

ЭТАЛОНЫ

Научная статья

УДК 53.0896.8::531.114

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-37-47>



Применение кориолисовых регуляторов расхода для разработки эталонной газосмесительной установки в целях совершенствования метрологического обеспечения газоаналитических измерений

А. В. Колобова , А. А. Нечаев

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева»,
г. Санкт-Петербург, Россия
 nech@b10.vniim.ru

Аннотация: Метрологическое обеспечение газоаналитических измерений содержания компонентов в газовых средах по мере развития аналитического приборостроения сопровождается повышением требований к точности. Современные требования к аналитическому приборостроению предполагают расширение диапазонов измерений, уменьшение погрешности, возможность анализа сложных матриц. Однако не все существующие генераторы газовых смесей удовлетворяют этим требованиям.

Цель описанного в статье исследования – оценить возможности кориолисовых регуляторов расхода для создания эталонной динамической установки, способной воспроизводить и передавать единицу молярной доли компонентов в газовых средах с высокой точностью.

Отправной точкой исследования стал анализ опубликованных в литературе результатов приготовления газовых смесей статическими и динамическими способами. Выделены сильные и слабые стороны обоих способов. Проведен собственный эксперимент по приготовлению газовых смесей с применением кориолисовых регуляторов расхода газа.

Сделан вывод о преимуществах кориолисовых регуляторов расхода газа – отсутствии зависимости от физико-химических свойств газа и высокой точности измерений расхода. Представлены основные метрологические и технические характеристики кориолисовых регуляторов. Доказана возможность их применения в эталонных динамических установках для приготовления бинарных и многокомпонентных газовых смесей.

Исследование показало возможность применения кориолисовых регуляторов расхода для создания эталонной динамической установки, способной воспроизводить и передавать единицу молярной доли компонентов в газовых средах с высокой точностью. Результаты работы могут быть использованы для совершенствования метрологического обеспечения газоаналитических измерений и повышения достоверности результатов анализа.

Ключевые слова: газовые смеси, поверочные газовые смеси, кориолисовый расходомер, регулятор расхода газа, газоаналитические измерения, эталонная установка, метрологическое обеспечение измерений, обеспечение единства измерений

Для цитирования: Колобова А. В., Нечаев А. А. Применение кориолисовых регуляторов расхода для разработки эталонной газосмесительной установки в целях совершенствования метрологического обеспечения газоаналитических измерений // Эталоны. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 4. С. 37–47. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-37-47>

Статья поступила в редакцию 17.02.2025; одобрена после рецензирования 20.10.2025; принята к публикации 25.12.2025.


MEASUREMENT STANDARDS

Researches Article

Application of Coriolis Flow Controllers for the Development of a Reference Gas Mixing Installation to Improve the Metrological Support of Gas Analysis Measurements

Anna V. Kolobova , Aleksandr A. Nechaev 

D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia

 nech@b10.vniim.ru

Abstract: The metrological support for gas analysis measurements of component content in gas media is facing increasing accuracy requirements as analytical instrumentation advances. Modern demands on analytical instrumentation involve expanding measurement ranges, reducing errors, and enabling the analysis of complex sample matrices. However, not all existing gas mixture generators meet these requirements. The aim of the research described in the article is to evaluate the capabilities of Coriolis flow controllers for creating a reference dynamic installation capable of reproducing and disseminating the unit of molar fraction of components in gas media with high accuracy.

The starting point of the research was an analysis of published results on the preparation of gas mixtures by static and dynamic methods. The analysis identified the strengths and weaknesses of both approaches. An experiment on the preparation of gas mixtures using Coriolis flow controllers was subsequently conducted. It was concluded that Coriolis flow controllers offer significant advantages, primarily their independence from the physicochemical properties of the gas and their high flow measurement accuracy. The main metrological and technical characteristics of the Coriolis controllers were presented. The study demonstrated the feasibility of their application in reference dynamic installation for the preparation of binary and multicomponent gas mixtures.

The study demonstrated the feasibility of using Coriolis flow controllers to create a reference dynamic installation capable of reproducing and disseminating the unit of molar fraction of components in gas media with high accuracy. Furthermore, the results of this work can be used to enhance the metrological support for gas analysis measurements and improve the reliability of analytical results.

Keywords: gas mixtures, calibration gas mixtures, Coriolis flow meter, gas flow controller, gas analytical measurements, reference installation, metrological support of measurements, assurance of measurement uniformity

For citation: Kolobova AV, Nechaev AA. Application of Coriolis flow controllers for the development of a reference gas mixing installation to improve the metrological support of gas analysis measurements. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2025;21(4):37–47. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/207711772025214-37-47>

The article was submitted 17.02.2025; approved after reviewing 20.10.2025; accepted for publication 25.12.2025.

Введение

В соответствии с теорией антропогенной трансформации природной среды, под воздействием деятельности людей происходит деградация природных ресурсов, утрата ландшафтного и биологического разнообразия, загрязнение окружающей среды [1]. Среди мер по снижению антропогенной нагрузки на природную среду на первый план выходит необходимость непрерывного мониторинга газовых сред. В ответ на эти вызовы активно развивается аналитическое приборостроение, вместе с тем возрастает и необходимость совершенствования метрологического обеспечения достоверности, точности и надежности измерений.

Метрологическое обеспечение газоаналитических измерений содержания компонентов в газовых средах происходит посредством передачи единиц молярной доли и массовой концентрации от Государственного первичного эталона единиц молярной доли, массовой доли и массовой концентрации компонентов в газовых и газоконденсатных средах ГЭТ 154-2019 [2] рабочим эталонам и средствам измерений содержания компонентов в газовых средах. Такая передача осуществляется в соответствии с Государственной поверочной схемой путем проведения поверки, калибровки средств измерений, аттестации и контроля точности методик (методов) измерений с использованием газовых смесей.

Современные требования к аналитическому приборостроению предполагают расширение диапазонов измерений, уменьшение погрешности, обеспечение анализа сложных матриц. Большой перечень имеющихся в эксплуатации генераторов газовых смесей не удовлетворяет этим требованиям.

Одним из направлений развития метрологического обеспечения газоаналитических измерений могло бы стать создание новой высокоточной динамической установки

на кориолисовых регуляторах расхода газа для приготовления бинарных и многокомпонентных газовых смесей в широком диапазоне содержания компонентов.

Цель настоящего исследования – проверка возможности применения кориолисовых регуляторов расхода газа для приготовления газовых смесей методом динамического разбавления. Удовлетворительные результаты исследования могут стать основой создания эталонной динамической установки, предназначенной для воспроизведения и передачи единиц молярной доли компонентов в газовых средах.

В задачи исследования входило:

- 1) проанализировать два основных метода приготовления газовых смесей – статический и динамический;
- 2) изучить преимущества и ограничения кориолисовых регуляторов;
- 3) составить детальную схему эталонной динамической установки с применением кориолисового регулятора;
- 4) составить бюджет неопределенности значения молярной доли компонента, рассчитать относительную расширенную неопределенность молярной доли компонента в случае приготовления газовой смеси на эталонной динамической установке с использованием кориолисовых регуляторов массового расхода газа.

Материалы и методы

Методология приготовления газовых смесей

Газовые смеси могут быть приготовлены двумя основными методами – статическим и динамическим [3].

Статический метод заключается в приготовлении смесей в баллонах под давлением путем дозирования исходных веществ. Содержание компонентов рассчитывается на основе данных о составе исходных веществ и дозируемых массах либо определяется с помощью аналитического контроля. Основной

проблемой этого метода является обеспечение долговременной стабильности смеси, особенно при работе с полярными, реакционно-способными и высокомолекулярными компонентами. Такие компоненты могут взаимодействовать с внутренней поверхностью баллона, адсорбироваться на ней или конденсироваться, что приводит к изменению состава смеси.

Динамический метод, реализуемый с помощью генераторов газовых смесей, позволяет значительно сократить или полностью исключить влияние сорбции, десорбции и химических реакций между компонентами смеси и материалами, контактирующими с газом. В результате возможно достигать более низких концентраций компонентов (на 2–4 порядка ниже, чем при статических методах) и воспроизводить требуемые значения в широком диапазоне. Динамические генераторы также оптимизируют процессы поверки, калибровки и градуировки, сокращая потребность в баллонах с газовыми смесями и устраняя необходимость их замены для корректировки состава смеси.

Объект исследований

Процесс приготовления газовых смесей методом динамического разбавления с использованием тепловых регуляторов массового расхода. В Российской Федерации наибольшее распространение имеют генераторы газовых смесей, функционирующие на основе метода динамического разбавления, большинство из которых использует тепловые регуляторы массового расхода для задания параметров газового потока [4]. В процессе приготовления газовых смесей применяются системы, состоящие из двух и более тепловых регуляторов, каждый из которых подвергается градуировке в целях экспериментального определения зависимости выходного сигнала от фактического расхода газа. Характеристика этой зависимости варьируется в зависимости от физико-химических характеристик газа, проходящего через регулятор. Несмотря на то, что регуляторы измеряют массовый расход, который формально не должен зависеть от температуры и давления газа, для достижения максимальной точности измерений необходимо соблюдение ряда условий:

- температура эксплуатации регулятора не должна превышать температуру градуировки более чем на 5 °С;

- пространственное положение регулятора (горизонтальное или вертикальное) должно соответствовать его положению при градуировке;

- рабочее давление в процессе эксплуатации должно быть в пределах 0,1 МПа от давления при градуировке (для регуляторов с рабочим давлением до 1,0 МПа);

- значения расхода газа зависят от его физико-химических свойств, поэтому необходима градуировка по рабочему газу либо использование дополнительных коэффициентов пересчета. Данные коэффициенты могут увеличить относительную погрешность измерений расхода на 2 % и более (по данным производителей)¹.

Процесс приготовления газовых смесей методом динамического разбавления с использованием кориолисовых регуляторов расхода. Современные технологии привели к появлению новых регуляторов расхода газа, основанных на эффекте Кориолиса [5]. Такие устройства характеризуются специфическими геометрическими параметрами и широким диапазоном измерений, что делает их перспективными для применения в системах генерации газовых смесей разбавительного типа.

Кориолисовые регуляторы расхода газа благодаря высокой точности измерений положительно зарекомендовали себя на международном рынке, что повлекло их активное применение в различных отраслях промышленности [6]. Принцип действия таких регуляторов основан на использовании эффекта Кориолиса, который проявляется при прохождении потока газа через вибрирующую трубку. Под воздействием массовых сил, возникающих вследствие эффекта Кориолиса, трубка подвергается деформации, что приводит к изменению ее фазового состояния. В результате она может

¹ Общая инструкция. Измерители и регуляторы массового расхода / давления серий EL-FLOW, EL-FLOW Base, IN-FLOW, IQ+FLOW, LOW-ΔP-FLOW, LIQUI-FLOW, μ-FLOW, EL-PRESS, IN-PRESS. Док.: 9.17.022AFrus. Режим доступа: <https://www.massflow.ru/u/www/files/catalog/917022rus.pdf> (дата обращения: 17.02.2025).

изгибаться или скручиваться (рис. 1). Такие конструктивные особенности трубки, как высокая прочность и коррозионная стойкость (например, использование нержавеющей стали), обеспечивают долговечность и надежность устройства.

Трубка кориолисового регулятора расхода вибрирует с определенной частотой, которая зависит от массы трубки и проходящего через нее газа. В процессе движения газа через трубку на него воздействует сила Кориолиса, величина которой зависит от скорости потока и массы газа.

Эффект Кориолиса, проявляющийся в отклонении трубки под воздействием потока газа, приводит к фазовому сдвигу между входными и выходными колебаниями. Такой сдвиг прямо пропорционален массовому расходу, что позволяет осуществлять высокоточные измерения.

Кориолисовые регуляторы расхода демонстрируют исключительную независимость от плотности, температуры, вязкости и давления рабочей среды благодаря встроенному в них электромагнитному клапану и применению ПИД-алгоритма², который обеспечивает точное управление клапаном и поддержание заданного уровня расхода.

² ПИД-алгоритм – метод автоматического управления, основанный на комбинации пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих. Данный подход обеспечивает минимизацию ошибок и поддержание стабильности системы, что делает его высокоэффективным инструментом для регулирования сложных динамических процессов.

Основные преимущества кориолисовых регуляторов:

- независимость от физико-химических свойств газа;
- высокая точность измерений и быстрый отклик на изменения заданных параметров;
- отсутствие чувствительности измеренных значений к вязкости газа: изменение плотности газа мало влияет на измеренное значение, что позволяет эффективно контролировать расход газа с высокой вязкостью;
- отсутствие необходимости в прямых участках трубопровода перед и после установки регулятора;
- кориолисовый регулятор непосредственно измеряет массовый расход;
- датчик на основе эффекта Кориолиса обладает большой продолжительностью жизни и практически не подвержен деградации, что минимизирует вероятность изменения метрологических характеристик с течением времени.

Результаты и обсуждение

Выбор диапазона измерений

В процессе разработки генераторов газовых смесей и других динамических установок разбавительного типа активно применяются регуляторы расхода газа, охватывающие диапазон измерений от 2 см³/мин до 10 дм³/мин. Выбор данного диапазона обусловлен совокупностью технических и практических факторов, требующих тщательного анализа.

Верхняя граница диапазона (до 10 дм³/мин) определяет максимальный расход

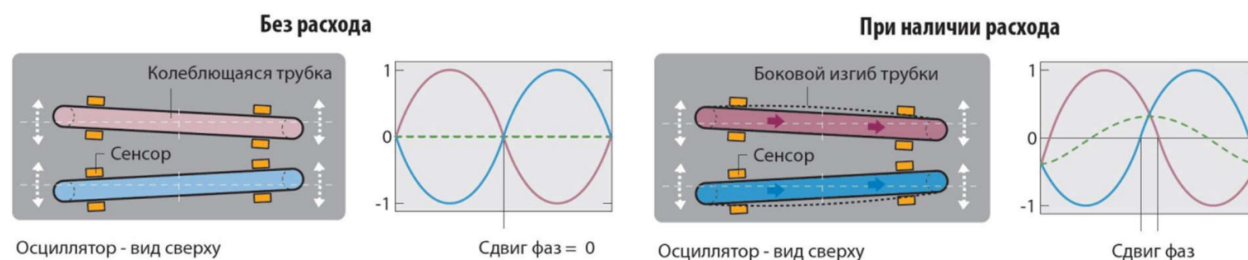


Рисунок заимствован авторами из источника* / The figure is reproduced from*

Рис. 1. Принцип работы кориолисовых регуляторов

Fig. 1. Operating principle of Coriolis flow controllers

* Кориолисовый измеритель/регулятор расхода газа и жидкости серии ACU20FE. Руководство по эксплуатации. Режим доступа: https://www.massflow.ru/u/www/files/catalog/re_acu20fe_rus.pdf (дата обращения: 17.02.2025).

* ACU20FE series coriolis gas and liquid flow meter/regulator. Operation Manual. (In Russ.). Available from: https://www.massflow.ru/u/www/files/catalog/re_acu20fe_rus.pdf [Accessed 17 February 2025].

газовой смеси, подаваемой на выходе генератора, и соответствует максимальному значению расхода, необходимому для поверки или калибровки газоаналитического оборудования. Приготовление газовых смесей с более высокими расходами требует сброса избыточной части смеси, что экономически нецелесообразно.

Нижняя граница диапазона (от 2 см³/мин) ограничена техническими характеристиками регуляторов расхода и отсутствием сертифицированных средств измерений утвержденного типа, способных фиксировать расходы менее 2 см³/мин. На нижнюю границу также влияют процессы сорбции/десорбции и химические реакции между компонентами газовой смеси и внутренней поверхностью газовой арматуры входных линий генератора, включая регуляторы давления и газовые коммуникации. Перечисленные факторы могут привести к несоответствию состава газовой смеси, поступающей из баллона, и состава газа, достигающего входных соединений генератора. Влияние данных процессов усиливается при снижении расхода.

Установленный диапазон расходов является оптимальным для реализации коэффициентов разбавления до 5 000, что делает его предпочтительным для выбора типа кориолисовых регуляторов, используемых в эталонной динамической установке.

Выбор модели кориолисового регулятора

В настоящее время в области приборостроения представлены модели кориолисовых регуляторов с необходимыми диапазонами измерений и габаритами, позволяющими интегрировать их в лабораторное оборудование, включая разрабатываемую эталонную динамическую установку, предназначенную для передачи единицы молярной доли компонентов в газовых средах.

Рассмотрим основные метрологические и технические характеристики кориолисовых регуляторов на примере регуляторов CORI-FLOW и mini CORI-FLOW производства Bronkhorst, Нидерланды³ (табл. 1).

³ Mini CORI-FLOW Мини-Кориолисовые компактные измерители/регуляторы массового расхода для жидкостей и газов. Док.: 9.17.050Jrus. Режим доступа:

Метрологические и технические характеристики кориолисовых регуляторов расхода газа (табл. 1) позволяют использовать их для создания эталонной динамической установки: пределы допускаемой основной относительной погрешности измерений расхода газа составляют $\pm 0,5\%$ при диапазонах регулирования расхода газа от 2 см³/мин до 10 дм³/мин в зависимости от исполнения регулятора.

Конструкция установки

Динамическая установка разбавительного типа должна иметь не менее двух регуляторов расхода газа. Количество таких регуляторов напрямую определяет:

- возможное число компонентов, из которых формируется приготавливаемая смесь;
- диапазон коэффициента разбавления.

На практике обычно применяются установки с двумя или тремя каналами измерения и регулирования расхода. В качестве исходных компонентов для приготовления газовых смесей могут использоваться как чистые газы, так и их предварительно подготовленные смеси.

Представим принципиальную газовую схему динамической установки, оснащенную тремя регуляторами расхода (рис. 2).

<https://www.massflow.ru/u/www/files/catalog/917050rus.pdf> (дата обращения: 17.02.2025).

mini CORI-FLOW™ Компактные кориолисовые измерители/регуляторы массового расхода жидкостей и газов. Режим доступа: https://www.massflow.ru/u/www/files/catalog/mini-cori-flow_rus.pdf (дата обращения: 17.02.2025).

mini CORI-FLOW™ M15 Компактные кориолисовые измерители и регуляторы массового расхода газов и жидкостей. Режим доступа: https://www.massflow.ru/u/www/files/catalog/mini-cori-flow-m15_rus.pdf (дата обращения: 17.02.2025).

Datasheet M12 Coriolis Mass Flow Meter for Liquids and Gases. Available from: <https://www.massflow.ru/u/www/files/catalog/m12-mini-cori-flow.pdf> [Accessed 17 February 2025].

Кориолисовые измерители и регуляторы массового расхода для газов и жидкостей. Док.: 9.17.031Jrus. Режим доступа: <https://www.massflow.ru/u/www/files/catalog/917031rus.pdf> (дата обращения: 17.02.2025).

CORI-FLOW™ Высокоточные измерители/регуляторы массового расхода жидкостей и газов. Режим доступа: https://www.massflow.ru/u/www/files/catalog/cori-flow_rus.pdf (дата обращения: 17.02.2025).

Таблица 1. Основные метрологические и технические характеристики кориолисовых регуляторов

Table 1. Main metrological and technical characteristics of Coriolis flow controllers

Наименование характеристики	Значение						
Тип системы	mini CORI-FLOW™					CORI-FLOW™	
Исполнение	ML120	M12	M13	M14	M15	M54	M55
Наибольшее значение расхода жидкостей и газов, кг/ч (дм³/мин) для азота при 20 °С	0,2 (2,9)	0,2 (2,9)	2 (28,7)	30 (429)	300 (4 291)	100 (1 430)	600 (8 583)
Наименьшее значение расхода газов, кг/ч (дм³/мин) для азота при 20 °С	$5 \cdot 10^{-4}$ ($7,2 \cdot 10^{-3}$)	$1 \cdot 10^{-4}$ ($1,4 \cdot 10^{-3}$)	$1 \cdot 10^{-3}$ ($1,4 \cdot 10^{-2}$)	0,03 (0,4)	0,2 (2,9)	0,1 (1,4)	0,5 (7,2)
Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерений расхода газа, %	$\pm 0,5$						
Габаритные размеры блока измерений с блоком регулирования, мм, не более							
– высота	140	144	144	144	178	197	197
– ширина	32	32	32	32	75	87	87
– длина	120	118	115	106	319	251	251

Таблица составлена авторами / The table is prepared by the authors

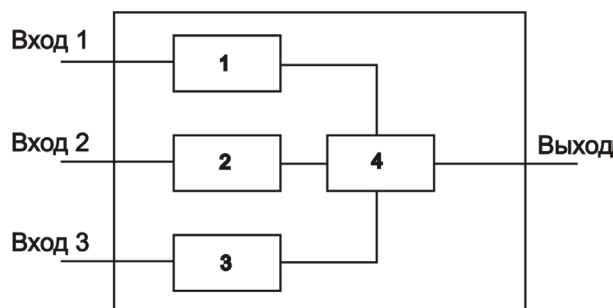


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 2. Принципиальная газовая схема динамической установки с тремя регуляторами расхода: 1, 2, 3 – кориолисовые регуляторы расхода газа; 4 – смешивательная камера

Fig. 2. Schematic flow diagram of a dynamic gas installation with three flow controllers: 1, 2, 3 – Coriolis gas flow controllers; 4 – mixing chamber

Для случая приготовления двухкомпонентной газовой смеси на эталонной динамической установке молярная доля целевого компонента определяется в соответствии с формулой⁴

$$X_B = \frac{\frac{Q_{II} \cdot (X_B)_{II} + Q_P \cdot (X_B)_P}{\mu_{II} + \mu_P}}{\frac{Q_{II} + Q_P}{\mu_{II} + \mu_P}}, \quad (1)$$

где X_B – молярная доля целевого компонента (В) в приготавливаемой газовой смеси, %; Q_{II} и Q_P – массовый расход по каналам исходного целевого газа и газа-разбавителя соответственно, г/мин; μ_{II} и μ_P – молярная масса исходного целевого газа и газа-разбавителя соответственно, г/моль; $(X_B)_{II}$ и $(X_B)_P$ – молярная

⁴ ISO 6145–7:2018 Gas analysis – Preparation of calibration gas mixtures using dynamic methods – Part 7: Thermal mass-flow controllers. Available from: <https://www.iso.org/standard/73212.html> [Accessed 17 February 2025].

доля целевого компонента (В) в исходном целевом газе и газе-разбавителе соответственно, %.

Расчет неопределенности молярной доли компонента

Исходя из формулы (1) можно составить следующий бюджет неопределенности значения молярной доли компонента (В) (табл. 2).

При детальном анализе компонентов бюджета неопределенности можно вычислить относительную суммарную стандартную неопределенность молярной доли, учитывая все составляющие неопределенности из табл. 2. В результате получается моделируемый рабочий режим эталонной установки (табл. 3):

– исходный газ: CO₂ (100 %);

Таблица 2. Бюджет неопределенности

Table 2. Uncertainty budget

Источник неопределенности	Оценка составляющей относительной неопределенности, тип	Распределение вероятности	Коэффициент влияния	Вклад в суммарную относительную стандартную неопределенность
Расход исходного целевого газа Q_{II}	$u(Q_{II})$, тип В	равномерное	$\frac{\frac{Q_P}{\mu_P}}{\frac{Q_{II}}{\mu_{II}} + \frac{Q_P}{\mu_P}}$	$\frac{\delta(Q_{II})}{\sqrt{3}}$
Расход газа-разбавителя Q_P	$u(Q_P)$, тип В	равномерное	$\frac{\frac{Q_P}{\mu_P}}{\frac{Q_{II}}{\mu_{II}} + \frac{Q_P}{\mu_P}}$	$\frac{\delta(Q_P)}{\sqrt{3}}$
Молярная доля компонента (В) в исходном целевом газе $(X_B)_{II}$	$u(X_B)_{II}$, тип В	равномерное	1	$\frac{\delta(X_B)_{II}}{\sqrt{3}}$
Молярная доля компонента (В) в газе-разбавителе $(X_B)_P$	$u(X_B)_P$, тип В	равномерное	$\frac{Q_P \cdot \mu_{II} \cdot (X_B)_P}{Q_{II} \cdot \mu_P \cdot (X_B)_{II}}$	$u(X_B)_P$
Молярная масса исходного целевого газа μ_{II}	$u(\mu_{II})$, тип В	равномерное	$\frac{\frac{Q_P}{\mu_P}}{\frac{Q_{II}}{\mu_{II}} + \frac{Q_P}{\mu_P}}$	$u(\mu_{II})$
Молярная масса исходного газа-разбавителя μ_P	$u(\mu_P)$, тип В	равномерное	$\frac{\frac{Q_P}{\mu_P}}{\frac{Q_{II}}{\mu_{II}} + \frac{Q_P}{\mu_P}}$	$u(\mu_P)$

Принятые обозначения: $\delta(Q_{II})$, $\delta(Q_P)$, $u(Q_{II})$, $u(Q_P)$, $u(X_B)_{II}$, $u(X_B)_P$, $u(\mu_{II})$, $u(\mu_P)$ – относительная погрешность расхода исходного целевого компонента и газа-разбавителя, стандартная относительная неопределенность расхода исходного газа и газа-разбавителя, стандартная относительная неопределенность молярной доли целевого компонента в исходном газе и газе-разбавителе, стандартная относительная неопределенность молярной массы исходного целевого газа и газа-разбавителя соответственно.

Таблица составлена авторами / The table is prepared by the authors

- газ-разбавитель: азот;
- расход газовой смеси на выходе: 1 дм³/мин;
- молярная доля на выходе: 1 %.

Относительная суммарная стандартная неопределенность молярной доли составит:

$$u(X) = \sqrt{(0,3)^2 + (0,3)^2 + (0,06)^2 + (0,05)^2 + (0,002)^2 + (0,002)^2} = 0,43 \%. \quad (2)$$

Относительная расширенная неопределенность (при коэффициенте охвата $k=2$) составит 0,9 %.

Анализ неопределенности молярной доли компонента в случае приготовления газовой смеси на эталонной динамической установке с применением кориолисовых регуляторов массового расхода газа продемонстрировал, что данная неопределенность не превышает 1 %.

Полученное значение неопределенности молярной доли компонента соответствует точностным требованиям, установленным к точности стандартных образцов установленного типа (ГСО) состава газовых смесей 1-го разряда с молярной долей определяемого компонента менее 10 %.

Заключение

В ходе исследования удалось рассчитать и составить:

- детальную схему эталонной динамической установки с применением кориолисовых регуляторов;
- бюджет неопределенности значения молярной доли компонента;
- относительную расширенную неопределенность молярной доли компонента в случае приготовления газовой смеси на эталонной

Таблица 3. Бюджет неопределенности (моделирование)

Table 3. Uncertainty budget (modeling)

Источник неопределенности	Оценка составляющих относительной неопределенности, тип	Распределение вероятности	Коэффициент чувствительности	Вклад в суммарную относительную стандартную неопределенность, %
Расход исходного целевого газа $Q_{\text{ц}}$	$u(Q_{\text{ц}})$, тип В	равномерное	0,997	0,3
Расход газа-разбавителя $Q_{\text{р}}$	$u(Q_{\text{р}})$, тип В	равномерное	0,997	0,3
Молярная доля целевого комп (В) в газе-разбавителе, $(X_{\text{В}})_{\text{р}}$	$u(X_{\text{В}})_{\text{р}}$, тип В	равномерное	0,09	0,05
Молярная доля целевого комп (В) в исходном газе (молярная доля), $(X_{\text{В}})_{\text{ц}}$	$u(X_{\text{В}})_{\text{ц}}$, тип В	равномерное	1	0,06
Молярная масса целевого комп, $\mu_{\text{В}}^*$	$u(\mu_{\text{В}})$, тип В	равномерное	0,997	0,002
Молярная масса газа-разбавителя, $\mu_{\text{р}}^{**}$	$u(\mu_{\text{р}})$, тип В	равномерное	0,997	0,002

* Неопределенность молярной массы целевого компонента (CO₂) использовалась из IUPAC Technical Report [7].

** Там же.

Таблица составлена авторами / The table is prepared by the authors

динамической установке с использованием кориолисовых регуляторов массового расхода газа.

На основании полученных результатов сделан главный вывод: эталонная динамическая установка, основанная на кориолисовых массовых расходомерах, обладает значительными преимуществами по сравнению с традиционными генераторами газовых смесей разбавительного типа.

Основные преимущества такой установки – независимость от физико-химических свойств газа, высокая точность измерения расхода, возможность точного дозирования массы компонентов – открывают перспективу использования ее с целью совершенствования Государственного первичного эталона единицы молярной доли компонентов в газовых смесях ГЭТ 154.

Благодарности: Авторы выражают благодарность ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» за предоставление технической базы для проведения экспериментов.

Acknowledgments: The authors expresses gratitude to the D. I. Mendeleev Institute for Metrology for providing the technical base for conducting the experiments.

Вклад авторов: Колобова А. В. – общее руководство и координация, постановка задачи

исследования, контроль, критический анализ; Нечаев А. А. – разработка концепции исследования, анализ результата исследования, проверка и редакция текста статьи, работа с текстом, систематизация материала, подготовка данных.

Contribution of the authors: Kolobova A. V. – general management and coordination, formulation of the research task, control, critical analysis; Nechaev A. A. – development of the research concept, analysis of the research results, revision and editing of the text, working with the text, systematization of the material, data preparation.

Финансирование: Это исследование не получало финансовой поддержки в виде гранта от какой-либо организации государственного, коммерческого или некоммерческого сектора.

Funding: This research did not receive financial support in the form of a grant from any governmental, for-profit, or non-profit organizations.

Конфликт интересов: Авторы декларируют об отсутствии явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Conflict of interest: The authors declare no actual or potential conflicts of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бузмаков С. А. Антропогенная трансформация природной среды // Географический вестник. 2012. № 4 (23). С. 46–50.
2. Колобова А. В., Конопелько Л. А., Попов О. Г. Государственный первичный эталон единиц молярной доли, массовой доли и массовой концентрации компонентов в газовых и газоконденсатных средах ГЭТ 154-2019 // Эталон. Стандартные образцы. 2020. Т. 16, № 3. С. 23–35. <https://doi.org/10.20915/2687-0886-2020-16-3-23-35>
3. Динамические методы приготовления газовых смесей / А. В. Колобова [и др.] // Эталон. Стандартные образцы. 2024. Т. 20, № 4. С. 76–88. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2024-20-4-76-88>
4. Мальгинов А. В., Евдокимов А. А., Громова Е. В. Передача единиц молярной доли и массовой концентрации газовых компонентов с помощью рабочих эталонов 1-го разряда на основе динамических генераторов газовых смесей // Измерительная техника. 2011. Т. 54, № 9. С. 8–12.
5. Хмельник С. И. Сила Кориолиса и центробежная сила в электродинамике и механике // Доклады независимых авторов. Серия: Физика. 2020. Т. 48, № 1. С. 67–73. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3886486>
6. Романов В. А., Тараненко П. А. Оценка диссипативных свойств колебательной системы серийного образца расходомера Кориолиса // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2020. № 2. С. 134–144. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2020.2.11>
7. Standard atomic weights of the elements 2021 (IUPAC Technical Report) / Th. Prohaska [et al.] // Pure and Applied Chemistry. 2022. Vol. 94, № 5. P. 573–600. <https://doi.org/10.1515/pac-2019-0603>

REFERENCE

1. Buzmakov SA. Anthropogenic transformation of environment. *Geographical Bulletin*. 2012;4(23):46–50. (In Russ.).
2. Kolobova AV, Konopelko LA, Popov OG. State primary standard of units of molar part, mass part and mass concentration of components in gas and gas condensate environs GET 154-2019. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2020;16(3):23–35. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2687-0886-2020-16-3-23-35>
3. Kolobova AV, Malginov AV, Nechaev AA, Koshev VA. Dynamic methods for preparing gas mixtures. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2024;20(4):76–88. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2024-20-4-76-88>
4. Malginov AV, Evdokimov AA, Gromova EV. Dissemination of units of mole fraction and mass concentration of gas components by means of first-grade working standards based on dynamic gas mixture generators. *Measuring technique*. 2011;54(9):8–12. (In Russ.).
5. Khmel'nik S. Coriolis and centrifugal forces in electrodynamics and mechanics. *The Papers of Independent Authors*. 2020;48(1):67–73. (In Russ.). <https://doi.org/10.5281/zenodo.3886486>
6. Romanov VA, Taranenko PA. The dissipative properties assessment of the oscillatory system of a serial sample of the Coriolis flowmeter. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2020;(2):134–144. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2020.2.11>
7. Prohaska Ths, Irrgeher Jo, Benefield Ja, et al. Standard atomic weights of the elements 2021 (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*. 2022;94(5):573–600. <https://doi.org/10.1515/pac-2019-0603>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Колобова Анна Викторовна – канд. техн. наук, руководитель научно-исследовательского отдела гос-эталонов в области физико-химических измерений, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»
190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19
e-mail: akol@b10.vniim.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9030-446X>

Нечаев Александр Алексеевич – аспирант, инженер, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»
190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19
e-mail: nech@b10.vniim.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anna V. Kolobova – Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of the Research Department of State Standards in the field of Physical and Chemical Measurements, D. I. Mendeleev Institute for Metrology
19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia
e-mail: akol@b10.vniim.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9030-446X>

Aleksandr A. Nechaev – Postgraduate Student, Engineer, D. I. Mendeleev Institute for Metrology
19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia
e-mail: nech@b10.vniim.ru