начальных приближений $x_p^{(0)}$ выбираются в зависимости от значений рабочих параметров состояния (T, p) смеси.

С целью определения пригодности ФУС для расчета термодинамических свойств влажных газовых смесей были проведены сравнения расчетных значений x_p и p с экспериментальными данными. Проведенные исследования показали необходимость повышения точности расчетных значений указанных свойств. Для решения этой задачи значения параметров бинарного взаимодействия $\{\beta_{vij}\}$, $\{\gamma_{vij}\}$, $\{\beta_{Tij}\}$, $\{\gamma_{Tij}\}$ в формулах (15) и (17) для бинарных смесей с водяным паром (H_2O) таких компонентов, как метан (CH_4), азот (N_2), диоксид углерода (CO_2), этан (C_2H_6), пропан (C_3H_8), н-бутан (nC_4H_{10}) и сероводород (H_2S) были уточнены в результате обработки экспериментальных данных по растворимости H_2O в соответствующих газах.

Параметры бинарного взаимодействия для пары (i, j) определялись в результате минимизации квадратичных функционалов следующего вида:

$$S_{ij} = \sum_{k=1}^n g_k [x_{pk} - x_p(T_k, P_k, \beta_{vij}, \gamma_{vij}, \beta_{Tij}, \gamma_{Tij})]^2 \quad (22)$$

где g_k - вес k -ой экспериментальной точки, а расчетное значение x_p для k -ой точки находится в результате решения уравнения (21) для соответствующей бинарной смеси.

Таким образом, проведена модификация ФУС, суть которой состоит в переопределении значений параметров бинарного взаимодействия водяного пара (H_2O) с основными "сухими" компонентами рассматриваемых газовых смесей, что позволило проводить расчеты данных теплофизических свойств многокомпонентных влажных газовых смесей.

Для расчета коэффициента динамической вязкости смеси в состоянии разреженного газа (μ_{0m}) использованы строгие выражения молекулярно-кинетической теории. Для расчета вязкости реальной смеси (μ_m) использована комбинация μ_{0m} обобщенного эмпирического уравнения для избыточной составляющей коэффициента динамической вязкости с зависящими от

компонентного состава аффинными преобразованиями для относительных температур и плотности базового вещества – метана:

$$\mu_m = \mu_{0m}(T, \vec{x}) + \vartheta_m \Delta \mu_{bs}(\tau, \omega, \vec{\Phi}_m), \quad (23)$$

$$\vartheta_m = \frac{2,63094M^{1/2} p_{cm}^{2/3}}{T_{cm}^{1/6}}, \quad (24)$$

где $\vec{\Phi}_m$ - вектор параметров аффинных преобразований; M – молярная масса смеси; p_{cm} – псевдокритическое давление смеси.

Модифицированное ФУС было взято за основу при разработке методики ГСССД МР 273–2018 «Методика расчетного определения плотности, фактора сжимаемости, скорости звука, показателя адиабаты и коэффициента динамической вязкости влажных газовых смесей в диапазоне температур от 263 К до 500 К при давлениях до 30 МПа».

В методике приведены методы и алгоритмы расчетного определения плотности, фактора сжимаемости, скорости звука, показателя адиабаты и коэффициента динамической вязкости сухих и влажных многокомпонентных газовых смесей переменных составов, в газовой фазе и флюидной области в диапазоне температур $263 \leq T \leq 500$ К, при давлениях $0 < p \leq 30$ МПа. Компонентный состав рассматриваемых смесей может включать в различных комбинациях следующие вещества: метан, азот, диоксид углерода, этан, пропан, н-бутан, изобутан, н-пентан, изопентан, гептан, октан, водяной пар, сероводород и кислород. Число компонентов смеси N может варьироваться в диапазоне $1 \leq N \leq 15$. Методика не накладывает явных ограничений на диапазоны изменений молярных долей компонентов при соблюдении условий фазового состояния – газовая фаза или флюидная область; исключение составляет молярная доля водяного пара – $x_{H_2O} \leq x_p(T, p, \{x_{id}\})$; $\{x_{id}\}$ – молярные доли «сухих» компонентов влажной смеси, приведенные к 1 ($x_{H_2O} = 0$, $\sum_{i=1}^{N-1} x_{id} = 1$). (25)

Кроме указанных выше теплофизических свойств в однофазном состоянии, разработанная методика позволяет также определять при заданных температуре, давлении и значениях молярных долей "сухих" компонентов значения предельной равновесной молярной доли (растворимости) x_p водяных паров в газовой смеси.

Для проверки достоверности ФУС (4 – 13) и уравнений для расчета вязкости (23, 24) и оценки неопределенностей расчетных значений теплофизических свойств были проведены сравнения с экспериментальными данными по фактору сжимаемости и плотности сухого и влажного ПГ, а также с аналогичными данными для газовых смесей с компонентными составами, характерными для нефтяного попутного газа. Кроме того, проведены сравнения с экспериментальными данными по скорости звука и вязкости газовых смесей.

Расширенная неопределенность расчетных значений теплофизических свойств получена путем умножения стандартной неопределенности на коэффициент охвата $k = 2$, соответствующий уровню доверия, равному 95 %.

Оценивание неопределенности проведено в соответствии с ГОСТ 34100.3 и с учетом данных, приведенных в ISO 20765–2:2015(E). В таблице 4 приведены оценки расширенных неопределенностей.

Таблица 4 – Оценки расширенных неопределенностей

Свойства газа	Неопределенность
ПГ со значениями молярных долей компонентов, соответствующих ограничениям, приведенным в ГОСТ Р 8.662 – 2009 и ГОСТ Р 8.770 – 2011	
Плотность и фактор сжимаемости	$\leq 0.1\%$
Скорость звука	$\leq 0,2\%$ при $p \leq 20$ МПа; $\leq 0,3\%$ при $p > 20$ МПа
Показатель адиабаты	$\leq 0,5\%$ при $p \leq 20$ МПа; $\leq 0,7\%$ при $p > 20$ МПа
Коэффициент динамической вязкости	$\leq 4.0\%$
Многокомпонентные влажные смеси включая любые влажные смеси	
по плотности и фактору сжимаемости	$\leq 0,3 \%$; $\leq 0,5 \%$ при $T > 350$ К и $p > 15$ МПа
по скорости звука	$\leq 0,6 \%$; $\leq 1,0 \%$ при $T > 350$ К и $p > 15$ МПа
по показателю адиабаты	$\leq 1,5 \%$; $\leq 2,5 \%$ при $T > 350$ К и $p > 15$ МПа дк
по коэффициенту динамической вязкости	$\leq 5,0 \%$

Для сравнения метрологических и расчетных термодинамических характеристик разработанной методики ГСССД МР 273–2018 был проведен сравнительный анализ с ранее применяемым ГОСТ 30319.3–2015 по расчётам коэффициента сжимаемости, плотности, показателя адиабаты, коэффициента динамической вязкости, скорости распространения звука и неопределенности. Результаты анализа:

1. Учёт влажности

Методика МР 273–2018 позволяет рассчитать термодинамические свойства газовых смесей, в том числе ПГ, в присутствии в них водяных паров, а в ГОСТ 30319.3–2015 эта возможность отсутствует.

2. Диапазон применимости

Диапазон применения методики МР 273–2018 по температуре шире, чем у ГОСТ 30319.3–2015. Последний применяется при тех же давлениях, но для температур от 250 К до 350 К.

3. Методика расчёта

В основе метода ГОСТ 30319.3–2015 лежит уравнение состояния AGA8. Метод расчёта коэффициента динамической вязкости ПГ сделан на основе ГОСТ 8.770–2011. В методике ГСССД МР 273–2018 используется ФУС GERG–2008, обеспечившее наиболее высокую точность расчёта значений термодинамических свойств смесей различного компонентного состава в газовой фазе и во флюидной области.

4. Сравнение неопределённостей результатов расчета термодинамических свойств приведено в таблице 5.

Таблица 5

Свойства газа	ГОСТ 30319.3–2015	ГСССД МР 273–2018
Плотность	$0,1 \leq \delta z \%$	$\delta z \leq 0,1 \%$

Свойства газа	ГОСТ 30319.3–2015	ГСССД МР 273–2018
Коэффициент сжимаемости	$0,4 \leq \delta\rho$ %	$\delta\rho \leq 0,1$ %
Скорость звука	$0,2 \leq \delta w \leq 2,0$ %	$\delta w \leq 0,2$ % при $p \leq 20$ МПа; $\delta w \leq 0,3$ % при $p > 20$ МПа
Показатель адиабаты	$0,5 \leq \delta\kappa \leq 4,4$ %	$\delta\kappa \leq 0,5\%$ при $p \leq 20$ МПа; $\delta\kappa \leq 0,7\%$ при $p > 20$ МПа
Коэффициент динамической вязкости	$0,6 \leq \delta\mu \leq 4,0$ %	$\delta\mu \leq 4,0$ %

Разработанная методика ГСССД МР 273–2018 позволяет проводить более точные расчеты термодинамических свойств как ПГ, так и влажных газовых смесей при большом диапазоне температур по сравнению с ГОСТ 30319.3–2015 и может быть применена при проектировании оборудования и моделировании процессов в системах автоматизированного управления, метрологического обеспечения измерения расхода и количества при учетно-контрольных операциях «сухих» и «влажных» многокомпонентных газовых смесей.

В работе приведены результаты исследований и разработки ССД по следующим чистым веществам из компонентного состава ПГ – этан, пропан, изобутан, нормальный бутан, сероводород. Для разработки ССД по каждому веществу были определены теплофизические свойства, как правило это плотность ρ , энтальпия h , энтропия s , изобарная теплоемкость c_p , изохорная теплоемкость c_v , скорость звука w , коэффициент динамической вязкости μ , коэффициент теплопроводности λ в однофазных областях (газ, жидкость и флюид), а также диапазон температур и давлений. Оценки показателей точности расчетных значений теплофизических свойств соответствующего компонента ПГ, приведенные в ССД, получены путем умножения стандартной неопределенности на коэффициент охвата $k = 2$, соответствующий уровню доверия, равному 95 %. Оценивание неопределенности проведено в соответствии с ГОСТ Р 34100.3–2017 и Р 50.2.067–2009.

Проведено сравнение вновь разработанных ССД по этану ГСССД 318 – 2017 с ранее разработанными ССД по этану ГСССД 196 – 2001, значения приведены в таблицах 5,6 и в таблицах 7,8 соответственно.

Таблица 5 – Данные из таблицы 8 ГСССД 318 – 2017 «Стандартные значения теплофизических свойств этана на линии насыщения»

T	p_s	ρ'	ρ''
	δp_s	$\delta \rho'$	$\delta \rho''$
91,00	$0,13473 \cdot 10^{-5}$	650,83	$0,53543 \cdot 10^{-4}$
	0,02	0,02	0,03

Таблица 6 – Данные из таблицы 9 ГСССД 318 – 2017 «Стандартные значения теплофизических свойств этана в однофазной области»

p	ρ	h	s	c_v	c_p	w	μ	λ
	$\delta\rho$	Δh	δs	δc_v	δc_p	δw	$\delta\mu$	$\delta\lambda$
T= 91,0 K								
0,1	650,87	476,1	2,5790	1,600	2,321	2004,5	1258,97	310,87
	0,02	0,6	0,06	1,5	3,0	0,15	1,0	0,1

Таблица 7 – Данные из таблицы 8 ГСССД 196 – 2001 «Стандартные значения теплофизических свойств этана на линии насыщения»

T	p_s	ρ'	ρ''
	δp_s	$\delta \rho'$	$\delta \rho''$
91,00	$0,1340 \cdot 10^{-5}$	650,78	$0,5327 \cdot 10^{-4}$
	0,08	0,10	0,09

Таблица 8 – Данные из таблицы 9 ГСССД 196 – 2001 «Стандартные значения теплофизических свойств этана в однофазной области»

p	ρ	h	s	c_v	c_p	w	μ	λ
	$\delta \rho$	Δh	δs	δc_v	δc_p	δw	$\delta \mu$	$\delta \lambda$
T = 91,0 K								
0,1	650,81	474,8	2,5648	1,570	2,216	1992,3	1285,48	310,87
	0,10	1,40	0,36	2,5	4,0	1,00	1,7	0,12

Обозначения и размерности теплофизических свойств и их неопределенностей, представлены в таблице 9.

Таблица 9

Наименование	Обозначение	Размерность
Температура	T	К
Давление	P	МПа
Давление насыщения	p_s	МПа
Плотность	ρ	кг/м ³
Энтальпия	h	кДж/кг
Энтропия	s	кДж/(кг·К)
Изохорная теплоемкость	c_v	кДж/(кг·К)
Изобарная теплоемкость	c_p	кДж/(кг·К)
Скорость звука	w	м/с
Коэффициент динамической вязкости	μ	мкПа·с
Коэффициент теплопроводности	λ	мВт/(м·К)
Относительная неопределенность теплофизических свойств, исключая энтальпию	δA	%
Абсолютная неопределенность энтальпии	Δh	кДж/кг
Примечание – в таблицах 5 и 7, где представлены ССД теплофизических свойств (A) этана на линии насыщения свойства насыщенной жидкости и насыщенного пара обозначенные (A' и A'') соответственно.		

Приведенные данные показывают, что вновь разработанные ССД ГСССД 318 – 2017 на основе модифицированного ФУС позволяют в 1,2 и более раз повысить точность расчетных значений расхода и количества этана по сравнению с ранее разработанными ССД ГСССД 196 – 2001.

В ходе выполнения диссертационной работы были проведены исследования и разработаны ССД по 17 веществам из них, как было указано ранее, пять по чистым веществам из компонентного состава ПГ – этан, пропан, изобутан, нормальный бутан, сероводород. В таблице 10 представлены результаты разработки ССД с указанием исследуемого вещества, диапазонов давления и температуры, а также неопределенность измерений теплофизических свойств углеводородов.

Таблица 10

№ п/п	Наименование документа	Вещество	Диапазон		Состав	Неопред., %
			Р, МПа	Т, К		
1.	ГСССД 318 – 2017	Этан	до 100	от 91 до 675	<i>Этан жидкий и газообразный</i>	0,1-2,4
2.	ГСССД 332 – 2017	Пропан	до 100	от 86 до 700	<i>Пропан жидкий и газообразный</i>	0,1-3
3.	ГСССД 337 – 2018	Изобутан	до 35	от 114 до 600	<i>Изобутан жидкий и газообразный</i>	0,1-7,3
4.	ГСССД 338 – 2018	Нормальный бутан	до 70	от 135 до 600	<i>Нормальный бутан жидкий и газообразный</i>	0,1-4,7
5.	ГСССД 355 – 2020	Вода	от тр. точки до 0,3	от 273 до 373	<i>Жидкая вода</i>	0,01
6.	ГСССД 369 – 2020	Этилен	до 100	от 104 до 450	<i>Этилен жидкий и газообразный</i>	0,1-4
7.	ГСССД 370 – 2020	Бензол	до 100	от 280 до 725	<i>Бензол жидкий и газообразный</i>	0,1-2,3
8.	ГСССД 371 – 2020	Этанол	до 100	от 160 до 650	<i>Этанол жидкий и газообразный</i>	0,1-5
9.	ГСССД 376 – 2020	Бутанол-1	до 100	от тр. точки до 700	<i>Бутанол-1</i>	0,15-7
10.	ГСССД 382 – 2020	Сероводород	до 100	от 190 до 500	<i>Сероводород жидкий и газообразный</i>	0,1-3,5
11.	ГСССД 391 – 2021	Параводород	до 100	от 14 до 1000	<i>Параводород жидкий и газообразный</i>	0,1-1
12.	ГСССД 392 – 2021	Ортоводород	до 100	от 15 до 1000	<i>Ортоводород жидкий и газообразный</i>	0,1-1
13.	ГСССД 393 – 2021	Толуол	до 100	от 180 до 700	<i>Толуол жидкий и газообразный</i>	0,1-5,8
14.	ГСССД 394 – 2021	Моноксид углерода	до 100	от 70 до 500	<i>Моноксид углерода жидкий и газообразный</i>	0,1-2,8
15.	ГСССД 395 – 2021	Ксенон	до 100	от 162 до 750	<i>Ксенон жидкий и газообразный</i>	0,1-0,7
16.	ГСССД 411 – 2022	Диэтиловый эфир	до 40	от 270 до 500	<i>Диэтиловый эфир жидкий и газообразны</i>	0,02-0,5
17.	ГСССД 412 – 2022	Диметиловый эфир	до 40	от 140 до 525	<i>Диметиловый эфир жидкий и газообразный</i>	0,02-0,5

Разработанная методика ГСССД МР 273–2018 практически была применена на 20 предприятиях НГК. В таблице 11 представлен перечень предприятий и утвержденные типы СИ, в которых используются алгоритмы расчетов теплофизических свойств ПГ, разработанные автором и реализованные в методике ГСССД МР 273–2018.

Таблица 11

Наименование организации	Тип разработанного СИ, № в ГРСИ	Примечание
ООО СКБ «Промавтоматика»	УВП-280 53503-13 (изменения описания типа 2020 г.)	Акт внедрения
ООО НПО «Турбулентность-ДОН»	Turbo Flow CFM 83374-2021 Turbo Flow UFG 2023-56432-14 (изменения описания типа 2023)	Акт внедрения
ГК «СТП», г. Казань	«President IDS» 78912-2020	
Yokogawa Electric CIS Ltd	ROTAMASS 80025-2020	
ООО «СовТИГаз»	Комплексы измерительные СуперФлоу-21В	Проходит утв. типа СИ
НИЦ «Инкомсистем» (г. Казань)	СИКГ ПАО «Славнефть-ЯНОС» 82186-2021	
ООО «Прософт-Системы»	«REGUL-VG-01» 79945-2020	
ООО «ТРЭИ ГМБХ»	«TREI-5B-GAS-P» 43421-09 (изменения описания типа 2018)	
ООО НПП «ТЭК»	СИКНС 81938-2021	
АО «Даймет»	«DYMETIC-1223M» 77155-2019	
ООО «Эндресс+Хаузер»	Системы измерительные EMS-20 83976-2021	
ООО «НПФ “Вымпел”»	Расходомеры газа «ГиперФлоу» 60910-15 (изменения описания типа 2020)	
ФБУ «Иркутский ЦСМ»	Расчетные уравнения внедрены при выполнении контракта	
ООО «НПП Куйбышев Телеком- Метрология»	Счетчики газа ультразвуковые КТМ700 РУС 75566-2019 Счётчики-расходомеры: КТМ Дельтапаскаль 84221-2021 КТМ РуМАСС 83825 - 2021	Акт внедрения
ФБУ «Тюменский ЦСМ»	Расчетные уравнения внедрены при выполнении контракта	
ФГБУ «ВНИИМС». Отдел 208 метрологического обеспечения ТЭК	Расчетные уравнения внедрены при выполнении контракта для Компании «Лукойл»	
Общество с ограниченной ответственностью «НЦ-Деталь»	Идет разработка многофазного расходомера	
ООО НПП «ЭЛЕМЕР»	Счетчики «ЭЛЕМЕР-СТ-365» 81274-2021	
ООО «НПО “Вымпел”»	Комплексы измерительно- вычислительные 82225-2021	
ФГБУ «Челябинский ЦСМ»	Расчетные уравнения внедрены при выполнении контракта	

Три организации – ООО СКБ «Промавтоматика», ООО НПО «Турбулентность-ДОН», ООО «НПП Куйбышев Телеком-Метрология»

представили акты практического использования (внедрения) методики ГСССД МР 273–2018 в программное обеспечение разработанных СИ расхода и количества ПГ. В представленных актах подтверждено, что внедрение алгоритмов расчета расхода и количества ПГ, реализованных в методике ГСССД МР 273-2018, позволили улучшить в 1,5 – 2 раза метрологические характеристики СИ при измерении расхода и количества ПГ, в том числе и многокомпонентных влажных газовых смесей.

Таким образом, применение модифицированного ФУС обеспечило в 1,5 и более раз повышение точности расчетов значений теплофизических свойств смесей различного компонентного состава в газовой фазе и во флюидной области в том числе и влажных газовых смесей, в расширенных диапазонах температур и давлений при увеличенном количестве компонентов измеряемого ПГ.

Полученные данные по свойствам ПГ, утвержденные в качестве ССД, обеспечили в 1,2 и более раз повышение точности измерений расхода и количества многокомпонентных газовых смесей.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В ходе выполнения работы были получены следующие основные результаты:

1. На основе анализа методов и СИ расхода и количества газа обосновано приоритетное направление исследований по повышению точности измерений расхода и количества ПГ при учетных операциях, заключающееся в изучении теплофизических свойств многокомпонентных газовых смесей и разработке алгоритмов их расчета в рабочем диапазоне температур и давлений.

2. По результатам теоретических исследований алгоритмов расчета теплофизических свойств ПГ уточнены данные о термодинамических свойствах газовых смесей различного компонентного состава в газовой фазе и во флюидной области при востребованных температурах и повышенных давлениях.

3. Разработан усовершенствованный алгоритм определения значения предельной равновесной молярной доли (растворимости) водяных паров в газовой смеси при заданных температуре, давлении и значениях молярных долей "сухих" компонентов, что повысило в 1,5 и более раз точность расчета теплофизических свойств ПГ в том числе и влажных многокомпонентных газовых смесей.

4. Проведена модификация ФУС GERG-2008, заключающаяся в переопределении значений параметров бинарного взаимодействия водяного пара (H_2O) с основными «сухими» компонентами рассматриваемых газовых смесей, основанном на результатах обработки экспериментальных данных по растворимости H_2O в соответствующих газах, которая позволила повысить более чем в 1,5 раза точность расчета теплофизических свойств влажных газовых смесей и точность измерения расхода и количества ПГ в том числе и влажных многокомпонентных газовых смесей.

5. Полученные данные по теплофизическим свойствам ПГ, утвержденные в качестве ССД, обеспечили повышение точности измерений расхода и количества многокомпонентных газовых смесей в 1,2 и более раз.

Основным итогом выполнения диссертационной работы явилось решение важной научной задачи повышения точности измерений расхода и количества ПГ, в том числе и влажных многокомпонентных газовых смесей, в газовой фазе и во

флюидной области при востребованных температурах и повышенных давлениях, за счет разработки и внедрения ССД, основанных на точных значениях теплофизических свойств компонентного состава ПГ, что имеет существенное значение для развития метрологического обеспечения современных СИ расхода и количества газа.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК

1. Колобаев В.А. Обеспечение единства измерений расхода и количества природного газа на основе стандартных справочных данных / Козлов А.Д. // Вести газовой науки. 2019. № 1 (38) – С. 156-162.
2. Колобаев В.А. Стандартные справочные данные по углеводородам для государственного учета энергетического сырья / Козлов А.Д. // Вести газовой науки. 2021. № 4. (49) – С. 9-13.
3. Колобаев В.А. Нормативно-справочные данные для обеспечения измерения расхода (количества) и качества продукции нефтегазового комплекса / Козлов А.Д. // Вести газовой науки. 2018. № 5. – С. 176-181.
4. Колобаев В.А. Новые методики экспериментального определения свойств материалов / Козлов А.Д., Попов П.В. // Законодательная и прикладная метрология. 2018. № 6. – С. 20-22.
5. Колобаев В.А. Уравнение состояния и термодинамические таблицы 2,3,3,3-тетрафторпропена (R1234yf) / П.В. Попов // Измерительная техника. 2021. - № 2. – С. 9-15.
6. Колобаев В.А. Стандартные справочные данные о свойствах воды для метрологических исследований при температурах от 0°С до 100°С и давлении до 0,3 МПа / Козлов А.Д., Роговин М.Д., Рыбаков С.И. // Законодательная и прикладная метрология. 2019. № 4. – С. 8-11.
7. Колобаев В.А. Расчет термодинамических свойств многокомпонентных влажных газовых смесей на основе фундаментального уравнения состояния для метрологического обеспечения измерения расхода газа/ Козлов А.Д., Мамонов Ю.В., Роговин М.Д., Рыбаков С.И. // Законодательная и прикладная метрология. 2018. № 3. – С. 19-22.
8. Колобаев В.А. Новые методики экспериментального и расчетного определения свойств веществ и материалов / Козлов А.Д., Попов П.В. // Законодательная и прикладная метрология. 2017. № 4. – С. 16-18.
9. Колобаев В.А. Новые стандартные справочные данные по фундаментальным физическим константам и свойствам веществ и материалов / Козлов А.Д., Попов П.В. // Законодательная и прикладная метрология. 2017. № 6. – С. 43-48.
10. Колобаев В.А. Термодинамические свойства хладагента R1233zd(E): методика построения фундаментального уравнения состояния и табулированные данные / Козлов А.Д., Попов П.В. // Измерительная техника № 5, 2022 – С. 22-28.
11. Колобаев В.А. Таблицы ССД о физических константах и свойствах веществ и материалов, аттестованных в 2021 году / Козлов А.Д., Попов П.В. // Законодательная и прикладная метрология. 2022. № 2. – С. 12-15.

Работы, опубликованные в других изданиях

1. Колобаев В.А. Государственная служба стандартных справочных данных о свойствах веществ и материалов в обеспечение задач нефтегазового комплекса / Григорьев Б.А., Козлов А.Д. // Российская газовая энциклопедия, том 3, 2023. – С. 77-82.

2. Колобаев В.А. Измерение расхода и количества природного газа в нефтегазовом комплексе / Григорьев Б.А., Козлов А.Д., Кузина Е.К. // Российская газовая энциклопедия, том 3, 2023. – С. 97-103.

3. Колобаев В.А. ГСССД МР 273-2018 – методика расчетного определения плотности, фактора сжимаемости, скорости звука, показателя адиабаты, коэффициента динамической вязкости влажных газовых смесей в диапазоне температур от 263 до 500 К при давлениях до 30 МПа/ Григорьев Б.А., Козлов А.Д., Роговин М.Д. // Российская газовая энциклопедия, том 3, 2023. – С. 83-84.

4. Колобаев В.А. Государственная служба стандартных справочных данных – одно из направлений обеспечения единства измерений в науке и технике / Кузин А.Ю., Козлов А.Д. // Главный метролог. 2019. № 4. – С. 24-29.