МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СОВЕТ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И СЕРТИФИКАЦИИ
(МГС)
INTERSTATE COUNCIL FOR STANDARDIZATION, METROLOGY AND CERTIFICATION
(ISC)

МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ

ГОСТ 31369— 2021 (ISO 6976:2016)

ГАЗ ПРИРОДНЫЙ

Вычисление теплоты сгорания, плотности, относительной плотности и числа Воббе на основе компонентного состава

(ISO 6976:2016, MOD)

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2021

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

Цели, основные принципы и общие правила проведения работ по межгосударственной стандартизации установлены ГОСТ 1.0 «Межгосударственная система стандартизации. Основные положения» и ГОСТ 1.2 «Межгосударственная система стандартизации. Стандарты межгосударственные, правила и рекомендации по межгосударственной стандартизации. Правила разработки, принятия, обновления и отмены»

Сведения о стандарте

1 ПОДГОТОВЛЕН Публичным акционерным обществом «Газпром» и Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева» (ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева») на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии стандарта, указанного в п. 5

2 ВНЕСЕН Межгосударственным техническим комитетом по стандартизации МТК 52 «Природный и сжиженные газы»

3 ПРИНЯТ Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 26 августа 2021 г. № 142-П)

За принятие проголосовали:

Краткое наименование страны по МК (ИСО 3166) 004—97	Код страны по МК (ИСО 3166) 004—97	Сокращенное наименование национального органа по стандартизации
Армения	AM	ЗАО «Национальный орган по стандартизации и метрологии» Республики Армения
Беларусь	BY	Госстандарт Республики Беларусь
Киргизия	KG	Кыргызстандарт
Россия	RU	Росстандарт
Узбекистан	UZ	Узстандарт

4 Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 октября 2021 г. № 1106-ст межгосударственный стандарт ГОСТ 31369—2021 (ISO 6976:2016) введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 июля 2023 г., с правом досрочного применения

5 Настоящий стандарт является модифицированным по отношению к международному стандарту ISO 6976:2016 «Газ природный. Вычисление теплоты сгорания, плотности, относительной плотности и числа Воббе на основе компонентного состава» («Natural gas — Calculation of calorific values, mass volume, relative density and Wobbe indices from the composition», MOD) путем внесения технических отклонений, объяснение которых приведено во введении к настоящему стандарту.

Информация, необходимая для вычисления физико-химических показателей природного газа, приведена в дополнительных приложениях ДА—ДГ.

Сведения о соответствии ссылочных межгосударственных стандартов международным стандартам, использованным в качестве ссылочных в примененном международном стандарте, приведены в дополнительном приложении ДД

6 ВВЕДЕН ВЗАМЕН ГОСТ 31369—2008 (ИСО 6976:1995)

Информация о введении в действие (прекращении действия) настоящего стандарта и изменений к нему на территории указанных выше государств публикуется в указателях национальных стандартов, издаваемых в этих государствах, а также в сети Интернет на сайтах соответствующих национальных органов по стандартизации.

В случае пересмотра, изменения или отмены настоящего стандарта соответствующая информация будет опубликована на официальном интернет-сайте Межгосударственного совета по стандартизации, метрологии и сертификации в каталоге «Межгосударственные стандарты»

© ISO, 2016
© Оформление. ФГБУ «РСТ», 2021



В Российской Федерации настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 2
3 Термины и определения 2
4 Обозначения 4
5 Принципы 5
6 Поведение идеального и реального газов 6
6.1 Энтальпия сгорания 6
6.2 Вычисление коэффициента сжимаемости 6
7 Вычисление молярной теплоты сгорания 7
7.1 Высшая теплота сгорания 7
7.2 Низшая теплота сгорания 7
8 Вычисление массовой теплоты сгорания 7
8.1 Высшая теплота сгорания 7
8.2 Низшая теплота сгорания 8
9 Вычисление объемной теплоты сгорания 8
9.1 Высшая теплота сгорания идеального газа 8
9.2 Низшая теплота сгорания идеального газа 8
9.3 Высшая теплота сгорания реального газа 8
9.4 Низшая теплота сгорания реального газа 9
10 Вычисление физико-химических показателей 9
10.1 Относительная плотность идеального газа 9
10.2 Плотность идеального газа 9
10.3 Число Воббе (высшее) идеального газа 9
10.4 Число Воббе (низшее) идеального газа 10
10.5 Относительная плотность реального газа 10
10.6 Плотность реального газа 10
10.7 Число Воббе (высшее) реального газа 10
10.8 Число Воббе (низшее) реального газа 10
11 Вычисление неопределенности 11
11.1 Принципы 11
11.2 Формулы для аналитического метода 11
11.3 Исходные данные для аналитического метода 11
11.4 Расширенная неопределенность 13
11.5 Обработка результатов 13
11.6 Применение неопределенности 14
12 Таблицы данных 15
Приложение А (обязательное) Значения вспомогательных констант 20
Приложение В (обязательное) Формулы вычисления неопределенности 22
Приложение С (справочное) Коэффициенты пересчета единиц величин 25
Приложение D (справочное) Примеры вычислений 26
Приложение ДА (рекомендуемое) Рекомендации по выбору перечня учитываемых компонентов природного газа при определении его физико-химических показателей для конкретного узла измерений 37
Приложение ДБ (справочное) Молярный состав сухого воздуха 40
Приложение ДВ (справочное) Стандартные температуры определения физико-химических показателей природного газа, принятые в разных странах [при стандартном давлении 101325 Па (760 мм рт. ст.)] 41
Приложение ДГ (обязательное) Коэффициенты сжимаемости для компонентов природного газа для различных стандартных условий измерений 42
Приложение ДД (справочное) Сведения о соответствии ссылочных межгосударственных стандартов международным стандартам, использованным в качестве ссылочных в примененном международном стандарте 43
Библиография 44

Введение

Поставка природного газа зарубежному и внутреннему потребителям обычно требует точного определения количества и качества продаваемого газа. В настоящем стандарте устанавливаются методы вычисления основных показателей, которые описывают качество газа, а именно высшей и низшей теплоты сгорания, плотности, относительной плотности и числа Воббе (высшего и низшего). Описанные методы обеспечивают возможность вычисления этих показателей и их неопределенностей для любого природного газа, заменителя природного газа или аналогичного газообразного топлива известного состава при обычно используемых стандартных условиях.

Значения различных показателей, вычисленных в соответствии с данным стандартом, будут отличаться, хотя и незначительно, от тех, которые вычислены с использованием предыдущей версии стандарта.

В соответствии с данным контекстом следует учесть, что:

a) внедрение изменений, описанных в данном стандарте, будет связано с затратами, поскольку потребуется обновление программного обеспечения;

b) зафиксированное значение теплоты сгорания и, следовательно, заявляемое энергосодержание вследствие этих изменений тоже изменится незначительно;

c) могут возникнуть непредвиденные последствия, если изменения стандарта вводятся некритически; например, если внести изменения в точках входа в трубопроводную систему и не ввести их в точках выхода, то может возникнуть дорогостоящий дисбаланс учета газа;

d) в расчете должны быть приняты во внимание коммерческие, контрактные, регламентные и правовые обязательства.

По этим причинам и в зависимости от заявки пользователей целесообразно провести предварительную оценку последствий при внедрении данного стандарта, чтобы согласовать сроки и процедуру его введения в действие.

Для учета потребностей национальных экономик государств, принявших стандарт, в текст настоящего стандарта внесены следующие изменения:

- исключены из примечания 1 к разделу 1 неверные формулировки;
- внесен в раздел 2 ГОСТ 34100.3—2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008;
- исключена из примечания 4 к пункту 3.12 единица измерений давления, не используемая в странах СПГ;
- исключены ссылки на ISO/TR 29922:2017, так как документ является техническим отчетом, содержащим обоснования алгоритмов вычисления физико-химических показателей, изложенных в настоящем стандарте;
- внесены дополнительные формулы (24) и (25) и сноски, выделенные в тексте курсивом;
- исключены из раздела «Библиография» документы, на которые отсутствуют ссылки в тексте стандарта.

Поправка к ГОСТ 31369—2021 (ISO 6976:2016) Газ природный. Вычисление теплоты сгорания, плотности, относительной плотности и числа Воббе на основе компонентного состава

Дата введения — 2021—10—01

В каком месте	Напечатано	Должно быть
Предисловие. Таблица согласования	—	Таджикистан | TJ | Таджикстандарт

(ИУС № 2 2022 г.)

Поправка к ГОСТ 31369—2021 (ISO 6976:2016) Газ природный. Вычисление теплоты сгорания, плотности, относительной плотности и числа Воббе на основе компонентного состава

В каком месте	Напечатано	Должно быть		
Предисловие. Таблица согласования	—	Казахстан	KZ	Госстандарт Республики Казахстан

(ИУС № 8 2022 г.)

Поправка к ГОСТ 31369—2021 (ISO 6976:2016) Газ природный. Вычисление теплоты сгорания, плотности, относительной плотности и числа Воббе на основе компонентного состава

В каком месте	Напечатано	Должно быть
Предисловие. Таблица согласования	—	Азербайджан | AZ | Азстандарт

(ИУС № 5 2023 г.)

МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ

ГАЗ ПРИРОДНЫЙ

Вычисление теплоты сгорания, плотности, относительной плотности и числа Воббе на основе компонентного состава

Natural gas. Calculation of calorific values, mass volume, relative density and Wobbe indices from the composition

**Дата введения — 2023—07—01,
с правом досрочного применения**

1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает методы вычисления высшей теплоты сгорания, низшей теплоты сгорания, плотности, относительной плотности и числа Воббе (высшего и низшего) природного газа, заменителей природного газа и другого газообразного топлива, компонентный состав которых известен в единицах молярной доли. Методы предусматривают возможность вычисления значений показателей газовой смеси при принятых стандартных условиях.

Сумма значений молярной доли компонентов, по определению, составляет единицу *(или 100 %)*. Руководство по выполнению этого требования с использованием хроматографического метода анализа приведено в *ГОСТ 31371.1* и *ГОСТ 31371.2*.

Примечание — При вычислении значений физических показателей должны быть учтены все компоненты, молярная доля которых не менее 0,00005 (0,005 % молярной доли). Перечень компонентов, учитываемых при вычислении значений физических показателей, определяется применяемой(ыми) методикой(ами) измерений. В приложении ДА приведены дополнительные рекомендации по перечню учитываемых компонентов на конкретных узлах измерений.

Для вычисления используют значения различных физических свойств чистых компонентов; эти значения вместе с соответствующими неопределенностями приведены в таблицах, а их источники идентифицированы.

Приведены методы оценки стандартной неопределенности вычисленных физико-химических показателей (ФХП).

Приведены методы вычислений молярных, массовых и объемных значений ФХП, распространяющиеся на любой природный газ, заменитель природного газа или другое газообразное топливо, за исключением объемных характеристик газовых смесей, для которых коэффициент сжимаемости в стандартных условиях менее 0,9.

Примеры вычислений для рекомендованных методов приведены в приложении D.

Примечания

1 Термины «superior (высший)», «higher (высшего порядка)», «upper (верхний)» и «total (полный)» в данном стандарте являются синонимами «gross (высшая)»; так же как «inferior (низший)» и «lower (низшего порядка)» являются синонимами «net (низшая)». Термин «heating value (теплотворная способность)» является синонимом «calorific value (теплота сгорания)»; «mass density (массовая плотность)» и «specific density (удельная плотность)» являются синонимами «density (плотность)»; «Wobbe number (число Воббе)» является синонимом «Wobbe index (индекс Воббе)»; «compressibility factor (коэффициент сжимаемости)» является синонимом «compression factor (коэффициент сжатия)».

Издание официальное

2 Не существует ограничений по составу газа, для которого применимы методы, приведенные в настоящем стандарте. Однако ограничение на вычисления объемных показателей для смесей с коэффициентом сжимаемости менее 0,9 в установленных стандартных условиях измерений накладывают определенные требования к составу.

3 Поскольку молярная доля присутствующей воды обычно не определяется в ходе хроматографического анализа, общепринятой практикой является вычисление физических показателей на основе сухого газа, и влияние водяного пара учитывается отдельной процедурой. В то же время если молярная доля водяного пара известна, то вычисление параметра можно осуществить полностью в соответствии с описанными в настоящем стандарте процедурами.

4 В группу алифатических углеводородов с числом атомов углерода 7 или выше включают любой присутствующий изомер с таким же числом атомов углерода, как у изомера нормального строения.

5 Если пользователь проводит измерение содержания групп аналитически не разделяемых компонентов, например, C_{6+} или C_{7+}, в виде одного псевдокомпонента, то он должен сам установить состав фракции и, следовательно, свойства этого псевдокомпонента в зависимости от целей конкретного применения. Содержащиеся в природном газе пары воды и сероводород рассматриваются как негорючие псевдокомпоненты с энтальпией теплоты сгорания, равной нулю.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие межгосударственные стандарты:

ГОСТ 31371.1 (ISO 6974-1:2012) Газ природный. Определение состава методом газовой хроматографии с оценкой неопределенности. Часть 1. Общие указания и определение состава

ГОСТ 31371.2 (ISO 6974-2:2012) Газ природный. Определение состава методом газовой хроматографии с оценкой неопределенности. Часть 2. Вычисление неопределенности

ГОСТ 34100.3/ISO/IEC Guide 98-3:2008 Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов и классификаторов на официальном интернет-сайте Межгосударственного совета по стандартизации, метрологии и сертификации (gost.e-ecolog.ru по указателям национальных стандартов, издаваемым в государствах, указанных в предисловии, или на официальных сайтах соответствующих национальных органов по стандартизации. Если на документ дана недатированная ссылка, то следует использовать документ, действующий на текущий момент, с учетом всех внесенных в него изменений. Если заменен ссылочный документ, на который дана датированная ссылка, то следует использовать указанную версию этого документа. Если после принятия настоящего стандарта в ссылочный документ, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение применяется без учета данного изменения. Если ссылочный документ отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, применяется в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **высшая теплота сгорания** (gross calorific value): Количество теплоты, которое может выделиться при полном сгорании в присутствии кислорода определенного количества газа таким образом, что давление p_1, при котором происходит реакция, остается постоянным, а все продукты сгорания принимают ту же температуру t_1, что и температура реагентов. При этом все продукты находятся в газообразном состоянии, за исключением воды, которая конденсируется в жидкость при t_1.

Примечание — Если высшую теплоту сгорания вычисляют для количества газа, выраженного в единице молярной доли, ее обозначают как $(Hc)_G(t_1, p_1)$; если высшую теплоту сгорания вычисляют для количества газа, выраженного в единице массы, ее обозначают как $(Hm)_G(t_1, p_1)$. В том случае, если высшую теплоту сгорания вычисляют для количества газа, выраженного в единице объема, ее обозначают как $(Hv)_G(t_1, p_1; t_2, p_2)$, где t_2 и p_2 — (измеренные) стандартные условия для объема газа (см. рисунок 1).

3.2 **низшая теплота сгорания** (net calorific value): Количество теплоты, которое может выделиться при полном сгорании в присутствии кислорода определенного количества газа таким образом, что давление p_1, при котором происходит реакция, остается постоянным, а все продукты сгорания принимают ту же температуру t_1, что и температура реагентов. При этом все продукты находятся в газообразном состоянии.

Примечание — Значения молярной, массовой и объемной низшей теплоты сгорания обозначают соответственно как $(Hc)_N(t_1, p_1)$, $(Hm)_N(t_1, p_1)$ и $(Hv)_N(t_1, p_1; t_2, p_2)$.

3.3 **плотность** (density): Масса единицы объема газа при определенных значениях давления и температуры.

3.4 **относительная плотность** (relative density): Плотность газа, деленная на плотность сухого воздуха стандартного состава при одинаковых заданных значениях давления и температуры.

Примечание — Термин «идеальная относительная плотность» применяют в тех случаях, когда как газ, так и воздух считаются средами, которые подчиняются закону идеального газа (см. 3.8). Термин «реальная относительная плотность» применяют в тех случаях, когда как газ, так и воздух считаются реальными средами (см. 3.9). *Стандартный состав сухого воздуха приведен в приложении ДБ.*

3.5 **число Воббе высшее** (gross Wobbe index): Значение высшей объемной теплоты сгорания при определенных стандартных условиях, деленное на квадратный корень относительной плотности при тех же стандартных условиях измерений.

Примечание — При обычном применении и в отсутствие какого-либо другого спецификатора термин «число Воббе» используют для обозначения величины, которая здесь идентифицирована как число Воббе высшее.

3.6 **число Воббе низшее** (net Wobbe index): Значение низшей объемной теплоты сгорания при определенных стандартных условиях, деленное на квадратный корень относительной плотности при тех же стандартных условиях измерений.

3.7 **энтальпия перехода** (enthalpy of transformation): Выделяющееся количество теплоты, сопровождающее изменение состояния (перехода) вещества или системы из одного (начального) в другое (конечное) состояние.

Примечания

1 Положительное выделение теплоты по правилу термодинамики численно равно отрицательному приращению энтальпии.

2 В контексте настоящего стандарта можно выделить следующее:

- энтальпия сгорания: начальное состояние — это исходная стехиометрическая смесь реагентов до сжигания, а конечное состояние — это продукты сгорания при том же давлении и той же температуре;
- стандартная энтальпия испарения: начальное состояние — это вещество в жидком состоянии при насыщении, а конечное состояние — это то же самое вещество в гипотетическом состоянии идеального газа при той же самой температуре *и давлении 101,325 кПа;*
- разность энтальпий (или энтальпийная разность): начальное состояние — это газ или газовая смесь при температуре T_1, а конечное состояние — это тот же самый газ или газовая смесь при том же давлении, но при другой температуре T_2;
- поправка на энтальпию (или энтальпийная поправка) (остаточная энтальпия): начальное состояние — это газ или газовая смесь в гипотетическом состоянии идеального газа, а конечное состояние — это тот же самый газ или газовая смесь при том же давлении и той же температуре, но в состоянии реального газа.

3.8 **идеальный газ** (ideal gas): Газ, который подчиняется закону идеального газа.

Примечание — Закон идеального газа можно записать в виде уравнения

$$p \cdot V^\circ = R \cdot T,$$

где p — абсолютное давление;

T — термодинамическая температура;

V° — объем, который занимает один моль идеального газа (молярный объем идеального газа);

R — универсальная газовая постоянная в когерентных производных единицах.

3.9 **реальный газ** (real gas): Газ, свойства которого отличаются от закона идеального газа.

Примечание — Реальный газ не подчиняется закону идеального газа. Отклонение от идеальности можно записать в виде уравнения состояния

$$p \cdot V = Z(T, p) \cdot R \cdot T,$$

где V — объем, который занимает один моль реального газа (молярный объем реального газа);

$Z(T, p)$ — переменная, часто близкая к единице, и известная как коэффициент сжимаемости (см. 3.10).

3.10 **коэффициент сжимаемости** (compression factor): Действительный (реальный) объем данной массы газа при определенных давлении и температуре, деленный на его объем при тех же самых условиях, вычисленный по уравнению закона идеального газа.

3.11 **стандартные условия сгорания** (combustion reference conditions): Определенные температура t_1 и давление p_1, при которых условно сжигают топливо.

3.12 **стандартные условия измерений** (metering reference conditions): Определенные температура t_2 и давление p_2, при которых количество сжигаемого топлива определяют условно.

Примечания

1 Не существует причины принимать стандартные условия измерений такими же самыми, как и стандартные условия сгорания (см. рисунок 1).

2 В разных странах мира используют различные значения стандартных условий *(см. приложение ДВ)*.

3 Применение температуры 15,55 °С предлагается как сокращение для точного эквивалента по Цельсию для 60 °F, т. е. $15^{5/9}$ или 15,5 (5 в периоде) °С.

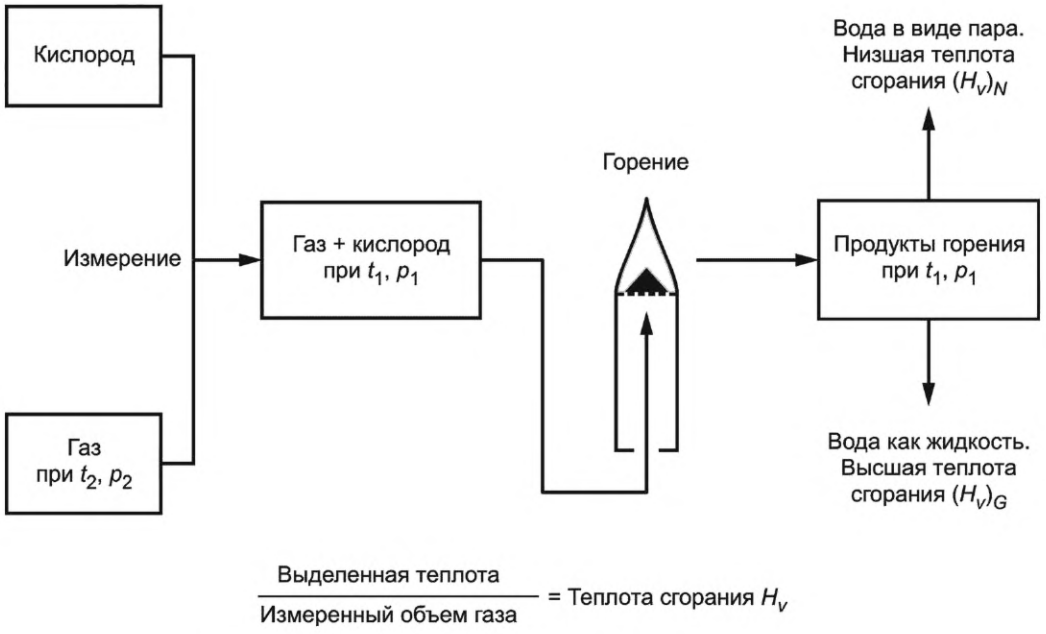

Рисунок 1 — Объемная теплота сгорания. Стандартные условия сгорания и измерений

4 Обозначения

В настоящем стандарте использованы следующие обозначения:

A — атомная масса, кг · кмоль$^{-1}$;
a — индекс числа атомов углерода в обобщенных формулах молекул $C_aH_bN_cO_dS_e$;
b — индекс числа атомов водорода в обобщенных формулах молекул $C_aH_bN_cO_dS_e$;
c — индекс числа атомов азота в обобщенных формулах молекул $C_aH_bN_cO_dS_e$;
D — плотность, кг · м$^{-3}$;
d — индекс числа атомов кислорода в обобщенных формулах молекул $C_aH_bN_cO_dS_e$;
e — индекс числа атомов серы в обобщенных формулах молекул $C_aH_bN_cO_dS_e$;
F — функция, которая определяет показатель *Y*;
G — относительная плотность;
Hc — молярная теплота сгорания, кДж · моль$^{-1}$;
Hm — массовая теплота сгорания, МДж · кг$^{-1}$;
Hv — объемная теплота сгорания, МДж · м$^{-3}$;
k — коэффициент охвата;
L — молярная энтальпия испарения воды, кДж · моль$^{-1}$;
M — молярная масса, кг · кмоль$^{-1}$;
N — число компонентов в смеси;
n — число определений в серии измерений;

p — давление (абсолютное), кПа
q — точное вводное значение для вычисления Y;
R — *универсальная (молярная)* газовая постоянная, Дж · моль$^{-1}$ · К$^{-1}$;
r — коэффициент корреляции;
s — коэффициент суммирования;
T — термодинамическая (абсолютная) температура, К;
t — температура по Цельсию, °С;
$U(Y)$ — расширенная неопределенность Y;
$u(Y)$ — стандартная неопределенность Y;
V — молярный объем, м^3 · кмоль$^{-1}$;
W — число Воббе, МДж · м$^{-3}$;
x — молярная доля;
x^* — *ненормализованное значение молярной доли;*
Y — обобщенный физико-химический показатель;
y — неточная вводная величина для вычисления Y;
y_i — *объемная доля i-го компонента;*
Z — коэффициент сжимаемости.

Нижние индексы

G — высшая (теплота сгорания или число Воббе);
i — номер компонента;
j — номер компонента в матрице;
k — идентификатор показателя;
m — идентификатор точных вводных значений;
N — низшая (теплота сгорания или число Воббе);
n — число измерений;
air — воздух;
0 — стандартное (базовое) значение (давления);
1 — стандартные условия сгорания;
2 — стандартные условия измерений.

Верхний индекс

° — для состояния идеального газа.

5 Принципы

В настоящем стандарте приведены методы вычисления значений теплоты сгорания (высшей и низшей), плотности, относительной плотности и числа Воббе (высшего и низшего) любого природного газа, заменителя природного газа или другого газообразного топлива на основе известного компонентного состава в единицах молярной доли.

Для вычисления значений теплоты сгорания используют формулы, в которых для всех отдельных компонентов газовой смеси табличное значение молярной теплоты сгорания идеального газа берут в соответствии со значениями их молярной доли в смеси, затем все полученные значения суммируют, чтобы получить значение молярной теплоты сгорания для смеси идеального газа. Далее приведены формулы для преобразования этой величины в низшую теплоту сгорания идеального газа, а затем в высшую и низшую объемную и массовую теплоту сгорания идеального газа.

Аналогично для вычисления плотности и относительной плотности используют формулы, в которых для всех отдельных компонентов газовой смеси табличное значение молярной массы берут в соответствии со значениями их молярной доли в смеси, затем все полученные значения суммируют, чтобы получить значение молярной массы газовой смеси. Далее приведены формулы для преобразования молярной массы в плотность идеального газа или в относительную плотность.

Значения плотности или относительной плотности реального газа вычисляют с учетом объемного поправочного коэффициента (коэффициент сжимаемости), рекомендации по вычислению которого приведены ниже.

Перевод значений теплоты сгорания идеального газа в значения теплоты сгорания реального газа является достаточно простым. Чтобы получить молярную теплоту сгорания реального газа, необходимо ввести небольшую поправку на энтальпию (остаточную энтальпию) к молярной теплоте сгорания (высшей или низшей) идеального газа. Однако эта поправка на энтальпию является настолько незначительной, что ею обоснованно можно пренебречь.

Вследствие пренебрежения поправкой на энтальпию значения молярной и массовой теплоты сгорания реального газа равны соответствующим значениям теплоты сгорания идеального газа. Чтобы получить значения объемной теплоты сгорания (высшей и низшей) для реального газа, на основе значений для идеального газа применяют упомянутый выше объемный поправочный коэффициент (коэффициент сжимаемости).

Кроме того, приведены формулы для вычисления значений числа Воббе для идеального и реального газов и для других рассмотренных здесь показателей.

Для каждого показателя природного газа, для которого приведены расчетные формулы, применимы описанные в *ГОСТ 34100.3* методы для получения дополнительных формул, позволяющих оценить соответствующую неопределенность.

В сущности, каждую неопределенность вычисляют из аналитического вывода коэффициентов чувствительности путем определения частной производной от формул вычисления соответствующего показателя смеси для каждой из вводных величин (а именно физических показателей каждого чистого компонента и значений молярной доли компонентов), с которой может ассоциироваться неопределенность. Эти выводы также учитывают неизбежные корреляции между значениями молярной доли компонентов и также неизбежными, но менее очевидными, корреляциями между значениями молярной массы компонентов (см. раздел 11).

Для каждого показателя общую дисперсию (квадрат неопределенности) получают сложением независимых вкладов в дисперсию от каждого источника неопределенности и в результате общую (суммарную) неопределенность берут как квадратный корень от этого значения по формулам в соответствии с приложением В.

В разделе 12 приведены табличные значения для соответствующих физических свойств чистых компонентов природного газа и связанных с ними неопределенностей для каждого набора стандартных условий. Вспомогательные данные, включая неопределенности, используют в соответствии с приложением А. Примеры вычислений приведены в приложении D.

6 Поведение идеального и реального газов

6.1 Энтальпия сгорания

Фундаментальные физические величины, требующиеся для вычисления значений теплоты сгорания, — это, в первую очередь, (стандартные) молярные энтальпии сгорания идеального газа (значения молярной теплоты сгорания идеального газа) для чистых компонентов газовой смеси. Эти величины являются сложными функциями температуры; но при этом их значения для конкретной стандартной температуры сгорания t_1 необходимы. По практическим соображениям, от пользователя не требуется осуществления расчетов для получения соответствующих значений при любой произвольно выбранной стандартной температуре. В таблицах настоящего стандарта приведены значения данной величины для температур t_1 = 25 °С, 20 °С, 15,55 °С (60 °F, см. 3.12, примечание 3), 15 °С (59 °F) и 0 °С. Важно, что все пять значений для любого вещества являются взаимно согласующимися с точки зрения термодинамики.

6.2 Вычисление коэффициента сжимаемости

При вычислении объемной теплоты сгорания реального газа требуется введение поправки, учитывающей отличие объемов реального и идеального газов. Этой поправкой пренебрегать нельзя, ее также необходимо учитывать при вычислении плотности, относительной плотности и числа Воббе.

Поправку на неидеальность объема газа вносят путем использования коэффициента сжимаемости Z газовой смеси. Коэффициент сжимаемости Z при стандартных условиях измерений, который необходим для вычислений, описанных в разделах 9 и 10, вычисляют по формуле

$$Z(t_2, p_2) = 1 - \left(\frac{p_2}{p_0}\right) \cdot \left[\sum_{j=1}^{N} x_j \cdot s_j(t_2, p_0)\right]^2, \quad (1)$$

где p_0 = 101,325 кПа, а стандартное давление измерений p_2 выражено в тех же единицах.

Суммирование проводят по всем N компонентам смеси, формула достоверна в диапазоне значений давления p_2 от 90 до 110 кПа. Значения так называемого коэффициента суммирования $s_j(t_2, p_0)$ приведены в таблице 2 при четырех представляющих общий интерес значениях стандартной температуры измерений для всех компонентов природного газа и заменителя природного газа, рассматриваемых в настоящем стандарте.

Примечание — Формулу (1) можно также использовать для вычисления значений коэффициента сжимаемости чистых компонентов, но это необязательно даст наиболее точный из возможных результатов. В частности, формула не дает приемлемых значений для коэффициентов сжимаемости водорода, гелия и неона, для которых $Z > 1$, и таких компонентов, как высшие углеводороды, которые являются жидкостями при стандартных условиях измерений. Для использования таких вычислений вне контекста настоящего стандарта пользователь должен предварительно оценить их пригодность. Значения коэффициентов сжимаемости для чистых компонентов, обычно присутствующих в природном газе, применяют в соответствии *с приложением ДВ*.

7 Вычисление молярной теплоты сгорания

7.1 Высшая теплота сгорания

Высшую молярную теплоту сгорания при температуре t_1 газовой смеси известного состава вычисляют по формуле

$$(Hc)_G(t_1) = (Hc)^\circ_G(t_1) = \sum_{j=1}^{N} x_j \cdot \left[(Hc)^\circ_G\right]_j(t_1), \qquad (2)$$

где $(Hc)^\circ_G(t_1)$ — высшая молярная теплота сгорания смеси идеальных газов;

$[(Hc)_G]_j(t_1)$ — высшая молярная теплота сгорания смеси реальных газов;

$[(Hc)^\circ_G]_j(t_1)$ — высшая молярная теплота сгорания идеального газа j-го компонента;

x_j — молярная доля j-го компонента.

Примечания

1 Значения $[(Hc)^\circ_G]_j$ не зависят от давления, следовательно, стандартное давление сгорания p_1 учитывать не имеет смысла и из расчетов исключено.

2 Молярная теплота сгорания идеального газа для газа или газовой смеси определяется в настоящем стандарте как положительная величина. Значения, приведенные в таблице 3, численно равны значениям стандартной молярной энтальпии сгорания, которые в то же время условно выражаются как отрицательные величины (см. 3.7).

Численные значения $[(Hc)^\circ_G]_j(t_1)$ для t_1 = 25 °С приведены в таблице 3. Эти значения для $[(Hc)^\circ_G]_j$ (25) взяты из литературных первоисточников. Значения $[(Hc)^\circ_G]_j(t_1)$ для других температур (t_1 = 20 °С, 15,55 °С, 15 °С и 0 °С) также приведены в таблице 3. Эти значения выведены из значений для 25 °С.

7.2 Низшая теплота сгорания

Низшую молярную теплоту сгорания при температуре t_1 газовой смеси известного состава вычисляют по формуле

$$(Hc)_N(t_1) = (Hc)^\circ_N(t_1) = (Hc)^\circ_G(t_1) - \sum_{j=1}^{N} x_j \cdot \frac{b_j}{2} \cdot L^\circ(t_1), \qquad (3)$$

где $(Hc)^\circ_N(t_1)$ — низшая молярная теплота сгорания смеси идеальных газов;

$(Hc)_N(t_1)$ — низшая молярная теплота сгорания смеси реальных газов;

$L^\circ(t_1)$ — стандартная энтальпия испарения воды при t_1;

b_j — число атомов водорода в каждой молекуле j-го компонента (водородный индекс).

Значения $L^\circ(t_1)$ приведены в приложении А для температуры 25 °С, 20 °С, 15,55 °С (60 °F), 15 °С и 0 °С. Значения b_j приведены в таблице 1.

8 Вычисление массовой теплоты сгорания

8.1 Высшая теплота сгорания

Высшую массовую теплоту сгорания при температуре t_1 газовой смеси известного состава вычисляют по формуле

$$(Hm)_G(t_1) = (Hm)^\circ_G(t_1) = \frac{(Hc)^\circ_G(t_1)}{M}, \quad (4)$$

где $(Hm)^\circ_G(t_1)$ — высшая массовая теплота сгорания смеси идеальных газов;

$(Hm)_G(t_1)$ — высшая массовая теплота сгорания смеси реальных газов;

M — молярная масса смеси, вычисленная по формуле

$$M = \sum_{j=1}^{N} x_j \cdot M_j, \quad (5)$$

где M_j — молярная масса j-го компонента.

Значение молярной массы каждого компонента, рассматриваемого в настоящем стандарте, приведено в таблице 1.

8.2 Низшая теплота сгорания

Низшую массовую теплоту сгорания при температуре t_1 газовой смеси известного состава вычисляют по формуле

$$(Hm)_N(t_1) = (Hm)^\circ_N(t_1) = \frac{(Hc)^\circ_N(t_1)}{M}, \quad (6)$$

где $(Hm)^\circ_N(t_1)$ — низшая массовая теплота сгорания смеси идеальных газов;

$(Hm)_N(t_1)$ — низшая массовая теплота сгорания смеси реальных газов.

Примечание — Требуется обращать внимание на используемые единицы величин для вычислений, описанных в данном разделе. При Hc в килоджоулях на моль и M в килограммах на киломоль значение Hm автоматически получается в мегаджоулях на килограмм.

9 Вычисление объемной теплоты сгорания

9.1 Высшая теплота сгорания идеального газа

Высшую объемную теплоту сгорания идеального газа при температуре сгорания t_1 газовой смеси известного состава, определенного при температуре t_2 и давлении p_2, вычисляют по формуле

$$(Hv)^\circ_G(t_1, t_2, p_2) = \frac{(Hc)^\circ_G(t_1)}{V^\circ}, \quad (7)$$

где $(Hv)^\circ_G(t_1, t_2, p_2)$ — высшая объемная теплота сгорания смеси идеального газа;

V° — молярный объем смеси идеальных газов, вычисленный по формуле

$$V^\circ = R \cdot \frac{T_2}{p_2}, \quad (8)$$

где R — универсальная газовая постоянная (см. А.1);

T_2 — абсолютная температура.

9.2 Низшая теплота сгорания идеального газа

Низшую объемную теплоту сгорания идеального газа при температуре сгорания t_1 газовой смеси известного состава, определенного при температуре t_2 и давлении p_2, вычисляют по формуле

$$(Hv)^\circ_N(t_1, t_2, p_2) = \frac{(Hc)^\circ_N(t_1)}{V^\circ}, \quad (9)$$

где $(Hv)^\circ_N(t_1, t_2, p_2)$ — низшая объемная теплота сгорания смеси идеальных газов.

9.3 Высшая теплота сгорания реального газа

Высшую объемную теплоту сгорания реального газа при температуре сгорания t_1 газовой смеси известного состава, определенного при температуре t_2 и давлении p_2, вычисляют по формуле

$$(Hv)_G(t_1,t_2,p_2)=\frac{(Hc)^{\circ}_G(t_1)}{V}, \quad (10)$$

где $(Hv)_G(t_1, t_2, p_2)$ — высшая объемная теплота сгорания реального газа;

V — молярный объем смеси реальных газов, вычисленный по формуле

$$V=Z(t_2,p_2)\cdot R\cdot\frac{T_2}{p_2}, \quad (11)$$

где $Z(t_2, p_2)$ — коэффициент сжимаемости при стандартных условиях измерений.

Коэффициент сжимаемости $Z(t_2, p_2)$ вычисляют по формуле (1), используя значения $s_j(t_2, p_0)$ для индивидуальных чистых веществ, приведенные в таблице 2. В настоящем стандарте вычисления являются достоверными только для значений $Z > 0{,}9$.

9.4 Низшая теплота сгорания реального газа

Низшую объемную теплоту сгорания реального газа при температуре сгорания t_1 газовой смеси известного состава, определенного при температуре t_2 и давлении p_2, вычисляют по формуле

$$(Hv)_N(t_1,t_2,p_2)=\frac{(Hc)^{\circ}_N(t_1)}{V}, \quad (12)$$

где $(Hv)_N(t_1, t_2, p_2)$ — низшая объемная теплота сгорания реального газа.

Примечание — Требуется обращать внимание на используемые единицы величин для вычислений, описанных в данном разделе. При R в джоулях на моль-кельвин и p в килопаскалях значение V автоматически получается в кубических метрах на киломоль, а значение Hv — в мегаджоулях на кубический метр.

10 Вычисление физико-химических показателей

10.1 Относительная плотность идеального газа

Относительную плотность идеального газа, не зависящую от стандартных условий, вычисляют по формуле

$$G^{\circ}=\frac{M}{M_{air}}, \quad (13)$$

где G° — относительная плотность идеального газа;

M — молярная масса смеси, вычисленная по формуле (5);

M_{air} — молярная масса сухого воздуха стандартного состава.

Для стандартного состава воздуха выведено значение M_{air} = (28,965 46 ± 0,00017) кг · кмоль$^{-1}$ (см. А.3).

10.2 Плотность идеального газа

Плотность идеального газа, зависящую от температуры t_2 и давления p_2, вычисляют по формуле

$$D^{\circ}(t_2,p_2)=\frac{M}{V^{\circ}}, \quad (14)$$

где $D^{\circ}(t_2, p_2)$ — плотность идеального газа при стандартных условиях измерений;

M — молярная масса смеси, вычисленная по формуле (5);

V° — молярный объем смеси идеальных газов, вычисленный по формуле (8).

10.3 Число Воббе (высшее) идеального газа

Число Воббе (высшее) идеального газа вычисляют по формуле

$$W^{\circ}_G(t_1,t_2,p_2)=\frac{(Hv)^{\circ}_G(t_1,t_2,p_2)}{\sqrt{G^{\circ}}}, \quad (15)$$

где $W^{\circ}_G(t_1, t_2, p_2)$ — число Воббе (высшее) идеального газа;

$(Hv)^{\circ}_G(t_1, t_2, p_2)$ — вычисляют в соответствии с 9.1.

10.4 Число Воббе (низшее) идеального газа

Число Воббе (низшее) идеального газа вычисляют по формуле

$$W_N^{\circ}(t_1,t_2,p_2)=\frac{(Hv)_N^{\circ}(t_1,t_2,p_2)}{\sqrt{G^{\circ}}}, \tag{16}$$

где $W_N^{\circ}(t_1, t_2, p_2)$ — число Воббе (низшее) идеального газа;

$(Hv)_N^{\circ}(t_1, t_2, p_2)$ — вычисляют в соответствии с 9.2.

10.5 Относительная плотность реального газа

Относительную плотность реального газа при стандартных условиях измерений (t_2, p_2) вычисляют по формуле

$$G(t_2,p_2)=\frac{G^{\circ}\cdot Z_{\text{air}}(t_2,p_2)}{Z(t_2,p_2)}, \tag{17}$$

где $G(t_2, p_2)$ — относительная плотность реального газа;

$Z(t_2, p_2)$ — коэффициент сжимаемости газа;

$Z_{\text{air}}(t_2, p_2)$ — коэффициент сжимаемости сухого воздуха стандартного состава.

Коэффициент сжимаемости $Z(t_2,p_2)$ вычисляют по формуле (1), используя значения коэффициента суммирования $s_j(t_2, p_0)$ для отдельных чистых веществ, приведенные в таблице 2. Коэффициент сжимаемости $Z_{\text{air}}(t_2, p_2)$ вычисляют по формуле

$$Z_{\text{air}}(t_2,p_2)=1-\frac{p_2}{p_0}\cdot\left[1-Z_{\text{air}}(t_2,p_0)\right], \tag{18}$$

где p_0 = 101,325 кПа, стандартное давление p_2 выражают в тех же единицах измерения (см. А.3).

$Z_{\text{air}}(t_2 = 0\ °C, p_0) = 0{,}999\ 419$;

$Z_{\text{air}}(t_2 = 15\ °C, p_0) = 0{,}999\ 595$;

$Z_{\text{air}}(t_2 = 15{,}55\ °C, p_0) = 0{,}999\ 601$;

$Z_{\text{air}}(t_2 = 20\ °C, p_0) = 0{,}999\ 645$.

Формула (18) действительна в диапазоне значений p_2 от 90 до 110 кПа.

10.6 Плотность реального газа

Плотность реального газа при стандартных условиях измерений вычисляют по формуле

$$D(t_2,p_2)=\frac{D^{\circ}(t_2,p_2)}{Z(t_2,p_2)}, \tag{19}$$

где $D(t_2, p_2)$ — плотность реального газа.

10.7 Число Воббе (высшее) реального газа

Число Воббе (высшее) реального газа вычисляют по формуле

$$W_G(t_1,t_2,p_2)=\frac{(Hv)_G(t_1,t_2,p_2)}{\sqrt{G(t_2,p_2)}}, \tag{20}$$

где $W_G(t_1, t_2, p_2)$ — число Воббе (высшее) реального газа;

$(Hv)_G(t_1, t_2, p_2)$ — вычисляют в соответствии с 9.3.

10.8 Число Воббе (низшее) реального газа

Число Воббе (низшее) реального газа вычисляют по формуле

$$W_N(t_1,t_2,p_2)=\frac{(Hv)_N(t_1,t_2,p_2)}{\sqrt{G(t_2,p_2)}}, \tag{21}$$

где $W_N(t_1, t_2, p_2)$ — число Воббе (низшее) реального газа;

$(Hv)_N(t_1, t_2, p_2)$ — вычисляют в соответствии с 9.4.

Примечание — Требуется обращать внимание на используемые единицы величин для вычислений, описанных в данном разделе, особенно для вычисления плотности, *D*. При *R* в джоулях на моль-кельвин, *p* в килопаскалях и *M* в килограммах на киломоль значение *D* автоматически получается в килограммах на кубический метр.

11 Вычисление неопределенности

11.1 Принципы

В соответствии с общими принципами метрологии, как указано в *ГОСТ 34100.3*, каждый результат вычислений приводят с указанием оценки неопределенности.

Известны три разных приема оценки неопределенностей показателей качества, которые можно вычислить с использованием настоящего стандарта, а именно:

a) метод, который использует коэффициенты чувствительности, выведенные аналитически как частные производные рассматриваемой величины в отношении каждой из вводных величин (это так называемый аналитический метод);

b) метод, который также использует коэффициенты чувствительности, но выведенные с использованием метода конечных разностей;

c) метод вычислений, основанный на методах Монте Карло.

Методы b) и c) применимы и пригодны для использования с настоящим стандартом, но не рассматриваются в данном разделе. В общем, приемлем любой метод, который согласуется с принципами, описанными в *ГОСТ 34100.3*.

Методы a)—c) применимы для получения оценки неопределенности для каждого отдельного независимого результата. Однако в *ГОСТ 34100.3* указывается, что в большинстве рутинных операций, нецелесообразно или неуместно требовать независимой неопределенности для каждого результата. Хорошим примером может служить непрерывный онлайн-процесс газохроматографического анализа.

В *ГОСТ 34100.3* предлагается существенная информация для адекватной общей оценки неопределенности путем оценки или логических выводов из записей соответствующей калибровки, оценки соответствия, законодательного контроля и/или аккредитации и т. д. (это так называемый универсальный метод).

11.2 Формулы для аналитического метода

Значение любого показателя Y можно выразить как функцию F соответствующих входящих переменных y_i и q_k следующим уравнением:

$$Y = F(y_1, y_2, y_3,\ldots y_n, q_1, q_2, q_3,\ldots q_n), \tag{22}$$

где y_i — входная переменная величина и связанная с ней неопределенность $u(y_i)$;

q_k — входной параметр, который указывается без неопределенности (т. е. считается точным).

Суммарную стандартную неопределенность $u(Y)$ для показателя Y можно вычислить в соответствии с общим выражением, приведенным в ГОСТ *34100.3* для коррелированных входных величин y_i и y_j, по формуле

$$u^2(Y) = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{\partial Y}{\partial y_i}\right)\cdot u(y_i)\cdot r(y_i, y_j)\cdot u(y_j)\cdot\left(\frac{\partial Y}{\partial y_j}\right), \tag{23}$$

где $\left(\frac{\partial Y}{\partial y_i}\right)$ — частная производная (коэффициент чувствительности) Y по отношению к y_i;

$r(y_i, y_j)$ — коэффициент корреляции между y_i и y_j.

Вычисления неопределенностей, которые возникают при применении формулы (23) для каждого из показателей, описанных в настоящем стандарте, проводят по формулам в соответствии с приложением В. Требуемыми входными величинами являются состав смеси и физические свойства чистого компонента (или смеси) вместе со всеми связанными с ними неопределенностями и соответствующими значениями коэффициентов корреляции.

11.3 Исходные данные для аналитического метода

11.3.1 Компонентный состав и связанные с ним неопределенности

Для оценки вклада неопределенности измеренных значений молярной доли компонентов в суммарную неопределенность показателей качества газа обычно делают следующие допущения:

a) что известен полный компонентный состав (как требуется в разделе 1) и для каждого компонента определено значение молярной доли и связанная с ним оценка неопределенности, и либо

b) что полное описание корреляций между известными значениями молярной доли компонентов доступно в виде ковариационной матрицы, т. е. как матрицы коэффициентов корреляции нормализованных значений молярной доли, либо

c) что не существует корреляций между значениями молярной доли компонентов, т. е. что все значения молярной доли компонентов являются взаимно независимыми.

Наиболее полная и точная оценка неопределенности получается при применении допущений a) и b) по формулам в соответствии с приложением В, но во многих случаях полная матрица коэффициентов корреляции для значений молярной доли $r(x_i, x_j)$ недоступна. В таком случае приемлемо применение допущений a) и c), но не без последствий для конечного результата.

Для случая определения метана «по разности» полную матрицу коэффициентов корреляции значений молярной доли вычисляют по формулам:

$$r(x_i, x_{CH_4}) = -\frac{u(x_i)}{u(x_{CH_4})}$$ *— для корреляций метана со всеми остальными компонентами);*

$r(x_i, x_j) = 1$ *(для диагональных элементов матрицы);*

$r(x_i, x_j) = 0$ *(для остальных элементов матрицы).*

Для случая, когда компонентный состав определен методом нормализации и известны ненормализованные значения молярной доли компонентов и их неопределенности, полную матрицу коэффициентов корреляции значений молярной доли $r(x_i, x_j)$ вычисляют по формуле

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i) \cdot u(x_j)},$$

$$u(x_i, x_j) = \frac{-x_i u^2(x_j^*) - x_j u^2(x_i^*) + x_i x_j \sum_{k=1}^{N} u^2(x_k^*)}{\left(\sum_{k=1}^{N} x_k^*\right)^2}, \qquad (24)$$

где x^* — ненормализованные значения молярной доли;

$u(x^*)$ — неопределенность ненормализованных значений молярной доли;

x — нормализованные значения молярной доли;

$u(x)$ — неопределенность нормализованных значений молярной доли.

В этих случаях применение допущений a) и b) для оценки неопределенности является оптимальным.

В то же время при отсутствии достаточной информации для получения полной матрицы коэффициентов корреляции значений молярной доли, для оценки неопределенности наиболее приемлемым будет применение допущений a) и c). В этом случае коэффициенты корреляции $r(x_i, x_j)$ должны учитываться как элементы единичной матрицы, т. е. матрицы, в которой все элементы на диагонали имеют значение единицы, а все элементы вне диагонали — нули.

Примечание — В зависимости от способа, которым обычно определяют состав газовой смеси, допущение c) не может быть строго достоверным. Составы x_i и x_j всегда коррелируются в значительной степени, поскольку (в дополнение к корреляциям при предварительной нормализации) обработка данных путем нормализации, необходимая для определения значений молярной доли по исходным данным, будет вводить корреляцию. Следовательно, допущение, что $r(x_i, x_j)$ являются элементами единичной матрицы, как правило, не выполняется. В то же время для типичного анализа природного газа (включающего неопределенности) считается «безопасным» вычислять неопределенность каждого вычисленного показателя при допущении наличия единичной матрицы (т. е. будет обычно завышаться неопределенность каждого показателя, хотя до конца этого гарантировать нельзя).

Если состав газа известен в единицах объемной доли (y_j), их сначала необходимо преобразовать в значения молярной доли *для всех i-компонентов по формуле*

$$x_i = \frac{\dfrac{y_i}{Z_i(t_2, p_2)}}{\sum_{i=1}^{N}\left[\dfrac{y_j}{Z_i(t_2, p_2)}\right]}. \qquad (25)$$

Необходимо отметить, что такие вычисленные значения молярной доли компонентов будут иметь неопределенность больше, чем неопределенность для исходный измеренных значений объемной доли компонентов.

Примечание — Увеличение неопределенности значения молярной доли, пересчитанного из измеренного значения объемной доли компонента, обусловлено появлением составляющей неопределенности значения коэффициента сжимаемости, которое численно составляет тысячные доли процента, что является незначимым и не требует учета при вычислении неопределенности ФХП.

Стратегии, применяемые при нормализации, могут значительно отличаться. Пользователям данного стандарта следует знать, что различные подходы могут привести к различной степени неправильности допущения единичной матрицы для $r(x_i, x_j)$. Выбор процедур нормализации следует проводить в соответствии с рекомендациями *ГОСТ 31371.1* и *ГОСТ 31371.2*.

Данные, приведенные в примере 3 приложения D, наглядно показывают различия, которые могут возникнуть при использовании полной и единичной матриц для коэффициентов корреляции $r(x_i, x_j)$.

11.3.2 Исходные данные, не связанные с составом

Оценки стандартных неопределенностей для исходных данных (показателей качества), не связанных с составом (за исключением молярных масс), представлены в таблицах данных по компонентам, приведенных в разделе 12, и дополнительных данных в соответствии с приложением А. В отсутствие более конкретной информации все эти данные (за исключением молярных масс) следует применять как некоррелированные, т. е. коэффициенты корреляции $r(y_i, y_j)$ должны учитываться как элементы единичной матрицы. Формулы приложения В выведены на основе этого допущения.

Что касается молярных масс, перечисленные значения неизбежно в значительной степени коррелированы, поскольку оцениваются как простая сумма соответствующих атомных масс. Каждый элемент $r(M_i, M_j)$ корреляционной матрицы задается выражением

$$r(M_i,M_j)=\frac{\left\{\left[a_i\cdot a_j\cdot u^2(A_{\mathrm{C}})\right]+\left[b_i\cdot b_j\cdot u^2(A_{\mathrm{H}})\right]+\left[c_i\cdot c_j\cdot u^2(A_{\mathrm{N}})\right]+\left[d_i\cdot d_j\cdot u^2(A_{\mathrm{O}})\right]+\left[e_i\cdot e_j\cdot u^2(A_{\mathrm{S}})\right]\right\}}{u(M_i)\cdot u(M_j)}, \quad (26)$$

где a_j, b_j, c_j, d_j и e_j — индексы числа атомов C, H, N, O и S в j-х химических соединениях $C_aH_bN_cO_dS_e$, значения которых приведены в таблице 1;

$u(A_{\mathrm{C}})$, $u(A_{\mathrm{H}})$, $u(A_{\mathrm{N}})$, $u(A_{\mathrm{O}})$ и $u(A_{\mathrm{S}})$ — стандартные неопределенности атомных масс C, H, N, O и S, значения которых приведены в А.2.

$$u(M_j)=\sqrt{\left[a_j\cdot u\left(A_{\mathrm{C}}\right)\right]^2+\left[b_j\cdot u\left(A_{\mathrm{H}}\right)\right]^2+\left[c_j\cdot u\left(A_{\mathrm{N}}\right)\right]^2+\left[d_j\cdot u\left(A_{\mathrm{O}}\right)\right]^2+\left[e_j\cdot u\left(A_{\mathrm{S}}\right)\right]^2}. \quad (27)$$

Примечание — Для одноатомных компонентов [*гелий j = 49, неон j = 50, аргон j = 51 и* $u(M_j) = u(A_j)$] *элементы корреляционной матрицы находят согласно условиям:*

$r(M_i,M_j) = 0$ (если $i \neq j$);

$r(M_i,M_j) = 1$ (если $i = j$).

11.4 Расширенная неопределенность

Расширенную неопределенность $U(Y)$ вычисленного показателя Y, определяют путем умножения суммарной стандартной неопределенности $u(Y)$ на соответствующий коэффициент охвата k (значение которого должно быть указано) по формуле

$$U(Y) = k\cdot u(Y). \quad (28)$$

Примечание — Коэффициент охвата $k = 2$ обычно обеспечивает доверительный уровень примерно равный 95 %.

11.5 Обработка результатов

11.5.1 Общие положения

При наличии достаточного объема данных настоятельно рекомендуется включать оценку неопределенности как фундаментальную часть полного и правильного выражения результата. Результаты должны быть представлены согласно одной из следующих схем, приведенных здесь в порядке их предпочтения.

11.5.2 Аналитический метод

Для оценки неопределенности, выполненной аналитическим методом, т. е. по формулам приложения В, расширенную неопределенность округляют до двух значащих цифр, используя обычные правила округления. Численное значение Y необходимо округлить до того же десятичного знака, которым заканчивается округленное значение расширенной неопределенности $U(Y)$.

Значение вычисленной величины представляют в виде $Y \pm U(Y)$ (включая единицы измерения).

Такая схема представляет процедуру определения, полностью согласующуюся с *ГОСТ 34100.3.*

Рекомендуется в отчет о результате включать сведения о том, известны ли элементы используемой матрицы коэффициентов корреляции $r(x_i, x_j)$ при оценке неопределенности значений молярной доли (нормализации) или предполагается, что они являются элементами единичной матрицы.

11.5.3 Универсальный метод

Если оценка неопределенности выполняется с помощью универсального метода, расширенную неопределенность округляют до двух значащих цифр, используя обычные правила округления. Численное значение Y необходимо округлить до того же десятичного знака, которым заканчивается округленное значение расширенной неопределенности $U(Y)$.

Пользователь несет ответственность за решение, требует ли задача представления значения $U(Y)$ для каждого результата. Во многих случаях достаточным бывает представление значения $U(Y)$ для обобщенного множества подобных результатов.

11.5.4 Метод для особых случаев

Остаются ситуации, в которых, например, ввиду недостаточности аналитических данных по неопределенности или неадекватности вычислительных моделей невозможно надлежащим образом провести оценки неопределенности показателей, согласующиеся с *ГОСТ 34100.3.*

В таких случаях и при отсутствии каких-либо доказательств недостаточной точности входных аналитических данных для этой цели пользователь данного стандарта должен представлять результаты для каждого вычисленного показателя качества, округленные следующим образом:

молярная теплота сгорания	до 0,01 кДж · моль$^{-1}$;
массовая теплота сгорания	до 0,01 МДж · кг$^{-1}$;
объемная теплота сгорания	до 0,01 МДж · м$^{-3}$;
плотность	до 0,0001 кг · м$^{-3}$;
число Воббе	до 0,01 МДж · м$^{-3}$.

Для каждого показателя пользователь несет ответственность за оценку, насколько обосновано сообщение именно такого числа знаков после запятой и, если обоснования нет, следует соответственно уменьшить сообщаемое число знаков. Число сообщаемых знаков не должно увеличиваться.

11.6 Применение неопределенности

В 11.5 были представлены методы, с помощью которых можно вычислить значение расширенной неопределенности, которое будет связано с соответствующим вычисленным значением физического показателя. Такой результат аналитического метода может полностью удовлетворить требования пользователя.

Однако полезность и применимость оценки неопределенности часто могут зависеть от цели выполнения вычислений. В этом отношении можно выделить ряд отдельных случаев. К ним относятся, но ими не ограничиваются, следующие ситуации:

a) соответствие назначению: если требуется продемонстрировать, что часть аналитического оборудования соответствует своей спецификации по неопределенности (показателя) для различных тестовых газов с известной неопределенностью (состава), то соответствующей величиной для проверки этого является суммарная неопределенность, вычисленная в соответствии с этим пунктом, т.е. включающая как зависящую от состава, так и не зависящую от состава составляющие неопределенности;

b) аналитическая совместимость: если требуется продемонстрировать соответствие (в пределах неопределенности) между результатами двух (или более) наборов идентичного (или аналогичного) аналитического оборудования для одних и тех же тестовых газов, то сначала необходимо исключить те составляющие неопределенности, которые являются общими для каждого набора оборудования, то есть неопределенности, не зависящие от состава. Это может быть достигнуто путем приравнивания каждой из таких неопределенностей нулю в соответствующих формулах неопределенности, таким образом, единственное различие между результатами будет обусловлено неопределенностями, зависящими от состава;

c) внешняя совместимость: если требуется проверить соответствие между результатами, достигнутыми набором аналитического оборудования, и результатами, полученными прямым измерением свойств тех же тестовых газов, то соответствующей мерой неопределенности для аналитического оборудования является суммарная неопределенность, то есть снова включающая как зависящие, так и не зависящие от состава составляющие неопределенности;

d) повторяемость: если требование состоит в том, чтобы проверить характеристику одного элемента аналитического оборудования в условиях повторяемости в соответствии с *ГОСТ 34100.3*, то повторяемость любого результата (показателя) может быть оценена непосредственно из набора вычисленных значений показателей. В качестве альтернативы также можно оценить неопределенность (показателя) путем определения повторяемости для каждого состава и затем использовать эти значения в качестве исходных данных для соответствующей формулы неопределенности. В этом случае также необходимо приравнять нулю составляющие неопределенности показателя, не зависящие от состава, так как они являются общими для всех наборов данных.

12 Таблицы данных

Таблица 1 — Молярная масса и индексы числа атомов для компонентов природного газа

j	Компонент	Молярная масса, M_j, кг · кмоль$^{-1}$	Атомный индекс				
			a_j	b_j	c_j	d_j	e_j
1	Метан	16,042 46	1	4	0	0	0
2	Этан	30,069 04	2	6	0	0	0
3	Пропан	44,095 62	3	8	0	0	0
4	*н*-Бутан	58,122 20	4	10	0	0	0
5	2-Метилпропан	58,122 20	4	10	0	0	0
6	*н*-Пентан	72,148 78	5	12	0	0	0
7	2-Метилбутан	72,148 78	5	12	0	0	0
8	2,2-Диметилпропан	72,148 78	5	12	0	0	0
9	*н*-Гексан	86,175 36	6	14	0	0	0
10	2-Метилпентан	86,175 36	6	14	0	0	0
11	3-Метилпентан	86,175 36	6	14	0	0	0
12	2,2-Диметилбутан	86,175 36	6	14	0	0	0
13	2,3-Диметилбутан	86,175 36	6	14	0	0	0
14	*н*-Гептан	100,201 94	7	16	0	0	0
15	*н*-Октан	114,228 52	8	18	0	0	0
16	*н*-Нонан	128,255 10	9	20	0	0	0
17	*н*-Декан	142,281 68	10	22	0	0	0
56	*н*-Ундекан	156,308 26	11	24	0	0	0
57	*н*-Додекан	170,334 84	12	26	0	0	0
58	*н*-Тридекан	184,361 42	13	28	0	0	0
59	*н*-Тетрадекан	198,388 00	14	30	0	0	0
60	*н*-Пентадекан	212,414 58	15	32	0	0	0
18	Этен	28,053 16	2	4	0	0	0
19	Пропен	42,079 74	3	6	0	0	0
20	1-Бутен	56,106 32	4	8	0	0	0
21	*цис*-2-Бутен	56,106 32	4	8	0	0	0
22	*транс*-2-бутен	56,106 32	4	8	0	0	0
23	2-Метилпропен	56,106 32	4	8	0	0	0
24	1-Пентен	70,132 90	5	10	0	0	0

Окончание таблицы 1

j	Компонент	Молярная масса, M_j, кг · кмоль$^{-1}$	Атомный индекс				
			a_j	b_j	c_j	d_j	e_j
25	Пропадиен	40,063 86	3	4	0	0	0
26	1,2-Бутадиен	54,090 44	4	6	0	0	0
27	1,3-Бутадиен	54,090 44	4	6	0	0	0
28	Этин	26,037 28	2	2	0	0	0
29	Циклопентан	70,132 90	5	10	0	0	0
30	Метилциклопентан	84,159 48	6	12	0	0	0
31	Этилциклопентан	98,186 06	7	14	0	0	0
32	Циклогексан	84,159 48	6	12	0	0	0
33	Метилциклогексан	98,186 06	7	14	0	0	0
34	Этилциклогексан	112,212 64	8	16	0	0	0
35	Бензол	78,111 84	6	6	0	0	0
36	Толуол	92,138 42	7	8	0	0	0
37	Этилбензол	106,165 00	8	10	0	0	0
38	*о*-Ксилол	106,165 00	8	10	0	0	0
39	Метанол	32,041 86	1	4	0	1	0
40	Метанэтиол	48,107 46	1	4	0	0	1
41	Водород	2,015 88	0	2	0	0	0
42	Вода	18,015 28	0	2	0	1	0
43	Сероводород	34,080 88	0	2	0	0	1
44	Аммиак	17,030 52	0	3	1	0	0
45	Цианистый водород	27,025 34	1	1	1	0	0
46	Моноксид углерода	28,010 1	1	0	0	1	0
47	Карбонилсульфид	60,075 1	1	0	0	1	1
48	Сероуглерод	76,140 7	1	0	0	0	2
49	Гелий	4,002 602	0	0	0	0	0
50	Неон	20,179 7	0	0	0	0	0
51	Аргон	39,948	0	0	0	0	0
52	Азот	28,013 4	0	0	2	0	0
53	Кислород	31,998 8	0	0	0	2	0
54	Диоксид углерода	44,009 5	1	0	0	2	0
55	Диоксид серы	64,063 8	0	0	0	2	1
	Воздух	28,965 46	—	—	—	—	—

Примечание — Значения молярной массы, приведенные выше, получены взвешенным суммированием атомных масс (атомных весов) входящих в молекулу элементов, в соответствии с таблицей А.2 приложения А. Все десятичные знаки оставлены в этой таблице, т. е. округление до определенного числа знаков после запятой не применялось (за исключением воздуха). Значения стандартной неопределенности для молярных масс в данную таблицу не включены. При необходимости их вычисляют по формуле (27).

Таблица 2 — Коэффициенты суммирования для компонентов природного газа при различных стандартных температурах измерений

j	Компонент	Коэффициенты суммирования s_j при различных стандартных температурах измерений				$u(s_j)$
		0 °C	15 °C	15,55 °C	20 °C	
1	Метан	0,048 86	0,044 52	0,044 37	0,043 17	0,000 5
2	Этан	0,099 7	0,091 9	0,091 6	0,089 5	0,001 1

Продолжение таблицы 2

j	Компонент	Коэффициенты суммирования s_j при различных стандартных температурах измерений				$u(s_j)$
		0 °C	15 °C	15,55 °C	20 °C	
3	Пропан	0,146 5	0,134 4	0,134 0	0,130 8	0,001 6
4	*н*-Бутан	0,202 2	0,184 0	0,183 4	0,178 5	0,003 9
5	2-Метилпропан	0,188 5	0,172 2	0,171 7	0,167 3	0,003 1
6	*н*-Пентан	0,258 6	0,236 1	0,235 4	0,229 5	0,010 7
7	2-Метилбутан	0,245 8	0,225 1	0,224 4	0,218 9	0,008 8
8	2,2-Диметилпропан	0,224 5	0,204 0	0,203 3	0,197 9	0,006 0
9	*н*-Гексан	0,331 9	0,300 1	0,299 0	0,290 7	0,027 1
10	2-Метилпентан	0,311 4	0,282 6	0,281 6	0,274 0	0,022 1
11	3-Метилпентан	0,299 7	0,276 2	0,275 4	0,269 0	0,023 4
12	2,2-Диметилбутан	0,253 0	0,235 0	0,234 4	0,229 5	0,017 3
13	2,3-Диметилбутан	0,283 6	0,263 2	0,262 5	0,256 9	0,020 7
14	*н*-Гептан	0,407 6	0,366 8	0,365 4	0,354 7	0,100 1
15	*н*-Октан	0,484 5	0,434 6	0,432 9	0,419 8	0,100 2
16	*н*-Нонан	0,561 7	0,503 0	0,501 0	0,485 6	0,100 6
17	*н*-Декан	0,671 3	0,599 1	0,596 7	0,577 8	0,100 6
56	*н*-Ундекан	0,722 8	0,640 2	0,637 4	0,615 9	0,100 6
57	*н*-Додекан	0,856 7	0,761 5	0,758 3	0,733 5	0,100 6
58	*н*-Тридекан	0,912 9	0,806 1	0,802 6	0,774 8	0,100 6
59	*н*-Тетрадекан	1,013 5	0,894 0	0,890 0	0,858 9	0,100 6
60	*н*-Пентадекан	1,117 6	0,984 9	0,980 4	0,945 9	0,100 6
18	Этен	0,086 8	0,079 9	0,079 7	0,077 8	0,001 0
19	Пропен	0,138 1	0,126 7	0,126 3	0,123 2	0,001 6
20	1-Бутен	0,196 4	0,177 6	0,177 0	0,172 1	0,004 1
21	*цис*-2-Бутен	0,207 5	0,187 0	0,186 3	0,181 0	0,004 5
22	*транс*-2-Бутен	0,207 2	0,186 8	0,186 2	0,180 9	0,004 3
23	2-Метилпропен	0,196 6	0,177 7	0,177 0	0,172 1	0,003 7
24	1-Пентен	0,262 2	0,229 7	0,228 7	0,220 8	0,010 2
25	Пропадиен	0,141 7	0,131 3	0,131 0	0,128 2	0,002 5
26	1,2-Бутадиен	0,206 3	0,186 2	0,185 5	0,180 3	0,011 0
27	1,3-Бутадиен	0,199 3	0,173 9	0,173 1	0,167 3	0,003 8
28	Этин	0,093 6	0,083 6	0,083 3	0,080 8	0,002 4
29	Циклопентан	0,240 9	0,222 1	0,221 5	0,216 4	0,013 7
30	Метилциклопентан	0,281 7	0,261 2	0,260 5	0,254 8	0,026 2
31	Этилциклопентан	0,422 7	0,368 4	0,366 6	0,353 1	0,100 6
32	Циклогексан	0,293 9	0,268 6	0,267 7	0,261 0	0,032 5
33	Метилциклогексан	0,366 7	0,331 7	0,330 5	0,321 3	0,066 8
34	Этилциклогексан	0,527 5	0,454 7	0,452 4	0,434 5	0,100 6
35	Бензол	0,275 2	0,252 7	0,252 0	0,246 0	0,027 4
36	Толуол	0,372 6	0,335 9	0,334 7	0,325 1	0,100 2
37	Этилбензол	0,412 9	0,379 7	0,378 5	0,369 4	0,100 2
38	*о*-Ксилол	0,485 2	0,441 1	0,439 6	0,427 7	0,100 4
39	Метанол	0,580 6	0,446 4	0,442 3	0,411 7	0,023 3

Окончание таблицы 2

j	Компонент	Коэффициенты суммирования s_j при различных стандартных температурах измерений				$u(s_j)$
		0 °С	15 °С	15,55 °С	20 °С	
40	Метантиол	0,190 9	0,170 0	0,169 3	0,164 0	0,011 7
41	Водород	−0,01	−0,01	−0,01	−0,01	0,025 0
42	Вода	0,309 3	0,256 2	0,254 6	0,241 9	0,015 0
43	Сероводород	0,100 6	0,092 3	0,092 0	0,089 8	0,002 3
44	Аммиак	0,123 0	0,110 0	0,109 6	0,106 2	0,002 1
45	Цианистый водород	0,317 5	0,276 5	0,275 1	0,264 4	0,007 6
46	Моноксид углерода	0,025 8	0,021 7	0,021 5	0,020 3	0,001 0
47	Карбонилсульфид	0,121 1	0,111 4	0,111 0	0,108 4	0,005 4
48	Сероуглерод	0,218 2	0,195 8	0,195 1	0,189 4	0,009 8
49	Гелий	−0,01	−0,01	−0,01	−0,01	0,025 0
50	Неон	−0,01	−0,01	−0,01	−0,01	0,025 0
51	Аргон	0,030 7	0,027 3	0,027 2	0,026 2	0,001 0
52	Азот	0,021 4	0,017 0	0,016 9	0,015 6	0,001 0
53	Кислород	0,031 1	0,027 6	0,027 5	0,026 5	0,001 0
54	Диоксид углерода	0,082 1	0,075 2	0,074 9	0,073 0	0,002 0
55	Диоксид серы	0,157 9	0,140 6	0,140 0	0,135 6	0,003 5
Примечание — Значения s_j и $u(s_j)$, приведенные выше, относятся к давлению p_0, равному 101,325 кПа.						

Таблица 3 — Высшая молярная теплота сгорания для компонентов природного газа при различных стандартных температурах сгорания для идеального газа

j	Компонент	Высшая теплота сгорания $[(Hc)^\circ_G]_j\,(t_1)$, кДж · моль$^{-1}$, идеального газа при различных стандартных температурах					$u(Hc)$
		0 °С	15 °С	15,55 °С	20 °С	25 °С	
1	Метан	892,92	891,51	891,46	891,05	890,58	0,19
2	Этан	1 564,35	1 562,14	1 562,06	1 561,42	1 560,69	0,51
3	Пропан	2 224,03	2 221,10	2 220,99	2 220,13	2 219,17	0,51
4	*н*-Бутан	2 883,35	2 879,76	2 879,63	2 878,58	2 877,40	0,72
5	2-Метилпропан	2 874,21	2 870,58	2 870,45	2 869,39	2 868,20	0,72
6	*н*-Пентан	3 542,91	3 538,60	3 538,45	3 537,19	3 535,77	0,23
7	2-Метилбутан	3 536,01	3 531,68	3 531,52	3 530,25	3 528,83	0,23
8	2,2-Диметилпропан	3 521,75	3 517,44	3 517,28	3 516,02	3 514,61	0,25
9	*н*-Гексан	4 203,24	4 198,24	4 198,06	4 196,60	4 194,95	0,32
10	2-Метилпентан	4 195,64	4 190,62	4 190,44	4 188,97	4 187,32	0,53
11	3-Метилпентан	4 198,27	4 193,22	4 193,04	4 191,56	4 189,90	0,53
12	2,2-Диметилбутан	4 185,86	4 180,83	4 180,65	4 179,17	4 177,52	0,48
13	2,3-Диметилбутан	4 193,68	4 188,61	4 188,43	4 186,94	4 185,28	0,46
14	*н*-Гептан	4 862,88	4 857,18	4 856,98	4 855,31	4 853,43	0,67
15	*н*-Октан	5 522,41	5 516,01	5 515,78	5 513,90	5 511,80	0,76
16	*н*-Нонан	6 182,92	6 175,82	6 175,56	6 173,48	6 171,15	0,81
17	*н*-Декан	6 842,69	6 834,90	6 834,62	6 832,33	6 829,77	0,87
56	*н* -Ундекан	7 502,22	7 493,73	7 493,42	7 490,93	7 488,14	1,54
57	*н* -Додекан	8 162,43	8 153,24	8 152,91	8 150,21	8 147,19	1,13
58	*н* -Тридекан	8 821,88	8 811,99	8 811,63	8 808,73	8 805,48	1,21

Окончание таблицы 3

j	Компонент	Высшая теплота сгорания $[(Hc)^\circ_G]_j$ (t_1), кДж · моль$^{-1}$, идеального газа при различных стандартных температурах					*u*(*Hc*)
		0 °C	15 °C	15,55 °C	20 °C	25 °C	
59	*н*-Тетрадекан	9 481,71	9 471,12	9 470,73	9 467,63	9 464,15	1,32
60	*н*-пентадекан	10 141,65	10 130,23	10 129,82	10 126,52	10 122,82	1,44
18	Этен	1 413,55	1 412,12	1 412,07	1 411,65	1 411,18	0,21
19	Пропен	2 061,57	2 059,43	2 059,35	2 058,73	2 058,02	0,34
20	1-Бутен	2 721,57	2 718,71	2 718,60	2 717,76	2 716,82	0,39
21	*цис*-2-Бутен	2 714,88	2 711,94	2 711,83	2 710,97	2 710,00	0,50
22	*транс*-2-Бутен	2 711,09	2 708,26	2 708,16	2 707,33	2 706,40	0,47
23	2-Метилпропен	2 707,88	2 702,06	2 701,96	2 701,13	2 700,20	0,42
24	1-Пентен	3 381,32	3 377,76	3 377,63	3 376,59	3 375,42	0,73
25	Пропадиен	1 945,26	1 943,97	1 943,92	1 943,54	1 943,11	0,60
26	1,2-Бутадиен	2 597,15	2 595,12	2 595,05	2 594,46	2 593,79	0,40
27	1,3-Бутадиен	2 544,14	2 542,11	2 542,03	2 541,44	2 540,77	0,41
28	Этин	1 301,86	1 301,37	1 301,35	1 301,21	1 301,05	0,32
29	Циклопентан	3 326,14	3 322,19	3 322,05	3 320,89	3 319,59	0,36
30	Метилциклопентан	3 977,05	3 972,46	3 972,29	3 970,95	3 969,44	0,56
31	Этилциклопентан	4 637,20	4 631,93	4 631,74	4 630,20	4 628,47	0,71
32	Циклогексан	3 960,68	3 956,02	3 955,85	3 954,49	3 952,96	0,32
33	Метилциклогексан	4 609,33	4 604,08	4 603,89	4 602,36	4 600,64	0,71
34	Этилциклогексан	5 272,76	5 266,90	5 266,69	5 264,97	5 263,05	0,95
35	Бензол	3 305,12	3 302,90	3 302,81	3 302,16	3 301,43	0,27
36	Толуол	3 952,77	3 949,83	3 949,72	3 948,86	3 947,89	0,51
37	Этилбензол	4 613,16	4 609,54	4 609,40	4 608,34	4 607,15	0,66
38	*о*-Ксилол	4 602,18	4 598,64	4 598,52	4 597,48	4 596,31	0,76
39	Метанол	766,60	765,09	765,03	764,59	764,09	0,13
40	Метантиол	1 241,64	1 240,28	1 240,23	1 239,84	1 239,39	0,32
41	Водород	286,64	286,15	286,13	285,99	285,83	0,02
42	Вода (см. примечание 2)	45,064	44,431	44,408	44,222	44,013	0,004
43	Сероводород	562,93	562,38	562,36	562,19	562,01	0,23
44	Аммиак	384,57	383,51	383,47	383,16	382,81	0,18
45	Цианистый водород	671,92	671,67	671,66	671,58	671,50	1,26
46	Моноксид углерода	282,80	282,91	282,91	282,95	282,98	0,06
47	Карбонилсульфид	548,01	548,14	548,15	548,19	548,23	0,24
48	Сероуглерод	1 104,05	1 104,32	1 104,33	1 104,40	1 104,49	0,43

Примечания

1 Все значения $[(Hc)^\circ_G]_j$ (t_1) для t_1 = 25 °C взяты из [*1*], за исключением метана (*j* = 1), воды (см. примечание 2) и *н*-алканов C_{11} — C_{15}. Значения для t_1 = 20 °C, 15,55 °C, 15 °C и 0 °C получены путем пересчета из соответствующих значений при 25 °C.

2 Не равная нулю теплота сгорания воды (*j* = 42) выведена формально из определения высшей теплоты сгорания при условии конденсации до жидкого состояния всего водяного пара в продуктах горения. Таким образом, любой присутствующий водяной пар в газе вносит свой вклад скрытой теплоты испарения в высшую теплоту сгорания смеси. Значения стандартной энтальпии испарения воды приведены в таблице А.5 приложения А.

Приложение А
(обязательное)

Значения вспомогательных констант

А.1 Газовая постоянная

Значение и стандартная неопределенность молярной газовой постоянной R в соответствии с действующей рекомендацией [*2*] приведены в таблице А.1.

Таблица А.1 — Универсальная газовая постоянная

Универсальная газовая постоянная R, Дж · моль$^{-1}$ · К$^{-1}$	Стандартная неопределенность $u(R)$ Дж · моль$^{-1}$ · К$^{-1}$
8,314 462 1	0,000 007 5

А.2 Атомные массы элементов

Значение атомной массы в кг · кмоль$^{-1}$ каждого из элементов: углерод, водород, азот, кислород и сера необходимо для вычислений по формуле (*26*). Эти значения в соответствии с рекомендацией [*3*] приведены в таблице А.2.

Таблица А.2 — Атомные массы элементов

Элемент	Атомная масса А, кг · кмоль$^{-1}$	Стандартная неопределенность $u(A)$, кг · кмоль$^{-1}$
углерод С	12,010 7	0,000 4
водород Н	1,007 94	0,000 035
азот N	14,006 7	0,000 1
кислород О	15,999 4	0,000 15
сера S	32,065	0,002 5
гелий He	4,002 602	0,000 001
неон Ne	20,179 7	0,000 3
аргон Ar	39,948	0,000 5

А.3 Свойства сухого воздуха

Значение молярной массы сухого воздуха фиксированного стандартного состава, округленное до пятого знака после запятой, приведено в таблице А.3 [*4*].

Таблица А.3 — Молярная масса сухого воздуха

Молярная масса M_{air}, кг · кмоль$^{-1}$	Стандартная неопределенность $u(M_{air})$, кг · кмоль$^{-1}$
28,965 46	0,000 17

Указанная стандартная неопределенность выведена исключительно из известных неопределенностей значений молярной массы составляющих компонентов сухого воздуха. Допуск на неопределенность по составу не сделан, т. е. состав воздуха взят для настоящего стандарта как точный.

Значения коэффициента сжимаемости сухого воздуха стандартного состава при различных стандартных условиях измерений приведены в таблице А.4.

Таблица А.4 — Коэффициент сжимаемости сухого воздуха при различных стандартных условиях

Стандартные условия	Коэффициент сжимаемости Z_{air}	Стандартная неопределенность $u(Z_{air})$
0 °С, 101,325 кПа	0,999 419	0,000 015
15 °С,101,325 кПа	0,999 595	0,000 015
15,55 °С, 101,325 кПа	0,999 601	0,000 015
20 °С, 101,325 кПа	0,999 645	0,000 015

Каждое из этих значений вычислено в соответствии с [*5*] и [*6*]. Для трех самых высоких температур значения согласованы с недавними данными по составу CIPM-2007 [*4*], расхождение не превышает 2—3 единиц на миллион, но этот состав недостоверен при 0 °С. Значения стандартной неопределенности взяты непосредственно из [*4*].

А.4 Стандартная энтальпия испарения воды

Значения стандартной молярной энтальпии испарения воды требуются для каждого из пяти обычно используемых стандартных условий сгорания, чтобы облегчить вычисления разности между высшей и низшей (молярной) теплотой сгорания идеального газа для каждого компонента. Значения, приведенные в таблице А.5, были вычислены с использованием справочных материалов [*7*] и [*8*].

Таблица А.5 — Стандартная энтальпия испарения воды

Температура, °С	Энтальпия испарения $L°$, кДж · моль$^{-1}$	Стандартная неопределенность $u(L°)$, кДж · моль$^{-1}$
0	45,064	0,004
15	44,431	0,004
15,55 (60 °F)	44,408	0,004
20	44,222	0,004
25	44,013	0,004

Приложение В
(обязательное)

Формулы вычисления неопределенности

В.1 Общие положения

Формулы, приведенные в данном приложении, должны использоваться в вычислениях неопределенности для тех показателей, которые можно вычислить в соответствии с настоящим стандартом. Поскольку характеристики и связанные с ними неопределенности для идеального газа вряд ли потребуются в качестве конечного результата, в данном приложении приведены формулы для реального газа.

В том случае, если потребуется неопределенность, связанная с показателем идеального газа, ее можно получить, подставив в соответствующую формулу $s = 0$ и $u(s) = 0$.

В.2 Молярная масса

$$u^2(M) = \left(\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} M_i \cdot M_j \cdot u(x_i) \cdot u(x_j) \cdot r(x_i, x_j)\right) + \left(\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} x_i \cdot x_j \cdot u(M_i) \cdot u(M_j) \cdot r(M_i, M_j)\right). \quad (В.1)$$

В.3 Коэффициент суммирования

$$u^2(s) = \left(\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} s_i \cdot u(x_i) \cdot r(x_i, x_j) \cdot s_j \cdot u(x_j)\right) + \sum_{i=1}^{N} x_i^2 \cdot u^2(s_i). \quad (В.2)$$

В.4 Коэффициент сжимаемости

$$u^2(Z) = 4 \cdot s^2 \cdot \left(\left(\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} s_i \cdot u(x_i) \cdot r(x_i, x_j) \cdot s_j \cdot u(x_j)\right) + \sum_{i=1}^{N} x_i^2 \cdot u^2(s_i)\right). \quad (В.3)$$

В.5 Высшая молярная теплота сгорания

$$u^2(Hc)_G) = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\left[(Hc)_G^{\circ}\right]_i \cdot u(x_i) \cdot r(x_i, x_j) \cdot \left[(Hc)_G^{\circ}\right]_j \cdot u(x_j) + \sum_{i=1}^{N} x_i^2 \cdot u^2 \cdot \left(\left[(Hc)_G^{\circ}\right]_j\right). \quad (В.4)$$

В.6 Высшая массовая теплота сгорания

$$\left(\frac{u(Hm)_G}{(Hm)_G}\right)^2 = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\left(\frac{\left[(Hc)_G^{\circ}\right]_i}{(Hc)_G} - \frac{M_i}{M}\right) \cdot u(x_i) \cdot r(x_i, x_j) \cdot \left(\frac{\left[(Hc)_G^{\circ}\right]_j}{(Hc)_G} - \frac{M_j}{M}\right) \cdot u(x_j) + \frac{\sum_{i=1}^{N} x_i^2 \cdot u^2\left(\left[(Hc)_G^{\circ}\right]_i\right)}{(Hc)_G^2} + \frac{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} x_i \cdot u(M_i) \cdot r(M_i, M_j) \cdot x_j \cdot u(M_j)}{M^2}. \quad (В.5)$$

В.7 Высшая объемная теплота сгорания

$$\left(\frac{u(Hv)_G}{(Hv)_G}\right)^2 = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\left(\frac{\left[(Hc)_G^{\circ}\right]_i}{(Hc)_G} + \frac{2 \cdot s_i \cdot s}{Z}\right) \cdot u(x_i) \cdot r(x_i, x_j) \cdot \left(\frac{\left[(Hc)_G^{\circ}\right]_j}{(Hc)_G} + \frac{2 \cdot s_j \cdot s}{Z}\right) \cdot u(x_j) + \frac{\sum_{i=1}^{N} x_i^2 \cdot u^2\left(\left[(Hc)_G^{\circ}\right]_i\right)}{(Hc)_G^2} + \frac{4 \cdot s^2 \cdot \sum_{i=1}^{N} x_i^2 \cdot u^2(s_i)}{Z^2} + \left(\frac{u(R)}{R}\right)^2, \quad (В.6)$$

где

$$s = \left((1 - Z) \cdot \frac{p_2}{p_0}\right)^{1/2}. \quad (В.7)$$

В.8 Низшая молярная теплота сгорания

$$u^2\left((Hc)_N\right)=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\left(\left[(Hc)_G^{\circ}\right]_i-\frac{L^{\circ}}{2}\cdot b_i\right)\cdot u(x_i)\cdot r(x_i,x_j)\cdot\left(\left[(Hc)_G^{\circ}\right]_j-\frac{L^{\circ}}{2}\cdot b_j\right)\cdot u(x_j)+$$

$$+\sum_{i=1}^{N}x_i^2\cdot u^2\left(\left[(Hc)_G^{\circ}\right]_i\right)+\left(\frac{\sum_{i=1}^{N}x_i\cdot b_i}{2}\right)^2\cdot u^2\left(L^{\circ}\right). \qquad (В.8)$$

В.9 Низшая массовая теплота сгорания

$$\left(\frac{u(Hm)_N}{(Hm)_N}\right)^2=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\left(\frac{\left(\left[(Hc)_G^{\circ}\right]_i-\frac{L^{\circ}}{2}\cdot b_i\right)}{(Hc)_N}-\frac{M_i}{M}\right)\cdot u(x_i)\cdot r(x_i,x_j)\cdot\left(\frac{\left(\left[(Hc)_G^{\circ}\right]_j-\frac{L^{\circ}}{2}\cdot b_j\right)}{(Hc)_N}-\frac{M_j}{M}\right)\cdot u(x_j)+$$

$$+\frac{\sum_{i=1}^{N}x_i^2\cdot u^2\left(\left[(Hc)_G^{\circ}\right]_i\right)}{(Hc)_N^2}+\frac{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}x_i\cdot u(M_i)\cdot r(M_i,M_j)\cdot x_j\cdot u\left(M_j\right)}{M^2}+\left(\frac{\sum_{i=1}^{N}x_i\cdot b_i}{2\cdot(Hc)_N}\right)^2\cdot u^2(L^{\circ}). \qquad (В.9)$$

В.10 Низшая объемная теплота сгорания

$$\left(\frac{u(Hv)_N}{(Hv)_N}\right)^2=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\left(\frac{\left(\left[(Hc)_G^{\circ}\right]_i-\frac{L^{\circ}}{2}\cdot b_i\right)}{(Hc)_N}+\frac{2\cdot s_i\cdot s}{Z}\right)\cdot u(x_i)\cdot r(x_i,x_j)\cdot\left(\frac{\left(\left[(Hc)_G^{\circ}\right]_j-\frac{L^{\circ}}{2}\cdot b_j\right)}{(Hc)_N}+\frac{2\cdot s_j\cdot s}{Z}\right)\cdot u(x_j)+$$

$$+\frac{\sum_{i=1}^{N}x_i^2\cdot u^2\left(\left[(Hc)_G^{\circ}\right]_i\right)}{(Hc)_N^2}+\frac{4\cdot s^2\cdot\sum_{i=1}^{N}x_i^2\cdot u^2(s_i)}{Z^2}+\left(\frac{u(R)}{R}\right)^2+\left(\frac{\sum_{i=1}^{N}x_i\cdot b_i}{2\cdot(Hc)_N}\right)^2\cdot u^2(L^{\circ}). \qquad (В.10)$$

В.11 Плотность

$$\left(\frac{u(D)}{D}\right)^2=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\left(\frac{M_i}{M}+\frac{2\cdot s_i\cdot s}{Z}\right)\cdot u(x_i)\cdot r(x_i,x_j)\cdot u(x_j)\cdot\left(\frac{M_j}{M}+\frac{2\cdot s_j\cdot s}{Z}\right)+$$

$$+\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\frac{x_i\cdot u(M_i)\cdot r(M_i,M_j)\cdot u(M_j)\cdot x_j}{M^2}+\frac{4\cdot s^2\cdot\sum_{i=1}^{N}x_i^2\cdot u^2(s_i)}{Z^2}+\left(\frac{u(R)}{R}\right)^2. \qquad (В.11)$$

В.12 Относительная плотность

$$\left(\frac{u(G)}{G}\right)^2=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\left(\frac{M_i}{M}+\frac{2\cdot s_i\cdot s}{Z}\right)\cdot u(x_i)\cdot r(x_i,x_j)\cdot\left(\frac{M_j}{M}+\frac{2\cdot s_j\cdot s}{Z}\right)\cdot u(x_j)+\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\frac{x_i\cdot u(M_i)\cdot r(M_i,M_j)\cdot u(M_j)\cdot x_j}{M^2}+$$

$$+\frac{4\cdot s^2\cdot\sum_{i=1}^{N}x_i^2\cdot u^2(s_i)}{Z^2}+\left(\frac{u(M_{\text{air}})}{M_{\text{air}}}\right)^2+\left(\frac{u(Z_{\text{air}})}{Z_{\text{air}}}\right)^2. \qquad (В.12)$$

B.13 Число Воббе высшее

$$\left(\frac{u(W_G)}{W_G}\right)^2 = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\left(\frac{\left[(Hc)_G^{\circ}\right]_i}{(Hc)_G} + \frac{s_i \cdot s}{Z} - \frac{M_i}{2 \cdot M}\right) \cdot u(x_i) \cdot r(x_i, x_j) \cdot u(x_j) \cdot \left(\frac{\left[(Hc)_G^{\circ}\right]_j}{(Hc)_G} + \frac{s_j \cdot s}{Z} - \frac{M_j}{2 \cdot M}\right) + \frac{\sum_{i=1}^{N} x_i^2 \cdot u^2\left[(Hc)_G^{\circ}\right]_i}{(Hc)_G^2} + \frac{s^2 \cdot \sum_{i=1}^{N} x_i^2 \cdot u^2(s_i)}{Z^2} + \frac{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} x_i \cdot u(M_i) \cdot r(M_i, M_j) \cdot u(M_j) \cdot x_j}{4 \cdot M^2} + \left(\frac{u(R)}{R}\right)^2 + \left(\frac{u(M_{air})}{2 \cdot M_{air}}\right)^2 + \left(\frac{u(Z_{air})}{2 \cdot Z_{air}}\right)^2. \quad \text{(B.13)}$$

B.14 Число Воббе низшее

$$\left(\frac{u(W_N)}{W_N}\right)^2 = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\left(\frac{\left(\left[(Hc)_G^{\circ}\right]_i - \frac{L^{\circ}}{2} \cdot b_i\right)}{(Hc)_N} + \frac{s_i \cdot s}{Z} - \frac{M_i}{2 \cdot M}\right) \cdot u(x_i) \cdot r(x_i, x_j) \cdot u(x_j) \cdot \left(\frac{\left(\left[(Hc)_G^{\circ}\right]_j - \frac{L^{\circ}}{2} \cdot b_j\right)}{(Hc)_N} + \frac{s_j \cdot s}{Z} - \frac{M_j}{2 \cdot M}\right) + \frac{\sum_{i=1}^{N} x_i^2 \cdot u^2\left[(Hc)_G^{\circ}\right]_i}{(Hc)_N^2} + \frac{s^2 \cdot \sum_{i=1}^{N} x_i^2 \cdot u^2(s_i)}{Z^2} + \frac{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=2}^{N} x_i \cdot u(M_i) \cdot r(M_i, M_j) \cdot u(M_j) \cdot x_j}{4 \cdot M^2} + \left(\frac{u(R)}{R}\right)^2 + \left(\frac{u(M_{air})}{2 \cdot M_{air}}\right)^2 + \left(\frac{u(Z_{air})}{2 \cdot Z_{air}}\right)^2 + \left(\frac{\sum_{i=1}^{N} x_i \cdot b_i}{2(Hc)_N}\right)^2 \cdot u^2(L^{\circ}). \quad \text{(B.14)}$$

Приложение С
(справочное)

Коэффициенты пересчета единиц величин

С.1 Общие положения

В некоторых известных задачах значения величин, рассматриваемых в настоящем стандарте, требуются в единицах измерения, отличающихся от Международной системы единиц СИ, использующихся в основном тексте. В таких случаях для преобразования величин из единиц системы СИ, приведенных в основном тексте, в те же самые величины в единицах требующейся системы измерения необходимо использовать числовые коэффициенты.

Чтобы получить значение величины в другой системе единиц из значения величины в единицах СИ, это значение делят на коэффициент пересчета, приведенный в таблицах, используя обычные правила округления, и представляют результат с указанной точностью.

Коэффициенты пересчета, приведенные обычным шрифтом, являются приближенными, но достаточно точными для целей настоящего стандарта, когда значения в единицах СИ, полученные методом для особых случаев (11.5.4), нужно преобразовать в единицы другой системы (не СИ) и представить с указанной точностью после округления. Коэффициенты пересчета, приведенные курсивом, являются точными.

Коэффициенты пересчета для показателей, вычисленных на основе объема, применяются только, если показатель, выраженный в единицах СИ и в других единицах, относится к одним и тем же давлению и температуре.

С.2 Молярная теплота сгорания

Таблица С.1

Единица системы СИ	Единица другой системы	Коэффициент пересчета	Точность округления
кДж · моль$^{-1}$	БТЕ$_М$ · фунт-моль$^{-1}$	*0,002 326*	1

С.3 Массовая теплота сгорания

Таблица С.2

Единица системы СИ	Единица другой системы	Коэффициент пересчета	Точность округления
МДж · кг$^{-1}$	БТЕ$_М$ · фунт$^{-1}$	*0,002 326*	1

С.4 Объемная теплота сгорания и числа Воббе

Таблица С.3

Единица системы СИ	Единица другой системы	Коэффициент пересчета	Точность округления
МДж · м$^{-3}$	кВтч · м$^{-3}$	3,6	0,001
	БТЕ$_М$ · фут$^{-3}$	0,037 258 9	0,1
	ккал/м$^{-3}$	0,004 186 8	0,000 000 1
кДж · м$^{-3}$	*ккал/м$^{-3}$*	4,186 8	0,000 1

С.5 Плотность

Таблица С.4

Единица системы СИ	Единица другой системы	Коэффициент пересчета	Точность округления
кг · м$^{-3}$	фунт·фут$^{-3}$	16,018 46	0,000 01

С.6 Содержание паров воды

Таблица С.5

Единица системы СИ	*Единица другой системы*	*Коэффициент пересчета (для идеального газа)*	*Точность округления*
г · м$^{-3}$ (при 20 °С и 101,325 кПа)	*Молярная доля, %*	*7,489*	*0,001*

Приложение D
(справочное)

Примеры вычислений

D.1 Общие положения

В данном приложении даны примеры вычислений показателей, включенных в настоящий стандарт. Эти примеры обеспечивают подтвержденные валидацией результаты, которые можно использовать для верификации выбранных методов. Чтобы облегчить верификацию того или иного метода и обеспечить отсутствие погрешностей округления, которые искажают конечный результат, оставляют знаков после запятой на каждом промежуточном этапе больше, чем строго требуется.

Кроме того, в качестве необязательного приложения к настоящему стандарту можно загрузить крупноформатную таблицу Excel® ISO6976examples.xlsx, по которой можно проверить примеры более детально, см. ссылку

gost.e-ecolog.ru

D.2 Пример 1. Простая смесь из пяти компонентов

D.2.1 Общие положения

В данном примере вычислений результаты промежуточных этапов расчетов ограниченного набора показателей представлены для простой газовой смеси из пяти компонентов. Смесь по необходимости упрощена, чтобы ограничить размер матриц, содержащих значения элементов $r(x_i,x_j)$ и $r(M_i,M_j)$. Показатели вычисляют при стандартных условиях сгорания 15 °С и 101,325 кПа и стандартных условиях измерений 15 °С и 101,325 кПа.

D.2.2 Анализ состава

В отчете по измерению молярной доли компонентов в пробе природного газа представлена следующая информация для нормализованного состава (округленного до шестого знака после запятой) и связанных с ним неопределенностей.

Компонент	x_i	$u(x_i)$
Метан	0,933 212	0,000 346
Этан	0,025 656	0,000 243
Пропан	0,015 368	0,000 148
Азот	0,010 350	0,000 195
Диоксид углерода	0,015 414	0,000 111
Сумма	1,000 00	—

D.2.3 Вычисление молярной массы

Компонент	x_i	M_i	$x_i \cdot M_i$
Метан	0,933 212	16,042 46	14,971 016 2
Этан	0,025 656	30,069 04	0,771 451 3
Пропан	0,015 368	44,095 62	0,677 661 5
Азот	0,010 350	28,013 40	0,289 938 7
Диоксид углерода	0,015 414	44,009 50	0,678 362 4
Сумма	1,000 00	—	17,388 430 1

По формуле (5) — молярная масса M = 17,388 · 430 кг · моль$^{-1}$.

D.2.4 Вычисление молярного объема реального газа

Компонент	x_i	s_i	$x_i \cdot s_i$
Метан	0,933 212	0,044 52	0,041 546 6
Этан	0,025 656	0,091 90	0,002 357 8
Пропан	0,015 368	0,134 40	0,002 065 5
Азот	0,010 350	0,017 00	0,000 176 0
Диоксид углерода	0,015 414	0,075 20	0,001 159 1
Сумма	1,000 00		0,047 305 0

p_2 = 101,325 кПа;
p_0 = 101,325 кПа;
по формуле (1) — коэффициент сжимаемости Z = 0,997 762 24;
по формуле (В.7) — коэффициент суммирования s = 0,047 305; T_2 = 288,15 К;
из А.1 — газовая постоянная R = 8,314 462 1 Дж · моль$^{-1}$ · К$^{-1}$;
по формуле (11) — молярный объем V = 0,023 591 917 м^3 · моль$^{-1}$.

D.2.5 Вычисление высшей молярной теплоты сгорания

Компонент	x_i	$((Hc)^\circ_G)_i$	$x_i \cdot ((Hc)^\circ_G)_i$
Метан	0,933 212	891,51	831,967 830 1
Этан	0,025 656	1 562,14	40,078 263 8
Пропан	0,015 368	2 221,10	34,133 864 8
Азот	0,010 350	0,00	0,000
Диоксид углерода	0,015 414	0,00	0,000
Сумма	1,000 00	—	906,179 958 8

По формуле (2) — высшая теплота сгорания $(Hc)_G$ = 906,179 959 кДж · моль$^{-1}$.

D.2.6 Вычисление неопределенности высшей молярной теплоты сгорания

Компонент	$((Hc)^\circ_G)_i$	$u(x_i)$	$((Hc)^\circ_G)_i \cdot u(x_i)$	$[(Hc)^\circ_G)_i \cdot u(x_i)]^2$
Метан	891,51	0,000 346	0,308 462 46	0,095 149 089
Этан	1 562,14	0,000 243	0,379 600 02	0,144 096 175
Пропан	2 221,10	0,000 148	0,328 772 80	0,108 058 679
Азот	0,00	0,000 195	0,000 000 00	0,000 000 00
Диоксид углерода	0,00	0,000 111	0,000 000 00	0,000 000 00
Сумма	—	—	—	0,347 303 943

Компонент	$r(x_i, x_j)$				
	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	N_2	CO_2
CH_4	1	0	0	0	0
C_2H_6	0	1	0	0	0
C_3H_8	0	0	1	0	0
N_2	0	0	0	1	0
CO_2	0	0	0	0	1

Компонент	x_i	x_i^2	$u((Hc)^\circ_G)_i$	$u^2((Hc)^\circ_G)_i$	$x_i^2 \cdot u^2((Hc)^\circ_G)_i$
Метан	0,933 212	0,870 884 637	0,19	0,036 1	0,031 438 935
Этан	0,025 656	0,000 658 230	0,51	0,260 1	0,000 171 206
Пропан	0,015 368	0,000 236 175	0,51	0,260 1	0,000 061 429
Азот	0,010 350	0,000 107 123	0,00	0,000 0	0,000 000 000
Диоксид углерода	0,015 414	0,000 237 591	0,00	0,000 0	0,000 000 000
Сумма	1,000 00	—	—	—	0,031 671 570

По формуле (В.4) — $u^2((Hc)_G)$ = 0,347 303 943 + 0,031 671 570 = 0,378 975 513;
$u((Hc)_G)$ = 0,615 609 872 кДж · моль$^{-1}$;
$U((Hc)_G)$ = 1,2 кДж · моль$^{-1}$ (используют коэффициент охвата k = 2 и выражают расширенную неопределенность с точностью до двух значащих цифр).

D.2.7 Вычисление высшей массовой теплоты сгорания

Из D.2.5 — $(Hc)_G$ = 906,179 959 кДж · моль$^{-1}$;
из D.2.3 — M = 17,388 430 кг · кмоль$^{-1}$;
по формуле (4) — высшая массовая теплота сгорания $(Hm)_G$ = 52,113 961 МДж · кг$^{-1}$.

D.2.8 Вычисление неопределенности высшей массовой теплоты сгорания

Компонент	$((Hc)^{\circ}_{G})_i/(Hc)_G$	M_i/M	$[(Hc)^{\circ}_{G})_i/(Hc)_G] - [M_i/M]$	$u(x_i)$	{значение из столбца 4}· $u(x_i)$	{значение из столбца 6}$^2 \cdot 10^8$
Метан	0,983 811 2	0,922 593 9	0,061 217 3	0,000 346	0,000 021 2	0,044 864
Этан	1,723 873 9	1,729 255 6	–0,005 381 7	0,000 243	–0,000 001 3	0,000 171
Пропан	2,451 058 4	2,535 917 3	–0,084 858 9	0,000 148	–0,000 012 6	0,015 773
Азот	0,000 000 0	1,611 036 8	–1,611 036 8	0,000 195	–0,000 314 2	9,869 159
Диоксид углерода	0,000 000 0	2,53 964 6	–2,530 964 6	0,000 111	–0,000280 9	7,892 564
Сумма	—	—	—	—	—	17,822 531

Примечание — Предполагается, что корреляционная матрица $r(x_i, x_j)$ такая же, как в D.2.6.

Компонент	x_i	x_i^2	$u((Hc)^{\circ}_{G})_i$	$u^2((Hc)^{\circ}_{G})_i$	$x_i^2 \cdot u^2((Hc)^{\circ}_{G})_i$	$x_i^2 \cdot u^2((Hc)^{\circ}_{G})_i/((Hc)_G)^2 \cdot 10^8$
Метан	0,933 212	0,870 884 637	0,19	0,036 1	0,031 438 935	3,828 591
Этан	0,025 656	0,000 658 230	0,51	0,260 1	0,000 171 206	0,020 849
Пропан	0,015 368	0,000 236 275	0,51	0,260 1	0,000 061 429	0,007 481
Азот	0,010 350	0,000 107 123	0,00	0,000 0	0,000 000 000	0,000 000
Диоксид углерода	0,015 414	0,000 237 591	0,00	0,000 0	0,000 000 000	0,000 000
Сумма	1,000 00	—	—	—	0,031 671 570	3,856 921

Компонент	$r(M_i, M_j)$.				
	Метан	Этан	Пропан	Азот	Диоксид углерода
Метан	1,000 000 000 000 0	0,996 804 383 768 0	0,994 233 563 614 8	0,000 000 000 000 0	0,755 086 685 092 8
Этан	0,996 804 383 768 0	1,000 000 000 000 0	0,999 622 547 547 1	0,000 000 000 000 0	0,773 784 772 303 5
Пропан	0,994 233 563 614 8	0,999 622 547 547 1	1,000 000 000 000 0	0,000 000 000 000 0	0,779 072 967 793 4
Азот	0,000 000 000 000 0	0,000 000 000 000 0	0,000 000 000 000 0	1,000 000 000 000 0	0,000 000 000 000 0
Диоксид углерода	0,755 086 685 092 8	0,773 784 772 303 5	0,779 072 967 793 4	0,000 000 000 000 0	1,000 000 000 000 0

Компонент	x_i	$u(M_i)$	$x_i \cdot u(M_i)$	$[x_i \cdot u(M_i) \cdot r(M_i, M_j) \cdot x_j \cdot u(M_j)]/M^2$
Метан	0,933 212	0,000 423 79	0,000 395 5	—
Этан	0,025 656	0,000 827 10	0,000 021 2	
Пропан	0,015 368	0,001 232 23	0,000 018 9	
Азот	0,010 350	0,000 200 00	0,000 002 1	
Диоксид углерода	0,015 414	0,000 500 00	0,000 007 7	
Сумма	1,000 00	—	—	$0,064\,425 \cdot 10^{-8}$

По формуле (B.5) — $[u(Hm)_G)/(Hm)_G]^2 = [17,822\,531 + 3,856\,921 + 0,064\,425] \cdot 10^{-8} = 21,743\,877 \cdot 10^{-8}$;
$u(Hm)_G = [21,743\,877 \cdot 10^{-8} \cdot (52,113\,961)^2]^{1/2} = 0,024\,301$ МДж · кг$^{-1}$;
$U(Hm)_G = 0,049$ МДж · кг$^{-1}$ (используют коэффициент охвата 2 и выражают расширенную неопределенность с точностью до двух значащих цифр).

D.2.9 Вычисление высшей объемной теплоты сгорания реального газа

Из D.2.5 — $(Hc)_G = 906,179\,959$ кДж · моль$^{-1}$;
из D.2.4 — $V = 0,023\,591\,917$ м^3 · моль$^{-1}$;
по формуле (10) — $(H_V)_G = 38,410\,611$ МДж · м$^{-3}$.

D.2.10 Вычисление неопределенности высшей объемной теплоты сгорания

Компонент	$((Hc)^{\circ}_{G})_i/(Hc)_G$	$2 \cdot s_i \cdot s/Z$	$[(Hc)^{\circ}_{G})_i/(Hc)_G] + [2 \cdot s_i \cdot s/Z]$	$u(x_i)$	$\{[(Hc)^{\circ}_{G})_i/(Hc)_G] + [2 \cdot s_i \cdot s/Z] \cdot u(x_i)$	{значение из столбца 6}$^2 \cdot 10^8$
Метан	0,983 811 2	0,004 221 5	0,988 032 7	0,000 346	0,000 341 859	11,686 779
Этан	1,723 873 9	0,008 714 2	1,732 588 1	0,000 243	0,000 421 019	17,725 692
Пропан	2,451 058 4	0,012 744 1	2,463 802 5	0,000 148	0,000 364 643	13,296 435
Азот	0,000 000 0	0,001 612 0	0,001 612 0	0,000 195	0,000 000 314	0,000 010
Диоксид углерода	0,000 000 0	0,007 130 6	0,007 130 6	0,000 111	0.000 000 791	0,000 063
Сумма	—	—	—	—	—	42,708 979

Примечание — Предполагают, что корреляционная матрица $r(x_i, x_j)$ такая же, как в D.2.6.

Компонент	x_i	x_i^2	$u((Hc)^{\circ}_{G})_i$	$u^2((Hc)^{\circ}_{G})_i$	$x_i^2 \cdot u^2((Hc)^{\circ}_{G})_i$	$x_i^2 \cdot u^2((Hc)^{\circ}_{G})_i/((Hc)_G)^2 \cdot 10^8$
Метан	0,933 212	0,870 884 637	0,19	0,036 1	0,031 438 935	3,828 591
Этан	0,025 656	0,000 658 230	0,51	0,260 1	0,000 171 206	0,020 849
Пропан	0,015 368	0,000 236 275	0,51	0,260 1	0,000 061 429	0,007 481
Азот	0,010 350	0,000 107 123	0,00	0,000 0	0,000 000 000	0,000 000
Диоксид углерода	0,015 414	0,000 237 591	0,00	0,000 0	0,000 000 000	0,000 000
Сумма	1,000 00	—	—	—	0,031 671 570	3,856 921

Компонент	x_i	$u(s_i)$	$x_i^2 \cdot u^2(s_i) \cdot 10^8$	$4 \cdot s^2 \cdot x_i^2 \cdot u^2(s_i)/Z^2 \cdot 10^8$
Метан	0,933 212	0,000 5	21,772 212	0,195 758
Этан	0,025 656	0,001 1	0,079 646	0,000 716
Пропан	0,015 368	0,001 6	0,060 461	0,000 544
Азот	0,010 350	0,001 0	0,010 712	0,000 096
Диоксид углерода	0,015 414	0,002 0	0,095 037	0,000 854
Сумма	1,000 00	—	—	0,197 968

Из А.1 — $[u(R)/R]^2 = 0{,}000\,081\,4 \cdot 10^{-8}$;

по формуле (В.6) — $[u(Hv)_G/Hv]^2 = [42{,}708\,979 + 3{,}856\,921 + 0{,}197\,968 + 0{,}000\,081] \cdot 10^{-8} = 46{,}763\,949 \cdot 10^{-8}$;

$u(Hv)_G = [46{,}763\,949 \cdot 10^{-8} \cdot (38{,}410\,611)^2]^{1/2} = 0{,}026\,267$ МДж · м$^{-3}$;

$U(Hv)_G = 0{,}053$ МДж · м$^{-3}$ (используют коэффициент охвата 2 и выражают расширенную неопределенность с точностью до двух значащих цифр).

D.3 Пример 2. Простая смесь, содержащая водяной пар

D.3.1 Общие положения

В данном примере выполняются те же процедуры и используется та же форма выражения, как в примере 1, а отличия заключаются в том, что из простой пятикомпонентной смеси здесь исключен пропан, а вместо него содержится водяной пар с известным значением молярной доли. Кроме того, стандартные условия сгорания и стандартные условия измерений изменены на 15,55 °С (60 °F) и 101,325 кПа.

D.3.2 Анализ состава

В отчете по измерению молярной доли компонентов в пробе природного газа представлена следующая информация для нормализованного состава (округленного до шестого знака после запятой) и связанных с ним неопределенностей.

Компонент	x_i	$u(x_i)$
Метан	0,931 819	0,000 350
Этан	0,025 618	0,000 243
Азот	0,010 335	0,000 195
Диоксид углерода	0,015 391	0,000 111

Окончание таблицы

Компонент	x_i	$u(x_i)$
Вода	0,016 837	0,000 162
Сумма	1,000 00	—

D.3.3 Вычисление молярной массы

Компонент	x_i	M_i	$x_i \cdot M_i$
Метан	0,931 819	16,042 46	14,948 669 0
Этан	0,025 618	30,069 04	0,770 308 7
Азот	0,010 335	28,013 40	0,289 518 5
Диоксид углерода	0,015 391	44,009 50	0,677 350 2
Вода	0,016 837	18,015 28	0,303 323 3
Сумма	1,000 00	—	16,989 169 7

По формуле (7) — молярная масса M = 16,989 170 кг · кмоль$^{-1}$.

D.3.4 Вычисление молярного объема реального газа

Компонент	x_i	s_i	$x_i \cdot s_i$
Метан	0,931 819	0,044 37	0,041 344 8
Этан	0,025 618	0,091 60	0,002 346 6
Азот	0,010 335	0,016 90	0,000 174 7
Диоксид углерода	0,015 391	0,074 90	0,001 152 8
Вода	0,016 837	0,254 60	0,004 286 7
Сумма	1,000 00	—	0,049 305 6

p_2 = 101,325 кПа;
p_0 = 101,325 кПа;
по формуле (1) — коэффициент сжимаемости Z = 0,997 569 0;
по формуле (B.7) — коэффициент суммирования s = 0,049 306;
T_2 = 288,70 К;
из А.1 — газовая постоянная R = 8,314 462 1 Дж · моль$^{-1}$ · К$^{-1}$;
по формуле (11) — молярный объем V = 0,023 632 824 м^3 · моль$^{-1}$.

D.3.5 Вычисление высшей молярной теплоты сгорания

Компонент	x_i	$((Hc)^\circ_G)_i$	$x_i \cdot ((Hc)^\circ_G)_i$
Метан	0,931 819	891,460	830,679 365 7
Этан	0,025 618	1562,060	40,016 853 1
Азот	0,010 335	0,00	0,000
Диоксид углерода	0,015 391	0,00	0,000
Вода	0,016 837	44,408	0,747 697 5
Сумма	1,000 00		871,443 916 3

По формуле (2) — высшая молярная теплота сгорания $(Hc)^\circ_G$ = 871,443 916 кДж · моль$^{-1}$.

D.3.6 Вычисление неопределенности высшей молярной теплоты сгорания

Компонент	$((Hc)^\circ_G)_i$	$u(x_i)$	$((Hc)^\circ_G)_i \ u(x_i)$	$[(Hc)^\circ_G)_i \ u(x_i)]^2$
Метан	891,460	0,000 350	0,312 011 00	0,097 350 864
Этан	1 562,060	0,000 243	0,379 580 58	0,144 081 417
Азот	0,00	0,00 195	0,000 000 00	0,000 000 00
Диоксид углерода	0,00	0,000 111	0,000 000 00	0,000 000 00
Вода	44,408	0,000 162	0,007 194 10	0,000 051 755
Сумма	—	—	—	0,241 484 036

Компонент	$r(x_i, x_j)$				
	CH_4	C_2H_6	N_2	CO_2	H_2O
CH_4	1	0	0	0	0
C_2H_6	0	1	0	0	0
N_2	0	0	1	0	0
CO_2	0	0	0	1	0
H_2O	0	0	0	0	1

Компонент	x_i	x_i^2	$u((Hc)^\circ_G)_i$	$u^2((Hc)^\circ_G)_i$	$x_i^2 \cdot u^2((Hc)^\circ_G)_i$
Метан	0,931 819	0,868 286 649	0,190	0,036 10	0,031 345 148
Этан	0,025 618	0,000 656 282	0,510	0,260 10	0,000 170 699
Азот	0,010 335	0,000 106 812	0,000	0,000 00	0,000 000 000
Диоксид углерода	0,015 391	0,000 236 883	0,000	0,000 00	0,000 000 000
Вода	0,016 837	0,000 283 485	0,004	0,000 02	0,000 000 005
Сумма	1,000 00	—	—	—	0,031 515 852

По формуле (B.4) — $u^2((Hc)_G) = 0{,}241\,484\,036 + 0{,}031\,515\,852 = 0{,}272\,999\,888$;
$u((Hc)_G) = 0{,}522\,493\,911$ кДж·моль$^{-1}$;
$U((Hc)_G) = 1{,}0$ кДж · моль$^{-1}$ (используют коэффициент охвата
$k = 2$ и выражают расширенную неопределенность с точностью до двух значащих цифр).

D.3.7 Вычисление высшей массовой теплоты сгорания

Из D.3.5 — $(Hc)_G = 871{,}443\,916$ кДж · моль$^{-1}$;
из D.3.3 — M = 16,989170 кг · кмоль$^{-1}$;
по формуле (4) — высшая массовая теплота сгорания
$(Hm)_G = 51{,}294\,085$ МДж · кг$^{-1}$.

D.3.8 Вычисление неопределенности высшей массовой теплоты сгорания

Компонент	$((Hc)^\circ_G)_i/(Hc)_G$	M_i/M	$[(Hc)^\circ_G)_i/(Hc)_G] - [M_i/M]$	$u(x_i)$	{значение из столбца 4} · $u(x_i)$	{значение из столбца 6}$^2 \cdot 10^8$
Метан	1,022 968 9	0,944 275 7	0,078 693 2	0,000 350	0,000 027 5	0,075 860
Этан	1,792 496 3	1,769 894 6	0,022 601 7	0,000 243	0,000 005 5	0,003 016
Азот	0,000 000 0	1,648 897 5	–1,648 897 5	0,000 195	–0,000 321 5	10,338 476
Диоксид углерода	0,000 000 0	2,590 444 4	–2,590 444 4	0,000 111	–0,000 287 5	8,267 887
Вода	0,050 959 1	1,060 397 9	–1,009 438 8	0,000 162	–0,000 163 5	2,674 176
Сумма	—	—	—	—	—	21,359 415

Примечание — Предполагается, что корреляционная матрица $r(x_i,x_j)$ такая же, как в D.3.6.

Компонент	x_i	x_i^2	$x((Hc)^\circ_G)_i$	$u^2((Hc)^\circ_G)_i$	$x_i^2 \cdot u^2((Hc)^\circ_G)_i$	$x_i^2 \cdot u^2((Hc)^\circ_G)_i/((Hc)_G)^2 \cdot 10^8$
Метан	0,931 819	0,868 286 649	0,190	0,036 10	0,031 345 148	4,127 541
Этан	0,025 618	0,000 656 282	0,510	0,260 10	0,000 170 699	0,022 478
Азот	0,010 335	0,000 106 812	0,000	0,000 00	0,000 000 000	0,000 000
Диоксид углерода	0,015 391	0,000 236 883	0,000	0,000 00	0,000 000 000	0,000 000
Вода	0,016 837	0,000 283 485	0,004	0,000 02	0,000 000 005	0,000 001
Сумма	1,000 00	—	—	—	0,031 515 852	4,150 02

Компонент	$r(M_i, M_j)$				
	Метан	Этан	Азот	Диоксид углерода	Вода
Метан	1,000 000 000 000 0	0,996 804 383 768 0	0,000 000 000 000 0	0,755 086 685 092 8	0,139 700 393 083 5
Этан	0,996 804 383 768 0	1,000 000 000 000 0	0,000 000 000 000 0	0,773 784 772 303 5	0,107 369 828 180 3
Азот	0,000 000 000 000 0	0,000 000 000 000 0	1,000 000 000 000 0	0,000 000 000 000 0	0,000 000 000 000 0
Диоксид углерода	0,755 086 685 092 8	0,773 784 772 303 5	0,000 000 000 000 0	1,000 000 000 000 0	0,543 709 883 997 2
Вода	0,139 700 393 083 5	0,107 369 828 180 3	0,000 000 000 000 0	0,543 709 883 997 2	1,000 000 000 000 0

Компонент	x_i	$u(M_i)$	$x_i \cdot u(M_i)$	$[x_i \cdot u(M_i) \cdot r(M_i, M_j) \cdot x_j \cdot u(M_j)]/M^2$
Метан	0,931 819	0,000 423 79	0,000 394 9	—
Этан	0,025 618	0,000 827 10	0,000 021 2	
Азот	0,010 335	0,000 200 00	0,000 002 1	
Диоксид углерода	0,015 391	0,000 500 00	0,000 007 7	
Вода	0,016 837	0,000 166 00	0,000 002 8	
Сумма	1,000 00	—	—	$0{,}061\,785 \cdot 10^{-8}$

По формуле (B.5) — $[u(Hm)_G/(Hm)_G]^2 = [21{,}359\,415 + 4{,}150\,020 + 0{,}061\,785] \cdot 10^{-8} = 25{,}571\,220 \cdot 10^{-8}$;

$u(Hm)_G = [25{,}571\,220 \cdot 10^{-8} \cdot (51{,}294\,085)^2]^{1/2} = 0{,}025\,938$ МДж · кг$^{-1}$;

$U(Hm)_G = 0{,}052$ МДж · кг$^{-1}$ (используют коэффициент охвата 2 и выражают расширенную неопределенность с точностью до двух значащих цифр).

D.3.9 Вычисление высшей объемной теплоты сгорания реального газа

Из D.3.5 — $(Hc)_G = 871{,}443\,916$ кДж · моль$^{-1}$;

из D.3.4 — $V = 0{,}023\,632\,824$ м^3 · моль$^{-1}$;

по формуле (10) — $(Hv)_G = 36{,}874\,304$ МДж · м$^{-3}$.

D.3.10 Вычисление неопределенности высшей объемной теплоты сгорания

Компонент	$((Hc)^\circ_G)_i/(Hc)_G$	$2 \cdot s_i \cdot s/Z$	$[(Hc)^\circ_G)_i/(Hc)_G] + [2 \cdot s_i \cdot s/Z]$	$u(x_i)$	$\{[(Hc)^\circ_G)_i/(Hc)_G] + [2 \cdot s_i \cdot s/Z]\} \cdot u(x_i)$	{значение из столбца 6}$^2 \cdot 10^8$
Метан	1,022 968 9	0,004 386 0	1,027 354 9	0,000 350	0,000 359 574	12,929 362
Этан	1,792 496 3	0,009 054 8	1,801 551 1	0,000 243	0,000 437 777	19,164 863
Азот	0,000 000 0	0,001 670 6	0,001 670 6	0,000 195	0,000 000 326	0,000 011
Диоксид углерода	0,000 000 0	0,007 404 0	0,007 404 0	0,000 111	0,000 000 822	0,000 068
Вода	0,050 959 1	0,025 167 6	0,076 126 7	0,000 162	0,000 012 333	0,015 209
Сумма	—	—	—	—	—	32,109 513

Примечание — Предполагают, что корреляционная матрица $r(x_i, x_j)$ такая же, как в D.3.6.

Компонент	x_i	x_i^2	$u((Hc)^\circ_G)_i$	$u^2((Hc)^\circ_G)_i$	$x_i^2 \cdot u^2((Hc)^\circ_G)_i$	$x_i^2 \cdot u^2((Hc)^\circ_G)_i/((Hc)_G)^2 \cdot 10^8$
Метан	0,931 819	0,868 286 649	0,190	0,036 10	0,031 345 148	4,127 541
Этан	0,025 618	0,000 656 282	0,510	0,260 10	0,000 170 699	0,022 478
Азот	0,010 335	0,000 106 812	0,000	0,000 00	0,000 000 000	0,000 000
Диоксид углерода	0,015 391	0,000 236 883	0,000	0,000 00	0,000 000 000	0,000 000
Вода	0,016 837	0,000 283 485	0,004	0,000 02	0,000 000 005	0,000 001
Сумма	1,000 00	—	—	—	0,031 515 852	4,150 020

Компонент	x_i	$u(s_i)$	$x_i \cdot u^2(s_i) \cdot 10^8$	$4 \cdot s^2 \cdot x_i^2 \cdot u^2(S_i)/Z^2 \cdot 10^8$
Метан	0,931 819	0,000 5	21,707 166	0,212 114
Этан	0,025 618	0,001 1	0,079 410	0,000 776
Азот	0,010 335	0,001 0	0,010 681	0,000 104
Диоксид углерода	0,015 391	0,002 0	0,094 753	0,000 926
Вода	0,016 837	0,015 0	6,378 403	0,062 327
Сумма	1,000 00	—	—	0,276 247

Из А.1 — $[u(R)/R]^2 = 0{,}000\,081\,4 \cdot 10^{-8}$;
по формуле (В.6) — $[u(Hv)_G/(Hv)]^2 = [32{,}109\,513 + 4{,}150\,020 + 0{,}276\,247 + 0{,}000\,081] \cdot 10^{-8} = 36{,}535\,861 \cdot 10^{-8}$;

$$u(Hv)_G = [36{,}535\,861 \cdot 10^{-8} \cdot (36{,}874\,304)^2]^{1/2} = 0{,}022\,289 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$U(Hv)_G = 0{,}045$ МДж · м$^{-3}$ (используют коэффициент охвата 2 и выражают расширенную неопределенность с точностью до двух значащих цифр).

D.3.11 Преобразование результатов в систему единиц, отличную от СИ

Результаты, полученные в D.3.5—D.3.10 для высшей молярной, массовой и объемной теплоты сгорания $(Hc)_G$, $(Hm)_G$ и $(Hv)_G$, соответственно, можно в общем случае представить следующим образом:

$$(Hc)_G = (871{,}4 \pm 1{,}0) \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$(Hm)_G = (51{,}294 \pm 0{,}052) \text{ МДж} \cdot \text{кг}^{-3};$$

$$(Hv)_G = (36{,}874 \pm 0{,}045) \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

Преобразование этих значений из единиц системы СИ в другую систему единиц выполняют, используя приложение С, следующим образом:

- по таблице С.1:

$(Hc)_G = (871{,}4 \pm 1{,}0)$ кДж · моль$^{-1}$ = $[(871{,}4 \pm 1{,}0)/0{,}002\,326]$ БТЕ$_М$ · фунт · моль$^{-1}$
= $(374\,635 \pm 430)$ БТЕ$_М$ · фунт · моль$^{-1}$;

- по таблице С.2:

$(Hm)_G = (51{,}294 \pm 0{,}052)$ МДж · кг$^{-1}$ = $[(51{,}294 \pm 0{,}052)/0{,}002\,326]$ БТЕ$_М$ · фунт$^{-1}$
= $(22\,052 \pm 22)$ БТЕ$_М$ · фунт$^{-1}$;

$(Hv)_G = (36{,}874 \pm 0{,}045)$ МДж · м$^{-3}$ = $[(36{,}874 \pm 0{,}045)/0{,}037\,258\,9]$ БТЕ$_М$ · фут$^{-3}$
= $(989{,}7 \pm 1{,}2)$ БТЕ$_М$ · фут$^{-3}$.

D.4 Пример 3. Более сложная смесь из 11 компонентов

D.4.1 Общие положения

В данном примере вычисления результатов промежуточных этапов не приводят, а представлены конечные результаты вычислений более широкого спектра показателей для более сложной 11-компонентной смеси. Показатели вычислены в D.4.3 для стандартных условий сгорания 15 °С и 101,325 кПа, и стандартных условий измерений 15 °С и 101,325 кПа, и в D.4.4, для стандартных условий сгорания 25 °С и 101,325 кПа, и стандартных условий измерений 0 °С и 101,325 кПа. Для обоих наборов стандартных условий вычисления проведены сначала, используя допущение о наличии единичной матрицы для корреляций значений молярной доли, а затем используя полную матрицу.

D.4.2 Анализ состава

В отчете по измерению молярной доли компонентов в пробе природного газа представлена следующая информация для нормализованного состава (округленного до шестого знака после запятой) и связанных с ним неопределенностей.

Компонент	x_i	$u(x_i)$
Метан	0,922 393	0,000 348
Этан	0,025 358	0,000 247
Пропан	0,015 190	0,000 149
н-Бутан	0,000 523	0,000 018
2-Метилпропан	0,001 512	0,000 027
н-Пентан	0,002 846	0,000 007
2-Метилбутан	0,002 832	0,000 009

Окончание таблицы

Компонент	x_i	$u(x_i)$
2-2-Диметилпропан	0,001 015	0,000 004
н-Гексан	0,002 865	0,000 008
Азот	0,010 230	0,000 195
Диоксид углерода	0,015 236	0,000 112
Сумма	1,000 00	—

D.4.3 Показатели и неопределенности для стандартных условий 15 °С/15 °С

D.4.3.1 Результаты использования единичной матрицы для корреляции значений молярной доли

Показатель	*Y*	*u*(Y)	*U*(Y)
Высшая объемная теплота сгорания, МДж · м$^{-3}$ (после округления согласно 11.5.2)	39,733 51 39,734	0,026 916	0,053 833 0,054
Низшая объемная теплота сгорания, МДж · м$^{-3}$ (после округления согласно 11.5.2)	35,868 11 35,868	0,024 757	0,049 515 0,050
Плотность, кг · м$^{-3}$ (после округления согласно 11.5.2)	0,764 62 0,764 6	0,000 586	0,001 172 0,001 2
Относительная плотность (после округления согласно 11.5.2)	0,623 91 0,623 91	0,000 478	0,000 956 0,000 96
Число Воббе (высшее), МДж · м$^{-3}$ (после округления согласно 11.5.2)	50,303 18 50,303	0,021 588	0,043 177 0,043
Число Воббе (низшее), МДж · м$^{-3}$ (после округления согласно 11.5.2)	45,409 54 45,410	0,020 151	0,040 302 0,040

D.4.3.2 Результаты использования полной матрицы для корреляции значений молярной доли

Значения для элементов $r(x_i, x_j)$ матрицы (нормализации) коэффициентов корреляции значений молярной доли, вычисленные по формуле *(24)* и округленные до шестого знака после запятой, приведены в следующей таблице данных. Пересмотренные оценки для неопределенностей значений различных показателей, полученные с использованием этой полной матрицы коэффициентов корреляции вместо единичной матрицы, показаны в следующей таблице. Очевидно, что для этого типичного примера значения заметно меньше, чем приведенные в D.4.3.1.

$r(x_i,x_j)$	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	*н*-C_4H_{10}	*изо*-C_4H_{10}	*н*-C_5H_{12}	*изо*-C_5H_{12}	*нео*-C_5H_{12}	*н*-C_6H_{14}	N_2	CO_2
CH_4	1,000 000	–0,657 246	–0,377 458	–0,041 205	–0,056 924	0,099 228	0,061 961	0,064 295	0,080 202	–0,512 347	–0,265 664
C_2H_6	–0,657 246	1,000 000	–0,035 617	–0,007 450	–0,013 720	–0,085 690	–0,063 295	–0,054 908	–0,074 061	–0,030 668	–0,038 371
C_3H_8	–0,377 458	–0,035 617	1,000 000	–0,004 442	–0,007 810	–0,039 877	–0,029 677	–0,025 538	–0,034 574	–0,024 994	–0,023 925
н-C_4H_{10}	–0,041 205	–0,007 450	–0,004 442	1,000 000	–0,000 824	–0,000 592	–0,000 551	–0,000 372	–0,000 567	–0,005 703	–0,003 373
изо-C_4H_{10}	–0,056 924	–0,013 720	–0,007 810	–0,000 824	1,000 000	0,002 803	0,001 827	0,001 811	0,002 303	–0,010 740	–0,005 392
н-C_5H_{12}	–0,099 228	–0,085 690	–0,039 877	–0,000 592	0,002 803	1,000 000	0,079 557	0,071 180	0,094 670	–0,072 794	–0,014 019
изо-C_5H_{12}	0,061 961	–0,063 295	–0,029 677	–0,000 551	0,001 827	0,079 557	1,000 000	0,051 085	0,067 937	–0,053 627	–0,010 845
нео-C_5H_{12}	0,064 295	–0,054 908	–0,025 538	–0,000 372	0,001 811	0,071 180	0,051 085	1,000 000	0,060 788	–0,046 653	–0,008 952
н-C_6H_{14}	0,080 202	–0,074 061	–0,034 574	–0,000 567	0,002 303	0,094 670	0,067 927	0,060 788	1,000 000	–0,062 845	–0,012 357
N_2	–0,512 347	–0,030 668	–0,024 994	–0,005 703	–0,010 740	–0,072 794	–0,053 627	–0,046 653	–0,062 845	1,000 000	–0,028 699
CO_2	0,265 664	–0,038 371	–0,023 925	–0,003 373	–0,005 392	–0,014 019	–0,010 845	–0,008 952	–0,012 357	–0,028 699	1,000 000

Показатель	Y	$u(Y)$	$U(Y)$
Высшая объемная теплота сгорания, МДж · м$^{-3}$ (после округления согласно 11.5.2)	39,733 51 39,734	0,016 316	0,032 631 0,033
Низшая объемная теплота сгорания, МДж · м$^{-3}$ (после округления согласно 11.5.2)	35,868 11 35,868	0,015 305	0,030 609 0,031
Плотность, кг · м$^{-3}$ (после округления согласно 11.5.2)	0,767 62 0,764 6	0,000 277	0,000 554 0,000 55
Относительная плотность (после округления согласно 11.5.2)	0,623 91 0,623 91	0,000 226	0,000 453 0,000 45
Число Воббе (высшее), МДж · м$^{-3}$ (после округления согласно 11.5.2)	50,303 18 50,303	0,019 823	0,039 646 0,040
Число Воббе (низшее), МДж · м$^{-3}$ (после округления согласно 11.5.2)	45,409 54 45,410	0,018 498	0,036 996 0,037

D.4.4 Показатели и неопределенности для стандартных условий 25 °С/0 °С

D.4.4.1 Результаты использования единичной матрицы для корреляций значений молярной доли

Показатель	Y	$u(Y)$	$U(Y)$
Высшая объемная теплота сгорания, МДж · м$^{-3}$ (после округления согласно 11.5.2)	41,893 60 41,894	0,028 425	0,056 850 0,057
Низшая объемная теплота сгорания, МДж · м$^{-3}$ (после округления согласно 11.5.2)	37,852 28 37,852	0,026 164	0,052 327 0,052
Плотность, кг · м$^{-3}$ (после округления согласно 11.5.2)	0,807 01 0,807 0	0,000 619	0,001 238 0,001 2
Относительная плотность (после округления согласно 11.5.2)	0,624 11 0,624 11	0,000 479	0,000 958 0,000 96
Число Воббе (высшее, МДж · м$^{-3}$ (после округления согласно 11.5.2)	50,029 30 50,029	0,022 783	0,045 566 0,046
Число Воббе (низшее), МДж · м$^{-3}$ (после округления согласно 11.5.2)	47,913 76 47,914	0,021 278	0,042 557 0,043

D.4.4.2 Результаты использования полной матрицы для корреляций значений молярной доли

Очевидно, что изменение стандартных условий не влияет на матрицу (нормализации) коэффициентов корреляции значений молярной доли, которая остается неизменной по сравнению с представленной в D.4.3.2. То же самое, как показывают результаты, касается заключения, что использование единичной матрицы вместо полной матрицы нормализации дает «безопасную» (завышенную) оценку неопределенности для всех показателей.

Показатель	Y	$u(Y)$	$U(Y)$
Высшая объемная теплота сгорания, МДж · м$^{-3}$ (после округления согласно 11.5.2)	41,893 60 41,894	0,017 241	0,034 483 0,034
Низшая объемная теплота сгорания, МДж · м$^{-3}$ (после округления согласно 11.5.2)	37,852 28 37,852	0,016 181	0,032 361 0,032
Плотность, кг · м$^{-3}$ (после округления согласно 11.5.2)	0,807 01 0,807 0	0,000 293	0,000 586 0,000 59
Относительная плотность (после округления согласно 11.5.2)	0,624 11 0,624 11	0,000 227	0,000 454 0,000 45
Число Воббе (высшее), МДж · м$^{-3}$ (после округления согласно 11.5.2)	50,029 30 50,029	0,020 914	0,041 828 0,042
Число Воббе (низшее), МДж · м$^{-3}$ (после округления согласно 11.5.2)	47,913 76 47,914	0,019 528	0,039 057 0,039

Приложение ДА
(рекомендуемое)

Рекомендации по выбору перечня учитываемых компонентов природного газа при определении его физико-химических показателей для конкретного узла измерений

Основным вопросом при выборе методики определения компонентного состава природного газа для конкретного узла измерений, обеспечивающей получение достоверной информации о составе и физико-химических показателях качества природного газа, является выбор оптимального перечня компонентов, подлежащих определению.

В любом случае выбор осуществляют на основании расширенного анализа компонентного состава природного газа в точке измерений, проводимого по аттестованным методикам измерений молярной доли компонентов. При расширенном анализе должны быть определены содержания углеводородных компонентов с числом атомов углерода C_1—C_8 (включая бензол и толуол), постоянных газов (азот, кислород+аргон, диоксид углерода, гелий и водород), серосодержащих компонентов (сероводород, меркаптаны C_1—C_4, серооксид углерода) и водяных паров. При этом нижняя граница измерений молярной доли компонентов должна составлять для углеводородов, гелия и водорода не более 0,0010 %, для суммарного содержания кислорода и аргона, азота и диоксида углерода — не более 0,0050 %.

При рутинных измерениях на конкретных узлах учета допускается проводить сокращенный анализ компонентного состава без потери достоверности вычисленных значений ФХП, используя:

а) общепринятое допущение не учитывать при рутинных измерениях для вычисления ФХП компоненты, молярная доля которых не превышает значения 0,005 %, ввиду незначимого вклада этих компонентов в вычисленные значения ФХП;

б) условно-постоянное значение молярной доли для некоторых компонентов на установленный период времени при невозможности обеспечения измерений их текущего значения молярной доли с применением имеющейся аналитической системы;

в) измерение суммарной молярной доли двух или более компонентов, фиксируемых в виде хроматографически неразделенных пиков, например кислород+аргон+азот или компоненты тяжелее пентана в виде псевдокомпонента C_{6+}.

Вместе с тем при наличии обоснования незначимости вклада в вычисленные значения ФХП (Y) сокращенный анализ может быть применен для природного газа постоянного состава в отношении компонентов, значение молярной доли которых превышает 0,005 %.

Обоснование незначимости вклада в значения ФХП проводят путем оценки относительного изменения (Ψ, %) значений всех ФХП, вычисленных по полному (Y) и сокращенному(Y^*) компонентному составу. Оценку Ψ проводят для показателей:

- высшая объемная теплота сгорания $(Hv)_G$, МДж/м^3;
- низшая объемная теплота сгорания $(Hv)_N$, МДж/м^3;
- относительная плотность G;
- абсолютная плотность D, кг/м^3;
- высшее число Воббе W_G, МДж/м^3;
- низшее число Воббе W_N, МДж/м^3.

В качестве критерия оценки обоснованности Ψ для сокращения перечня определяемых компонентов принимают норматив, равный 20 % значения расширенной неопределенности значения ФХП $U(Y)$, вычисленного по результатам полного компонентного состава сухого газа.

При получении значения модуля Ψ *не более* норматива для всех ФХП исключение компонента(ов) из числа определяемых по внедряемой методике измерений считают обоснованным. При получении значения модуля Ψ более норматива хотя бы по одному показателю исключение компонента(ов) не допускается.

В качестве примера приведена оценка обоснованности исключения из числа обязательно определяемых компонентов гелия, водорода и водяных паров для двух образцов природного газа, состав которых приведен в таблице ДА.1. Пример приведен для метода определения «метан по разности».

Таблица ДА.1 — Паспортные данные о полном компонентном составе образцов ПГ

Компонент	Образец № 1		Образец № 2	
	x, мол. доля, %	$U(x)$, мол. доля, %	x, мол. доля, %	$U(x)$, мол. доля, %
Метан	остальное		остальное	
Этан	11,83	0,47	4,69	0,19
Пропан	3,63	0,22	0,623	0,038
2-Метилпропан (изобутан)	0,297	0,012	0,0340	0,0023

Окончание таблицы ДА.1

Компонент	Образец № 1		Образец № 2	
	x, мол. доля, %	*U*(*x*), мол. доля, %	*x*, мол. доля, %	*U*(*x*), мол. доля, %
н-бутан	0,203	0,018	0,0269	0,0019
2-Метилбутан (изопентан)	0,0374	0,0025	0,0051	0,0005
н-Пентан	0,0261	0,0018	0,0042	0,0005
Гексаны	0,0212	0,0015	0,0066	0,0006
Диоксид углерода	0,0130	0,0020	0,0782	0,0059
азот	6,36	0,26	1,26	0,05
Кислород+аргон	0,0070	0,0016	0,0076	0,0017
Гелий	0,0128	0,0010	0,0394	0,0026
Водород	0,0055	0,0006	0,0060	0,0006
Водяной пар	0,0150	0,0015	0,0150	0,0015

В таблицах ДА.2, ДА.3 приведена оценка обоснованности исключения из числа обязательно определяемых компонентов гелия, водорода и водяных паров для двух образцов природного газа для вариантов:

а) исключение из числа определяемых компонентов гелия и водорода;

б) исключение из числа определяемых компонентов водяных паров;

в) исключение из числа определяемых компонентов гелия, водорода и водяных паров.

Как видно из представленных в таблице ДА.2 данных, для образца № 1 критерий оценки обоснованности для всех вариантов не превышен, что позволяет исключить из числа обязательно определяемых компонентов гелий, водород и водяные пары при их указанном содержании.

Для образца № 2 для варианта б) сокращенного анализа получено превышение критерия обоснованности по значению плотности и относительной плотности, что не позволяет исключать из числа учитываемых компонентов водяных паров; для варианта в) получено превышение критерия обоснованности по значению высшей и низшей теплоты сгорания при одновременном исключении из числа учитываемых компонентов гелия, водорода и водяных паров, что не позволяет использовать на практике вариант сокращенного анализа в). Вместе с тем для анализа образца № 2 может быть реализован вариант а) с исключением из числа обязательно учитываемых компонентов гелия и водорода при их указанном содержании.

При использовании приведенных рекомендаций следует с установленной периодичностью проводить проверку стабильности компонентного состава природного газа на конкретном узле измерений.

Таблица ДА.2 — Оценка обоснованности исключения компонентов для образца № 1

Показатель	*Y*, ед. изм.	*U*(*Y*), ед. изм.	*Y**, ед. изм.	$\Delta Y = (Y^* - Y)$, ед. изм.	$\Psi = \frac{\Delta Y}{U(Y)} \cdot 100$, %	Заключение о соответствии критерию обоснованности
Вариант а)						
$(Hv)_G$, МДж/м^3	40,57	0,205752	40,57	0,00041227	0,20	Соответствует
$(Hv)_N$, МДж/м^3	36,75	0,190621	36,75	0,00012418	0,07	Соответствует
G	0,6833	0,003306	0,6834	0,00009582	2,90	Соответствует
D, кг/м^3	0,8230	0,003982	0,8231	0,00011541	2,90	Соответствует
W_G, МДж/м^3	49,08	0,275778	49,08	–0,00294254	–1,07	Соответствует
W_N, МДж/м^3	44,46	0,254455	44,46	–0,00296715	–1,17	Соответствует
Вариант б)						
$(Hv)_G$, МДж/м^3	40,57	0,205752455	40,58	0,006172503	0,30	Соответствует
$(Hv)_N$, МДж/м^3	36,75	0,190620905	36,76	0,005598722	0,29	Соответствует
G	0,6833	0,003305671	0,6834	0,000080611	0,24	Соответствует
D, кг/м^3	0,8230	0,003981512	0,8231	0,000097091	0,24	Соответствует
W_G, МДж/м^3	49,08	0,275778384	49,09	0,004571849	0,17	Соответствует

Окончание таблицы ДА.2

Показатель	Y, ед. изм.	$U(Y)$, ед. изм.	Y^*, ед. изм.	$\Delta Y = (Y^* - Y)$, ед. изм.	$\Psi = \frac{\Delta Y}{U(Y)} \cdot 100$, %	Заключение о соответствии критерию обоснованности
W_N, МДж/м^3	44,46	0,254454595	44,47	0,004150233	0,16	Соответствует
Вариант в)						
$(Hv)_G$, МДж/м^3	40,57	0,205752455	40,58	0,006172503	0,30	Соответствует
$(Hv)_N$, МДж/м^3	36,75	0,190620905	36,76	0,005598722	0,29	Соответствует
G	0,683277395	0,003305671	0,6834	0,000080611	0,24	Соответствует
D, кг/м^3	0,8230	0,003981512	0,8231	0,000097091	0,24	Соответствует
W_G, МДж/м^3	49,08	0,275778384	49,09	0,004571849	0,17	Соответствует
W_N, МДж/м^3	44,46	0,254454595	44,47	0,004150233	0,16	Соответствует

Таблица ДА.3 — Оценка обоснованности исключения компонентов для образца № 2

Показатель	Y, ед. изм.	$U(Y)$, ед. изм.	Y^*, ед. изм.	$\Delta Y = (Y^* - Y)$, ед. изм.	$\Psi = \frac{\Delta Y}{U(Y)} \cdot 100$, %	Заключение о соответствии критерию обоснованности
Вариант а)						
$(Hv)_G$, МДж/м^3	38,30	0,069058	38,31	0,000391329	0,57	Соответствует
$(Hv)_N$, МДж/м^3	34,57	0,06377	34,58	0,000104956	0,16	Соответствует
G	0,5907	0,001005	0,5908	0,000095260	9,48	Соответствует
D, кг/м^3	0,7115	0,001211	0,7116	0,000114736	9,48	Соответствует
W_G, МДж/м^3	49,85	0,099356	49,84	–0,00350944	–3,53	Соответствует
W_N, МДж/м^3	44,99	0,091376	44,99	–0,00349077	–3,82	Соответствует
Вариант б)						
$(Hv)_G$, МДж/м^3	38,31	0,069058	38,32	0,011004257	15,9	Соответствует
$(Hv)_N$, МДж/м^3	34,58	0,06377	34,59	0,009708386	15,2	Соответствует
G	0,5907	0,001005	0,5909	0,000205959	20,5	Не соответствует
D, кг/м^3	0,7115	0,001211	0,7117	0,000248067	20,5	Не соответствует
W_G, МДж/м^3	49,85	0,099356	49,85	0,005627819	5,66	Соответствует
W_N, МДж/м^3	44,99	0,091376	45,00	0,004787833	5,24	Соответствует
Вариант в)						
$(Hv)_G$, МДж/м^3	38,31	0,069058	38,33	0,016201475	23,5	Не соответствует
$(Hv)_N$, МДж/м^3	34,58	0,06377	34,60	0,014639639	23,0	Не соответствует
G	0,5907	0,001005	0,5909	0,000194289	19,3	Соответствует
D, кг/м^3	0,7115	0,001211	0,7117	0,000234011	19,3	Соответствует
W_G, МДж/м^3	49,85	0,099356	49,86	0,012880982	13,0	Соответствует
W_N МДж/м^3	44,99	0,091376	45,00	0,011647082	12,7	Соответствует

Приложение ДБ
(справочное)

Молярный состав сухого воздуха

Все значения молярной доли компонентов воздуха взяты из [*4*].

Таблица ДБ.1 — Молярный состав сухого воздуха

Компонент	Молярная доля
Азот	0,780 848
Кислород	0,209 390
Аргон	0,009 332
Диоксид углерода	0,000 4
Неон	0,000 018 2
Гелий	0,000 005 2
Метан	0,000 001 5
Криптон	0,000 001 1
Водород	0,000 000 5
Монооксид диазота	0,000 000 3
Монооксид углерода	0,000 000 2
Ксенон	0,000 000 1

Приложение ДВ
(справочное)

Стандартные температуры определения физико-химических показателей природного газа, принятые в разных странах [при стандартном давлении 101325 Па (760 мм рт. ст.)]

Стандартные температуры сгорания и определения объема природного газа (при стандартном давлении 101325 Па) для разных стран приведены в таблице ДВ.1[1)].

Таблица ДВ.1 — Стандартные температуры определения физико-химических показателей природного газа

Наименование страны	Стандартная температура сгорания, °С	Стандартная температура определения объема, °С
Австрия	25,0	0,0
Китай	20,0	20,0
Чехия	25,0	20,0 и 0,0
Словакия	25,0	20,0 и 0,0
Дания	25,0	0,0
Франция	0,0	0,0
Германия	25,0	0,0
Италия	25,0	0,0
Япония	0,0	0,0
Нидерланды	25,0	0,0
Румыния	25,0	15,0 и 0,0
Испания	0,0	0,0
Великобритания	15,0	15,0
Страны СНГ и Балтии	25,0	20,0

[1)] В Российской Федерации действует ГОСТ Р 56333—2015 «Газы горючие природные. Стандартные условия измерения и вычисления физико-химических свойств», в соответствии с которым приведены значения стандартной температуры, указанные в таблице ДВ.1.

Приложение ДГ
(обязательное)

Коэффициенты сжимаемости для компонентов природного газа для различных стандартных условий измерений

Таблица ДГ.1 — Коэффициенты сжимаемости для постоянных газов при стандартных температурах измерения

j	Компонент	Коэффициент сжимаемости $Z(t_2, p_0)$			
		t_2 = 0 °C	t_2 = 15 °C	t_2 = 15,55 °C	t_2 = 20 °C
1	Метан	0,997 62	0,998 02	0,998 04	0,998 14
2	Этан	0,990 01	0,991 53	0,991 58	0,991 97
3	Пропан	0,978 70	0,982 10	0,982 21	0,983 06
4	*н*-бутан	0,959 49	0,966 50	0,966 72	0,968 45
5	2-Метилпропан (изобутан)	0,964 28	0,970 30	0,970 49	0,971 99
18	Этен	0,992 47	0,993 61	0,993 65	0,993 94
19	Пропен	0,980 94	0,983 95	0,984 05	0,984 81
41	Водород	1,000 61	1,000 60	1,000 60	1,000 59
42	*Пары воды*	*0,930*	*0,945*	—	*0,952*
43	Сероводород	0,989 89	0,99148	0,991 53	0,991 93
44	Аммиак	0,984 86	0,987 89	0,987 99	0,988 71
46	Оксид углерода	0,999 34	0,999 53	0,999 54	0,999 59
49	Гелий	1,000 54	1,000 51	1,000 51	1,000 50
50	Неон	1,000 50	1,000 49	1,000 49	1,000 48
51	Аргон	0,999 04	0,999 24	0,999 24	0,999 30
52	Азот	0,999 55	0,999 71	0,999 72	0,999 76
53	Кислород	0,999 00	0,999 21	0,999 22	0,999 27
54	Диоксид углерода	0,993 25	0,994 34	0,994 38	0,994 66
55	Диоксид серы	0,975 09	0,980 24	0,980 40	0,981 61

Приложение ДД
(справочное)

Сведения о соответствии ссылочных межгосударственных стандартов международным стандартам, использованным в качестве ссылочных в примененном международном стандарте

Таблица ДД.1

Обозначение ссылочного межгосударственного стандарта	Степень соответствия	Обозначение и наименование ссылочного международного стандарта
ГОСТ 31371.1—2020 (ISO 6974-1:2012)	MOD	ISO 6974-1:2012 «Газ природный. Определение состава и связанной с ним неопределенности с помощью газовой хроматографии. Часть 1. Общие указания и определение состава»
ГОСТ 31371.2—2020 (ISO 6974-2:2012)	MOD	ISO 6974-2:2012 «Газ природный. Определение состава и связанной с ним неопределенности с помощью газовой хроматографии. Часть 2. Вычисление неопределенности»
Примечание — В настоящей таблице использовано следующее условное обозначение степени соответствия стандартов: - MOD — модифицированные стандарты.		

Библиография

[1] Humphreys A.E. Some Thermophysical Properties of Components of Natural Gas and Cognate Fluids. Groupe Européen de Recherches Gazières, GERG Technical Monograph TPC/1. 1986, 43 p

[2] Mohr P.J., Taylor B.N., Newell D.B. CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2010. Rev. Mod. Phys. 2012, 84 (4) pp. 1527—1605

[3] Wieser M.E., & Berglund M. Atomic weights of the elements 2007. Pure Appl. Chem. 2009, 81 (11) pp. 2131—2156

[4] Picard A., Davis R.S., Gläser M., Fujii K. Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007). Metrologia. 2008, 45 pp. 149—155

[5] ISO 20765-2 Natural gas — Calculation of thermodynamic properties — Part 2: Single-phaseproperties (gas, liquid, and dense fluid) for extended ranges of application [Природный газ. Расчет термодинамических свойств. Часть 2. Однофазные свойства (газ, жидкость и плотная жидкость) для расширенных областей применения[1)]]

[6] Kunz O., Klimeck R., Wagner W., Jaeschke M. The GERG-2004 Wide-Range Equation of State for Natural Gases and Other Mixtures, GERG Technical Monograph TM-15. 2007, 535 p

[7] Wagner W., & Pruss A. The IAPWS formulation 1995 f or the thermodynamic properties of ordinary water substance for general and scientific use. J. Phys. Chem. Ref. Data. 2002, 31 pp. 387—535

[8] IAPWS (International Association for the Properties of Water and Steam) Advisory Note No.1 (2003), Uncertainties in Enthalpy for the IAPWS Formulation 1995 for the Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use (IAPWS-95) and the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam (IAPWS-IF97)

[1)] В Российской Федерации действует ГОСТ Р 8.662—2009 (ИСО 20765-1:2005) «Государственная система обеспечения единства измерений. Газ природный. Термодинамические свойства газовой фазы. Методы расчетного определения для целей транспортирования и распределения газа на основе фундаментального уравнения состояния AGA8».

УДК 662.767:658.562:006.354 МКС 75.060 MOD

Ключевые слова: природный газ, теплота сгорания, плотность, относительная плотность, число Воббе, неопределенность физико-химических показателей

Редактор *Л.В. Коретникова*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *М.И. Першина*
Компьютерная верстка *Е.О. Асташина*

Сдано в набор 13.10.2021. Подписано в печать 10.11.2021. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 5,58. Уч.-изд. л. 5,05.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «РСТ»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

Поправка к ГОСТ 31369—2021 (ISO 6976:2016) Газ природный. Вычисление теплоты сгорания, плотности, относительной плотности и числа Воббе на основе компонентного состава

Дата введения — 2021—10—01

В каком месте	Напечатано	Должно быть
Предисловие. Таблица согласования	—	Таджикистан | TJ | Таджикстандарт

(ИУС № 2 2022 г.)

Поправка к ГОСТ 31369—2021 (ISO 6976:2016) Газ природный. Вычисление теплоты сгорания, плотности, относительной плотности и числа Воббе на основе компонентного состава

В каком месте	Напечатано	Должно быть		
Предисловие. Таблица согласования	—	Казахстан	KZ	Госстандарт Республики Казахстан

(ИУС № 8 2022 г.)

Поправка к ГОСТ 31369—2021 (ISO 6976:2016) Газ природный. Вычисление теплоты сгорания, плотности, относительной плотности и числа Воббе на основе компонентного состава

В каком месте	Напечатано	Должно быть
Предисловие. Таблица согласования	—	Азербайджан | AZ | Азстандарт

(ИУС № 5 2023 г.)

gost.e-ecolog.ru