

Подходы и решения в рамках создания экономических систем контроля качества ксенона, используемого в электроракетных двигательных установках

Approaches and solutions for the creation of cost-effective quality control systems for xenon used in electric rocket propulsion systems

В статье рассмотрен практический результат использования комплексного управленческого и инженерного подхода к решению исследовательской задачи, цель которой заключается в создании рабочего макета системы контроля качества ксенона, обеспечивающего точный анализ примесей в ксеноне при минимальном расходе исследуемого газа. Ключевые ограничения в постановке задачи заключались в высокой стоимости исследуемого газа, доступности технологий и эксплуатационных рисках. Потребность в подобном оборудовании обусловлена крайне высокими требованиями к составу ксенона, используемого в качестве рабочего тела для электроракетных двигательных установок.

The article reviews the practical result of usage of comprehensive management and engineering approach to accomplishing a research goal, which implies creation of a working model of quality control systems for xenon that provides accurate analysis of admixtures in xenon with minimal consumption of the gas in question. Key constraints in the goal statement included high cost of the gas in question, technology availability and operational risks. The need for such equipment is connected with extremely high requirements for the composition of xenon that is used as a working medium for electric rocket propulsion systems.

Ключевые слова: космические аппараты, электроракетные двигательные установки, ксенон, примеси, газовая хроматография, кулонометрический гигрометр, макет системы контроля качества ксенона

Keywords: spacecraft, electric propulsion systems, xenon, admixtures, gas chromatography, coulometric hygrometer, model of quality control systems for xenon



**ШАПОВАЛОВА
ОКСАНА ВЯЧЕСЛАВОВНА**

К.х.н., менеджер комплексных проектов
Управления стратегического планирования
и операционной эффективности, АО «Организация «Агат»

E-mail: ShapovalovaOV@agat-roscosmos.ru

**SHAPOVALOVA
OKSANA**

Ph.D. in Chemistry, complex project manager of Strategic Planning and Operational Efficiency Directorate, JSC "Organization "Agat"



ПЕТРОВА АННА АЛЕКСЕЕВНА

Техник отдела прикладных и системных проектов Управления стратегического планирования и операционной эффективности, АО «Организация «Агат»

E-mail: PetrovaAA@agat-roscosmos.ru

PETROVA ANNA

Technician of Applied and System Projects Department of Strategic Planning and Operational Efficiency Directorate, JSC "Organization "Agat"



СТЕПАНОВ АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

Менеджер комплексных проектов отдела прикладных и системных проектов Управления стратегического планирования и операционной эффективности, АО «Организация «Агат»

E-mail: StepanovAV@agat-roscosmos.ru

STEPANOV ANDREY

Complex project manager of Applied and System Projects Department of Strategic Planning and Operational Efficiency Directorate, JSC "Organization "Agat"



**КУЗЬМИНЫХ
ПОЛИНА ДМИТРИЕВНА**

Специалист отдела прикладных и системных проектов Управления стратегического планирования и операционной эффективности, АО «Организация «Агат»

E-mail: KuzminykhPD@agat-roscosmos.ru

**KUZMINYKH
POLINA**

Specialist of Applied and System Projects Department of Strategic Planning and Operational Efficiency Directorate, JSC "Organization "Agat"



ЛИСОВ АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

Начальник Управления стратегического планирования и операционной эффективности, АО «Организация «Агат»

E-mail: LisovAA@agat-roscosmos.ru

LISOV ALEXEY

Head of Strategic Planning and Operational Efficiency Directorate, JSC "Organization "Agat"



СОКОЛОВ ИЛЬЯ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

Заместитель начальника управления – начальник отдела прикладных и системных проектов Управления стратегического планирования и операционной эффективности, АО «Организация «Агат»

E-mail: SokolovIV@agat-roscosmos.ru

SOKOLOV ILYA

Deputy Head of Directorate – Head of Applied and System Projects Department of Strategic Planning and Operational Efficiency Directorate, JSC "Organization "Agat"

Для цитирования: Шаповалова О. В. Подходы и решения в рамках создания экономических систем контроля качества ксенона, используемого в электроракетных двигательных установках / О. В. Шаповалова, А. А. Петрова, А. В. Степанов, П. Д. Кузьминых, А. А. Лисов, И. В. Соколов. // Экономика космоса. – 2025. – № 12. – С. 3–13. – DOI 10.48612/agat/space_economics/2025.04.12.01

Введение

Одной из приоритетных задач российской космической отрасли является создание многоспутниковых группировок для различных целей. Для обеспечения управления орбитальным движением космических аппаратов (далее – КА), входящих в состав таких группировок, необходимо оснащать их двигательными установками высокой эффективности для обеспечения выхода КА на целевую орбиту и последующего маневрирования. В качестве решения данной задачи активно применяют электроракетные двигательные установки (далее – ЭРДУ). Мировой спрос на данный тип двигателей растет пропорционально количеству производимых КА, а предприятия Госкорпорации «Роскосмос» являются одними из лидеров в развитии и серийном производстве ЭРДУ. Стоит отметить, что принцип функционирования ЭРДУ отличен от привычного ракетного двигателя на химических компонентах топлива. В качестве основной движущей силы выступают ионы ксенона, являющегося рабочим телом, которые «выбрасываются» из двигателя с огромной скоростью.

ЭРДУ относятся к двигательным установкам малой тяги, однако обеспечивают возможность получения чрезвычайно высоких (по сравнению с химическими ракетными двигателями) значений удельного импульса тяги. Другими словами, преимущества ЭРДУ проявляются в полной мере лишь в условиях длительного космического полета, поэтому они должны обладать высокой надежностью и большим ресурсом.

Ксенон представляет собой тяжелый благородный одноатомный газ крайне низкого содержания в атмосфере, что делает его самым дорогим среди инертных газов [1]. В ракетно-космической технике (далее – РКТ) ксенон получил активное применение за счет своих уникальных свойств: высокая степень ионизации (энергия ионизации у ксенона ниже, чем у других инертных газов), высокая степень сжимаемости (тонкостенные баки выдерживают давление, создаваемое газом, сжатым до 200 раз). Все это позволяет существенно снизить конечную массу КА и его габариты. В условиях ограниченного производства ксенона в Российской Федерации (не более 1 952 м³ в год (10 716,5 кг)) спрос на этот инертный газ в РКТ растет с каждым годом по причине увеличения количества запускаемых КА. Например, для заправки одного аппарата, выводимого на геостационарную орбиту, может потребоваться до 300 кг инертного газа [2]. Стоит отметить, что особо чистый ксенон является рыночным продуктом с ограниченным предложением, который в Российской Федерации производят только частные компании, что приводит

к высокой волатильности цен на него и трудно поддается прогнозированию. Так, по причине нестабильности производства ксенона в 2022 году его стоимость достигала 3 016 000 рублей за килограмм.

Постановка исследовательской задачи

В процессе получения и эксплуатации ксенон обогащается различными примесями, которые представляют опасность для наиболее уязвимого элемента ЭРДУ – катода. Катод в составе ЭРДУ взаимодействует с проходящим через него ксеноном при высоких температурах, постепенно испаряясь, однако при наличии реакционно способных примесей происходят разрушительные химические реакции, которые снижают эффективность катода и со временем приводят его в негодность. По этой причине ксенон подвергается тщательной очистке и контролю качества.

Существует множество требований к чистоте ксенона в зависимости от назначения. В настоящий момент марки ксенона, используемые в РКТ, производятся в соответствии с техническими условиями (далее – ТУ) и ГОСТ 10219-77 (табл. 1). Предприятия Госкорпорации «Роскосмос» не имеют возможности независимой оценки большинства показателей качества ксенона из-за отсутствия соответствующего аналитического оборудования, методик измерений и специалистов, поэтому они вынуждены обращаться к лабораториям поставщиков особо чистого ксенона за данной услугой.

Таким образом, была поставлена задача обеспечить независимый контроль качества особо чистого ксенона в контуре Госкорпорации «Роскосмос».

При выполнении научно-исследовательской работы «Ксенон» (далее – НИР «Ксенон») в проекте первой редакции стандарта организации Госкорпорации «Роскосмос» (далее – СТО ГК «Роскосмос») были определены и подтверждены экспериментально требования к чистоте рабочего тела (табл. 1), достаточные для функционирования двигателя на протяжении предусмотренного ресурса.

С учетом необходимости обеспечения низких концентраций большого разнообразия примесей в ксеноне, а также высокой стоимости газа, важно сократить расход пробы ксенона во время испытаний. Поэтому целесообразно сокращать количество измерений и подбирать аналитическое оборудование с минимальным расходом на пробы, способное измерять несколько параметров за один раз.

В настоящее время требования к ксенону в первую очередь регулируются ГОСТ 10219-77 «Ксенон. Технические условия»¹. Также существуют ТУ коммерческих производителей особо чистого ксенона, таких как ООО «Акела-Н»,

¹ ГОСТ 10219-77 «Ксенон. Технические условия» с изменениями №№ 1 – 3, М.: ИПК Издательство стандартов, 1997. – 16 с.

ООО «Хром», ЗАО «Холодгазинжиниринг» и МГТУ им. Н.Э. Баумана, в результате анализа которых выявлены неоправданно завышенные требования к содержанию примесей (табл. 1). Кроме того, существуют и зарубежные стандарты, например, стандарт Китайской Народной Республики².

В результате анализа расчетной среднегодовой потребности ракетно-космической отрасли в ксеноне прогнозируется выдача 115 паспортов на соответствие качества ксенона. Стоит отметить, что для формирования одного паспорта необходимо провести до трех анализов. Таким образом, общее количество анализов, необходимых для испытаний, составит 345 в год.

Нормативный документ	Частные технические условия	ГОСТ 10219-77	СТО ГК «Роскосмос»
Наименование примеси	Концентрация, млн ⁻¹ , не более		
Криптон (Kr)	0,001	10	10
Гелий (He)	0,01	-	10
Неон (Ne)	0,001	-	10
Азот (N ₂)	0,05	10	9,5
Кислород (O ₂)	0,02	2	1,7
Аргон (Ar)	0,01	-	10
Метан (CH ₄)	0,001	1	1
Этан (C ₂ H ₆)	0,01	-	-
Двуокись углерода (CO ₂)	0,01	1	0,6
Оксид углерода (CO)	0,01	-	0,5
Водяной пар (H ₂ O)	0,02	5	1
Тетрафторметан (CF ₄)	0,001	-	0,1
Гексафторэтан (C ₂ F ₆)	0,001	-	0,1
Гексафторид серы (SF ₆)	0,0001	-	0,1
Тетрахлорметан (CCl ₄)	0,0001	-	0,1
Фтор-, хлор-, серосодержащие вещества	0,05	-	-
Оксид азота (NO)	0,01	-	-
Окислы азота (N _m O _n)	0,05	-	-

² GB/T 5828-2006 Ксенон. Стандарт Китайской Народной Республики. – 9 с.

Водород (H_2)	0,02–0,1	-	1
Закись азота (N_2O)	0,01	-	1
Нефрас	0,0001	-	-
Органические соединения (C_nH_m)	0,0005	-	-

Табл. 1. Сравнение количественных показателей примесей в ксеноне в существующих нормативных документах и в проекте первой редакции СТО ГК «Роскосмос».

Источник: составлено авторами по результатам проведенной работы

Проблемные вопросы

Были выявлены следующие проблемы, препятствующие выполнению поставленных задач. Рассмотрим их подробнее.

1. Требования в СТО ГК «Роскосмос» по сравнению с ГОСТ 10219-77 в части перечня определяемых примесей и их количественного определения являются более строгими, что обусловлено нивелированием рисков ухудшения качества РКТ в процессе эксплуатации. В то же время по сравнению с коммерческими ТУ СТО ГК «Роскосмос» устраняет излишне «жесткие» ограничения, создавая более конкурентные условия на рынке.

В соответствии со стандартными методиками анализа, описанными в коммерческих ТУ и ГОСТ 10219-77, определение каждой примеси требует использования специализированного оборудования. В результате на проведение комплексного анализа необходимо большое количество приборов, каждый из которых в процессе измерений потребляет определенное количество ксенона. Для оптимизации процесса контроля качества необходимо разработать систему, способную определять максимальное количество примесей за одно измерение.

2. Некоторые примеси могут идентифицироваться только с использованием специализированного оборудования, например, концентрация паров воды в газах измеряется с применением влагомеров и гигрометров, так как хроматографические и масс-спектральные приборы не позволяют улавливать требуемые СТО ГК «Роскосмос» концентрации. При создании лаборатории это потребует дополнительных затрат на оборудование и расход анализируемого газа.

В условиях санкционной политики, направленной на ограничение поставок иностранного оборудования, значительно усложняется доступ к современным технологиям и компонентам. В связи с этим становится необходимым переходить к использованию отечественного оборудования, которое должно соответствовать всем современным требованиям и стандартам.

3. Для определения низких концентраций воды в ксеноне в основном используют кулонометрические и конденсационные гигрометры. Кулонометрический гигрометр измеряет влагу в газе путем электролиза воды, поглощенной специальным реагентом, при этом прошедший заряд пропорционален количеству влаги. Приборы такого типа позволяют определять низкие концентрации паров воды в газе только за счет большого объема используемой пробы. Конденсационный гигрометр измеряет точку росы газа, охлаждая зеркало до образования конденсата. Оптический датчик фиксирует этот момент, а температура зеркала соответствует точке росы, что позволяет определить влагосодержание. Достижение требуемых СТО ГК «Роскосмос» пределов обнаружения примесей возможно только при длительной «продувке» системы анализируемым газом, что приводит к значительным расходам ксенона. Согласно средним данным от производителей ксенона и с учетом необходимости продувки линий, для проведения одного анализа на содержание воды может потребоваться около 0,027 м³ ксенона. Если перевести этот объем в массу (при плотности 5,49 г/дм³ при температуре 20 °С и давлении 101,3 кПа), то это эквивалентно 0,148 кг. С учетом среднего количества анализов проб в год (345) на весь объем испытаний будет расходоваться до 52 кг ксенона, что эквивалентно 10,400 млн руб. Учитывая редкость и высокую стоимость анализируемого газа, необходимо сокращать объемы его использования для проб без ущерба точности проведения анализа.

4. При применении хроматографического метода анализа недостаточно изучено поведение ксенона в хроматографических колонках и его влияние на удерживание других примесей. Это может приводить к затруднениям в интерпретации данных и идентификации примесей. Кроме того, отсутствие утвержденных методик измерения снижает стандартизацию анализа и усложняет сравнение результатов.

Решение

Для решения выявленных проблем последовательно выполнены следующие задачи:

- проведен анализ существующих решений, представленных в нормативной и научной литературе;
- изучено оборудование, используемое производителями ксенона;
- направлены запросы производителям оборудования для выбора оптимального решения задачи.

В большинстве опубликованных работ, посвященных определению содержания примесей в различных средах, включая газы, используется хроматографическое оборудование [3–6]. В рассмотренной литературе отсутствуют достоверные данные о комплексном определении всех примесей в ксеноне, перечисленных в табл. 1, на требуемом уровне. Чаще всего встречается информация о содержании в ксеноне азота, кислорода, углекислого и угарного газа, углеводов, а также различных видов фреонов³ [7–8].

Методы анализа отличаются, как и используемое оборудование: применяются разные неподвижные фазы (сорбенты) для разделения компонентов смеси и различные детекторы для регистрации сигналов. В большинстве источников

пределы обнаружения компонентов либо не указываются, либо определяются в зависимости от поставленной задачи, с возможностью их снижения при необходимости.

Анализ научной литературы также показал, что для определения примесей может использоваться и масс-спектрометрическое оборудование.

Согласно методикам определения компонентов, в коммерческих ТУ и ГОСТ 10219-77 производители ксенона для контроля качества своей продукции используют в основном газовые хроматографы и приборы для измерения влажности газов, дополнительно используются ИК-спектрометры и масс-спектрометры. Однако по результатам опросов производителей ксенона, работающих по ТУ, на практике чаще применяют газовые хроматографы в сочетании с ИК-Фурье-спектрометром и гигрометром.

Таким образом, были сформированы две потенциальные комплектации оборудования (табл. 2), способные обеспечить обнаружение примесей в соответствии с требованиями в СТО ГК «Роскосмос». Следующим этапом необходимо определить практические возможности данных комплекций оборудования и провести экономическую оценку для выбора наиболее целесообразного варианта.

№ п/п	Определяемый показатель качества	Комплектация №1	Комплектация №2		
		Масс-спектрометр	Газовый хроматограф	ИК-Фурье-спектрометр	Гигрометр
1	Ксенон (Xe)	✓	✓		
2	Криптон (Kr)	✓	✓		
3	Неон (Ne)	✓	✓		
4	Гелий (He)	✓	✓		
5	Аргон (Ar)	✓	✓		
6	Азот (N ₂)	✓	✓		
7	Кислород (O ₂)	✓	✓		
8	Водяной пар (H ₂ O)	✓			✓
9	Оксид углерода (CO)	✓	✓		

³ Ксенон [Электронный ресурс] // Справочник химика 21. Химия и химическая технология: [сайт]. [2025]. URL: <https://www.chem21.info/1920511/> (дата обращения: 01.03.2025).

10	Двуокись углерода (CO ₂)	✓	✓		
11	Оксид азота (N ₂ O)	✓		✓	
12	Тетрафторметан (CF ₄)	✓		✓	
13	Гексафторэтан (C ₂ F ₆)	✓		✓	
14	Гексафторид серы (SF ₆)	✓		✓	
15	Тетрахлорметан (CCl ₄)	✓		✓	
16	Метан (CH ₄)	✓	✓	✓	
17	Водород (H ₂)	✓	✓		

Табл. 2. Возможности предлагаемого оборудования для контроля примесей.
Источник: составлено авторами по результатам проведенной работы

Опрос производителей показал, что отечественные компании не имеют опыта в разработке оборудования для анализа примесей в ксеноне в соответствии с заданными требованиями. В связи с этим единственным возможным решением стало проведение дополнительных исследований для выбора подходящего оборудования.

Для эксперимента были привлечены две отечественные компании – производители аналитического оборудования. Их задача заключалась в определении примесей в газе при минимальном объеме пробы. В рамках исследования подготовлены специальные газовые смеси с известной концентрацией примесей, соответствующие требованиям СТО ГК «Роскосмос». Разработку уникальных смесей выполнила компания ООО «МОНИТОРИНГ» (см. табл. 3).

Смесь «X1» соответствует требованиям СТО ГК «Роскосмос», тогда как смеси «X50» и «X500» содержали примеси в концентрациях, кратно превышающих допустимую объемную долю (за исключением Kr, N₂, Ne, He, Ar и H₂).

Смесь «X1» (№1) была отправлена производителю газовых хроматографов для проведения испытаний. Аналогично, смеси «X1» (№2), «X50» (№3) и «X500» (№4) направили производителю масс-спектрометров.

После проведения испытаний производитель масс-спектрометра отметил, что оборудование является наукоемким и уникальным, поэтому для его эксплуатации требуется высокая квалификация сотрудников. Кроме того, отсут-

ствуют утвержденные методики, а их разработка займет длительное время. Результаты качественного и количественного анализа, полученные с использованием данного оборудования, не могут быть воспроизведены на аналогичном оборудовании в соответствии с ГОСТ или ТУ на ксенон, так как в этих документах предусмотрено применение газовых хроматографов.

После проведения испытаний производитель газовых хроматографов предложил перейти на газовую хромато-масс-спектрометрию (далее – ГХМС), так как она обеспечивает значительно более низкий предел обнаружения для основного перечня примесей, а также позволяет анализировать все примеси, за исключением воды, согласно требованиям (табл. 4)⁴.

При использовании ГХМС нет необходимости разделять все компоненты смеси, хроматографически должны быть разделены лишь те примеси, массы которых накладываются друг на друга. Применение данного метода позволило решить проблему неидентифицированных примесей в случае ее возникновения. Одним из преимуществ хроматографии является возможность относительно простой замены детектора на более чувствительный, например, при изменении нормативов и необходимости снижения предела обнаружения. В отличие от этого для масс-спектрометра такое изменение требует значительной модификации всего прибора, что делает покупку нового устройства более экономически целесообразной.

⁴ Патент на изобретение 2227291 Российская Федерация, МПК G 01 N 30/72, B 01 D 59/44. Способ определения содержания примесей в ксеноне: 2002111318/28: заявл. 25.04.2002, опубл. 20.04.2004. Патентообладатель: ФГУП «Уральский электрохимический комбинат». – 6 с.

Наименование показателя	Объемная доля в составе смеси «X1» №1	Объемная доля в составе смеси «X1» №2	Объемная доля в составе смеси «X50» №3	Объемная доля в составе смеси «X500» №4
Ксенон (Xe)	основа	основа	основа	основа
Криптон (Kr), млн ⁻¹	10,70	10,60	11,30	10,90
Азот (N ₂), млн ⁻¹	10,90	10,80	11	11,30
Кислород (O ₂), млн ⁻¹	2	2,10	101	1070
Метан (CH ₄), млн ⁻¹	0,98	0,99	52	550
Диоксид углерода (CO ₂), млн ⁻¹	0,75	0,75	38	396
Водяной пар (H ₂ O), млн ⁻¹	4,90	4,80	247	385
Монооксид углерода (CO), млн ⁻¹	0,52	0,51	24	258
Оксид диазота (N ₂ O), млн ⁻¹	1,03	1,02	52	520
Гексафторид серы (SF ₆), млн ⁻¹	0,12	0,12	5,90	57
Тетрафторметан (CF ₄), млн ⁻¹	0,11	0,11	5,80	55
Гексафторэтан (C ₂ F ₆), млн ⁻¹	0,12	0,12	5,80	52
Тетрахлорметан (CCl ₄), млн ⁻¹	0,11	0,11	5,90	54
Неон (Ne), млн ⁻¹	10,20	10,30	10,80	10,50
Гелий (He), млн ⁻¹	10,40	10,20	10,80	10,70
Аргон (Ar), млн ⁻¹	10,40	10,20	10,40	10,80
Водород (H ₂), млн ⁻¹	1,02	1,01	1,02	1,04

Табл. 3. Характеристики смесей X1, X50, X500.

Источник: составлено авторами по результатам проведенной работы

Также стоит отметить, что анализ производителей ИК-Фурье-спектрометров показал, что расход ксенона на заполнение кюветы для одного анализа превышает 0,021 м³ (0,115 кг). Кроме того, 20-метровая газовая кювета зарубежного производства, используемая при измерениях, входит в санкционный список. Учитывая необходимость экономии объема пробы и отсутствие комплектующих, использование ИК-Фурье-спектрометра было исключено из дальнейшего рассмотрения.

Критическим элементом комплектации стал гигрометр. Для определения требуемой концентрации количество расходуемого газа достигает 0,06 м³ (0,329 кг).

Для решения проблемы высокого потребления ксенона при детектировании воды были отправлены запросы нескольким производителям гигрометров. Компания ООО «НПО «Вымпел» согласилась в кратчайшие сроки доработать кулонометрический гигрометр HygroTrase собственного производства⁵. Работы проводились по ини-

⁵ Анализатор влажности «HygroTrase». Руководство по эксплуатации ВМГП2.848.019 РЭ, ООО «НПО «Вымпел». – 28 с.

циативе ООО «НПО «Вымпел» с использованием собственных газов, что исключило дополнительные расходы.

В ходе доработки инженеры компании оптимизировали режим работы основного чувствительного элемента и оснастили газовую схему модулем дополнительной осушки, что

позволило минимизировать затраты анализируемого газа. Также немалую роль сыграло нанесение сульфидного нанокompозитного покрытия Incomsteel на все внутренние поверхности газовой системы прибора⁶.

В ходе тестирования модернизированного гигрометра

№ п/п	Определяемый показатель качества	Комплектация №2			Комплектация №3	
		Газовый хроматограф	ИК-Фурье- спектрометр	Гигрометр	ГХМС	Гигрометр
1	Ксенон (Xe)	✓			✓	
2	Криптон (Kr)	✓			✓	
3	Неон (Ne)	✓			✓	
4	Гелий (He)	✓			✓	
5	Аргон (Ar)	✓			✓	
6	Азот (N ₂)	✓			✓	
7	Кислород (O ₂)	✓			✓	
8	Водяной пар (H ₂ O)			✓		✓
9	Оксид углерода (CO)	✓				
10	Двуокись углерода (CO ₂)	✓				
11	Оксид азота (N ₂ O)		✓			
12	Тетрафторметан (CF ₄)		✓		✓	
13	Гексафторэтан (C ₂ F ₆)		✓		✓	
14	Гексафторид серы (SF ₆)		✓		✓	
15	Тетрахлорметан (CCl ₄)		✓		✓	
16	Метан (CH ₄)	✓	✓		✓	
17	Водород (H ₂)	✓			✓	

Табл. 4. Возможности нового оборудования для контроля примесей.
Источник: составлено авторами по результатам проведенной работы

⁶ Сульфидные нанокompозитное покрытие incomsteel [Электронный ресурс] // НИЦ «Инкомсистем»: [сайт]. [2025]. URL: <https://incomsystem.ru/corrosion-coatings/> (дата обращения: 05.03.2025).

было установлено, что средний расход ксенона на один анализ не превышает $0,003 \text{ м}^3$ ($0,016 \text{ кг}$), что значительно меньше первоначального показателя в $0,03 \text{ м}^3$ ($0,165 \text{ кг}$). Основная часть расходуемого газа приходится на продувку системы и предварительных газовых магистралей. Поскольку эти магистрали входят в состав ГХМС, было выдвинуто предложение о целесообразности объединения двух приборов в единый контур.

В результате специалисты предприятия-производителя газовых хроматографов объединили ГХМС и гигрометр в единую газовую схему с выводом сигналов на общий прибор обработки информации. Все предварительные газовые магистрали были обработаны сульфидным покрытием. В результате объединения был создан макет системы контроля качества ксенона, обеспечивающий расход газа на один анализ не более $0,003 \text{ м}^3$ ($0,016 \text{ кг}$) (рис. 1).



Рис. 1. Макет системы контроля качества ксенона.
Источник: фото авторов

Заключение

В результате проведенной работы была выявлена сложная научная проблема, связанная с обеспечением отрасли специальным оборудованием с уникальными характеристиками. Несмотря на отсутствие готового решения задача была успешно решена благодаря проведению дополнительных научных исследований совместно с производителями оборудования.

Созданная система контроля качества ксенона не только

обладает высокой точностью измерений по 16 показателям примесей, но и существенно экономит расход газовой пробы (с $0,38$ до $0,03 \text{ кг}$ на один полный анализ) и рабочее время оператора (за счет одновременного определения всех примесей), что позволит сэкономить до $6,5 \text{ кг}$ ксенона при заправке одного космического аппарата. При текущих ценах на ксенон (около 200 рублей за грамм) суммарная экономия на ксеноне составит не менее 22 миллионов рублей в год.

Список литературы

1. Бондаренко В. Л. Криогенные технологии извлечения редких газов: монография / В. Л. Бондаренко, Ю. М. Симоненко. – Одесса: Астропринт, 2013. – 330 с.; ISBN 978-966-190-762-0. – Текст: непосредственный.
2. Ермошкин Ю. М. Применение двигательной подсистемы на базе плазменного двигателя СПД-100В для довыведения и коррекции орбиты космических аппаратов «Эксперсс-80» и «Эксперсс-103» / Ю. М. Ермошкин, А. А. Внуков, Д. В. Волков, Ю. В. Кочев, Р. С. Симанов, Е. Н. Якимов, Г. С. Грихин. – Текст: непосредственный // Сибирский аэрокосмический журнал, 22 (3). – 2021. – С. 480–493.
3. Крылов В. А. Газохроматографический анализ высокочистых летучих агрессивных веществ / В. А. Крылов. – Текст: непосредственный // Российский химический журнал. – Т. XLVII, № 1. – 2003. – С. 55–63.
4. Стойкова Е. Е. Анализ следовых количеств веществ / Е. Е. Стойкова, А. В. Порфирьева, Г. А. Евтюгин. – Казань: Изд-во КГУ, 2010. – 72 с. – Текст: электронный. – URL: https://kpfu.ru/staff_files/F1554266616/Analiz.sledovyh.kolichestv.veschestv.pdf (дата обращения: 05.03.2025).
5. Бондаренко В. Л. Экономические аспекты технологии производства криптона и ксенона / В. Л. Бондаренко, И. А. Лосяков, О. В. Дьяченко. – Текст: непосредственный // Третья международная научно-практическая конференция «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения». – 2020. – С. 59–68 с.
6. Федоров А. В. Криптон в современных системах хранения высокочистых газов / А. В. Федоров, М. Ю. Куприянов. – Текст: непосредственный // Холодильная техника. – Т. 112, № 3. – 2023. – С. 119–128.
7. Павленко А. П. Определение микропримесей в высокочистых газах на газовом хроматографе «Хромос GX-1000»: магистрская диссертация / А. П. Павленко; Национальный исследовательский Томский политехнический институт; науч. рук. А. А. Зайков. – Томск, 2018. – 116 с. – Текст: непосредственный.
8. Савинов М. Ю. Исследование рабочих процессов и разработка современных криогенных технологий в производстве криптона и ксенона: автореферат дисс. ... доктора технических наук: 05.04.03 / Савинов М. Ю.; [Место защиты: С.-Петерб. гос. ун-т низкотемператур. и пищевых технологий]. – СПб., 2008. – 36 с. – Текст: непосредственный.

List of literature

1. Bondarenko V. L. Cryogenic technologies for the extraction of rare gases: a monograph / V. L. Bondarenko, Y. M. Simonenko. – Odessa: Astroprint, 2013. – 330 p.; ISBN 978-966-190-762-0. – Text: direct.
2. Ermoshkin Y. M. Application of the propulsion subsystem based on the SPD-100V plasma engine for pre-launch and orbit correction of the Experss-80 and Experss-103 spacecraft / Y. M. Ermoshkin, A. A. Vnukov, D. V. Volkov, Y. V. Kochev, R. S. Simanov, E. N. Yakimov, G. S. Grikin. – Text: direct // Siberian Aerospace Journal, 22 (3). – 2021. – pp. 480–493.
3. Krylov V. A. Gas chromatographic analysis of high-purity volatile aggressive substances / V. A. Krylov. – Text: direct // Russian Chemical Journal. – Vol. XLVII, № 1. – 2003. – pp. 55–63.
4. Stoikova E. E. Analysis of trace amounts of substances / E. E. Stoikova, A. V. Porfirieva, G. A. Evtyugin. – Kazan: KSU Publishing House, 2010. – 72 p. – Text: electronic. – URL: https://kpfu.ru/staff_files/F1554266616/Analiz.sledovyh.kolichestv.veschestv.pdf (accessed: 05.03.2025).
5. Bondarenko V. L. Economic aspects of krypton and xenon production technology / V. L. Bondarenko, I. A. Losyakov, O. V. Dyachenko. – Text: direct // The third International scientific and practical conference “Refrigeration and cryogenic equipment, air conditioning and life support systems”. – 2020. – pp. 59–68 p.
6. Fedorov A. V. Krypton in modern high-purity gas storage systems / A. V. Fedorov, M. Y. Kupriyanov. – Text: direct // Refrigeration technology. – Vol. 112, № 3. – 2023. – pp. 119–128.
7. Pavlenko A. P. Determination of trace elements in high-purity gases on the Chromos GC-1000 gas chromatograph: master's thesis / A. P. Pavlenko; National Research Tomsk Polytechnic Institute; scientific director A. A. Zaikov. – Tomsk, 2018. – 116 p. – Text: direct.
8. Savinov M. Y. Research of work processes and development of modern cryogenic technologies in the production of krypton and xenon: abstract of the dissertation ... Doctor of Technical Sciences: 05.04.03 / Savinov M. Y.; [Place of defense: St. Petersburg State University of Low Temperatures. and food technology]. – St. Petersburg, 2008. – 36 p. – Text: direct.

Рукопись получена: 14.03.2025

Рукопись одобрена: 19.06.2025