DOI: https://doi.org/10.17816/RF625543

Криптон в современных системах хранения высокочистых газов

А.В. Федоров, М.Ю. Куприянов

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Криптон — ценный ресурс природы, имеющий большое значение для современной промышленности, медицины, науки. В статье рассматривается вопрос сохранения чистоты данного инертного газа различных марок, описаны основные процессы, которые могут оказать влияние на количество примесей в газе, освещен вопрос о применении криптона в настоящее время. Приведены экспериментальные данные, нацеленные на проработку вопросов о методике подготовки поверхностей перед контактом с высокочистым криптоном. В том числе проведена оценка количества примесей от времени подготовки тары для марки газа 5.8 и получены зависимости влагосодержания от метода подготовки и типа поверхности, которая находится в контакте с высокочистым газом. Кроме того, собрана статистика по наполнению тары аргоном марки 6.0 и ее предварительной подготовки. Для оценки параметров используются баллоны с различным типом поверхности как не бывшие в использовании, так и со сроком эксплуатации более 10 лет. В статье показано многообразие параметров, которые могут влиять на чистоту инертного газа. Благодаря данным, собранным в процессе экспериментов, становится возможным скорректировать требования к следующим работам.

Ключевые слова: Инертные газы; криптон; поверхности; чистота газа; примеси; адсорбция; диффузия.

Как цитировать:
Федоров А.В., Куприянов М.Ю. Криптон в современных системах хранения высокочистых газов // Холодильная техника. 2023. Т. 112, № 3. С. 119–128. DOI: https://doi.org/10.17816/RF625543

Рукопись получена: 11.01.2024 **Рукопись одобрена:** 05.07.2024 **Опубликована онлайн:** 25.07.2024

ЭКО • ВЕКТОР

Статья доступна по лицензии CC BY-NC-ND 4.0 International
© Эко-Вектор, 2023

DOI: https://doi.org/10.17816/RF625543

Krypton in modern high-purity gas storage systems

Aleksandr V. Fedorov, Maksim Yu. Kupriyanov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Krypton is a significant natural resource with great importance for modern industry, medicine, and science. This article considers the issue of preserving the purity of this inert gas of various grades, describes the main processes that can affect the amount of impurities in krypton, and highlights its current applications. Experimental data aimed at elaborating questions about the methodology of surface preparation before contact with high-purity krypton are presented. Moreover, the amount of impurities from the time of container preparation for gas grade 5.8 is evaluated, and dependences of moisture content on the method of preparation and type of surface, which is in contact with high-purity gas, are obtained. Further, statistics on filling containers with argon grade 6.0 and its preliminary preparation are collected. For parameter estimation, cylinders with different types of surfaces are used, both unused and with a service life of more than 10 years. The paper shows various parameters that can affect the purity of krypton. Thanks to the data collected during the experiments, the requirements for future works can be adjusted.

Keywords: inert gases; krypton; surfaces; purity of gas; impurities; adsorption; diffusion.

To cite this article:
Fedorov AV, Kupriyanov M.Yu. Krypton in modern high-purity gas storage systems. *Refrigeration Technology.* 2023;112(3):119–128.
DOI: https://doi.org/10.17816/RF625543

Received: 11.01.2024 **Accepted:** 05.07.2024 **Published online:** 25.07.2024

ECO•VECTOR

The article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 International license
© Eco-Vector, 2023

ОСНОВНАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ГАЗЕ

Криптон — это одноатомный газ без цвета и запаха. В связи с трудностями получения вещества был назван kryptós, что с греческого переводится как «скрытый». В периодической системе химических элементов Д.И. Менделеева занимает место в VIII группе главной подгруппе вместе с гелием, неоном, аргоном, ксеноном, радоном и оганесоном. Указанный ряд газов называют инертными или благородными по причине их низкой химической активности ввиду того, что их внешняя электронная оболочка полностью заполнена [1, стр. 522].

На сегодняшний день известно 33 нуклида криптона, занимающих диапазон масс от 69 до 101. Распределение стабильных нуклидов криптона в атмосфере показано на рис. 1. В воздухе также аккумулируется радиоактивный ^{85}Kr, который относится к группе глобальных атмосферных загрязнителей, так как может вызывать ряд негативных геофизических процессов (грозы, смерчи и проч.). Данный процесс становится возможным из-за достаточно большого периода полураспада нуклида (10,72 года). Его накопление преимущественно происходит при процессах испытания атомного оружия, создания оружейного плутония, работы АЭС. Природные источники данного нуклида вносят значительно меньший вклад [2, стр. 11, 3].

Криптон содержится в атмосферном воздухе, где его запасы оцениваются в $5{,}3 \cdot 10^{12}$ м^3, при этом, по объему он занимает всего $1{,}14 \cdot 10^{-4}$ %. Несмотря на указанное обстоятельство, получение криптона как побочного продукта в процессе разделения воздуха является основным видом его производства. Криптон также содержится в газах урансодержащих минералов (от 2,5 до 3,0% по массе) и в отработанном ядерном топливе [1, 4].

Несмотря на то, что криптон является инертным газам, так как его внешняя электронная оболочка заполнена, его химические соединения существуют и подразделяются на 3 группы: кристаллогидратные соединения, клатратные соединения, валентные химические соединения [2 стр. 12].

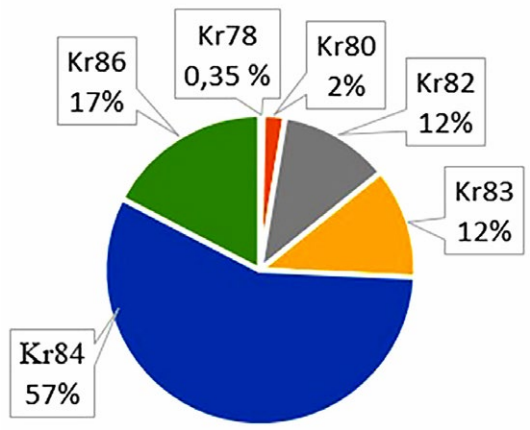

Рис. 1. Содержание изотопов в атмосферном воздухе в % по объему.
Fig. 1. Isotope content in atmospheric air in percentage by volume.

ОТКРЫТИЕ КРИПТОНА

Криптон как химический элемент открыли в 1898 году британский ученый нобелевский лауреат Ульям Рамзай и его помощник шотландский химик Морис Уильям Траверс в процессе поиска гелия в высококипящих фракциях воздуха. Благодаря созданию в 1890-х годах холодильных машин, работающих на эффекте Джоуля–Томсона, стало возможно получать воздух в жидком виде в достаточных для экспериментов объемах. В дальнейшем, ученые методами спектрального анализа при фракционированном испарении жидкого воздуха смогли обнаружить криптон, увидев спектр с красными и зелеными линиями [5, 6].

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИПТОНА

Криптон достаточно широко применяется при производстве различного вида ламп. При замене газовой смеси, состоящей из аргона (85%) и азота (15%), на данный инертный газ становится возможным получить большую световую отдачу, уменьшить объем колбы и увеличить долю видимого излучения благодаря большей плотности криптона в сравнении с аргоном (3,74 против 1,78 кг/м^3 при 0 °С и 0,101 МПа) [7, 8 стр. 249].

Помимо ламп накаливания криптон также может являться средой для люминесцентных ламп, в газосветных трубках низкого давления, которые используются для рекламы, сигнализации и др., а также для ламп высокого давления, яркий белый свет (с розоватым оттенком) которых необходим в лакокрасочной и текстильной промышленностях, для освещения сцен телестудий, при киносъемках. Некоторые из таких ламп используются как источник инфракрасного излучения [4, 9].

В 1967 году в США появились так называемые атомные лампы, принцип работы которых основывался на наличии радиоизотопов криптона ^{85}Kr, излучение которого вызвано специальным составом, соответственно для работы данным изделиям не требовалось электричество. Такие лампы использовались на железных дорогах и рудниках, а их свет был виден на расстоянии 500 м. [4]

Для строительной отрасли крайне важным элементом являются окна, которые прошли путь от простых отверстий к сложным системам. В настоящее время активно используются герметичные стеклопакеты с использованием криптона или аргоно-криптоновой смеси. При заполнении внутреннего пространства инертным газом благодаря низкой теплопроводности криптона удается повысить теплоизоляционные свойства окон и снизить потери тепла из помещения, что снижает нагрузку на систему поддержания климатических условий, а также себестоимость остекления за счет использования однокамерных стеклопакетов вместо двухкамерных.

DOI: https://doi.org/10.17816/RF625543

В Российской Федерации на базе «Исследовательского центра имени М.В. Келдыша» разрабатываются ионные двигатели для использования на геостационарных аппаратах, транспортных модулях и межорбитальных буксирах для коррекции орбит космических аппаратов на геостационарной орбите, доведении аппарата на рабочую орбиту, а также в качестве маршевых двигательных установок на межпланетных зондах. Принцип работы ионных двигателей основан на создании реактивной тяги на базе ионизированного газа, разогнанного до высоких скоростей в электрическом поле, а основными характеристиками являются тяга, удельный импульс тяги, КПД, ресурс огневой работы [10, 11].

На форуме «Армия-2022» генеральный директор центра В.В. Кошлаков рассказал, что в настоящее время происходит подбор альтернативных рабочих тел ионных двигателей для замены ксенона из-за его высокой стоимости и ограниченности объемов производства. Научно-исследовательские работы проходят с учетом требований к массе газа, а также воздействий на внутренние системы аппарата, такие как солнечные батареи, оптика и другие. Среди рассматриваемых газов называются криптон и аргон [12].

В медицине криптон нашел применение в создании безопасных газовых сред с заданными параметрами для дыхания [6]. Такие газовые смеси применяются в водолазной практике, космической отрасли и медицине для анестезии в случае использования под повышенным давлением и лечения при нормальном давлении, которое возможно благодаря противовирусному действию криптона на организм человека [13, 14, 15].

Импульсные лампы, заполненные криптоном, применяются для нужд внутриполостной медицинской фотографии, в качестве портативных электронных фотовспышек и оптической накачки лазеров. [16]

Радиоактивные изотопы используются в качестве источника бета-излучения. Например, изучение функции легких происходит при помощи гамма-камер, которые регистрируют распространение газа по различным участкам органа после того, как пациент вдохнул порцию газа.

По концентрации радиогенного криптона в урансодержащих минералах определяют их возраст, по концентрации космогенного криптона в метеоритах и в лунном грунте — радиационный возраст [17].

Также криптон применяется в следующих областях:

- Для создания мощных лазеров наряду с гелием и аргоном [18].
- Для обнаружения течей в вакуумных установках [17].
- В качестве изотопного индикатора при исследовании коррозии [17].
- Для контроля износа деталей [17].
- В научных исследованиях.

Следует отметить, что с 1960 по 1983 год, эталоном метра было значение 1650763,73 длины волны в вакууме оранжевой линии криптона-86. До него эталоном считался платино-иридиевый стержень, а после метр стал определяться как длина пути, проходимая светом (плоской электромагнитной волной) в вакууме за интервал времени, равный 1/299792458 секунды. Данные изменения объясняются тем, что с течением времени росла необходимость в более высокой точности линейных измерений [19, 20].

ПРОИЗВОДСТВО КРИПТОНА

Поставками чистого криптона занимаются различные мировые производители в Америке и Европе, причем предлагаемая марка газа в основном составляет 5.0 и более. Производство криптона высокой чистоты требует не только оборудования и отточенной методики получения газа, но и достаточной квалификации и профессионализма сотрудников, так как нужно грамотно обеспечить организацию производства, в том числе непростой процесс очистки инертного газа от воды [22], а также эксплуатацию наукоемкого оборудования для анализа получаемого продукта [23]. Например, получение криптона с чистотой 7.0 невозможно на обычных установках и требует дополнительного химического оборудования.

Однако, важным вопросом в работе с высокочистыми газами является не только их производство, но и сохранение чистоты продукта в процессе закачки в тару, хранении газа и подачу в системы потребителя. Для этого необходимо правильно подготовить все поверхности, которые будут находится в контакте с чистым криптоном. По характеру убывания количества примесей при увеличении чистоты газа, представленному на рис. 2, можно сделать вывод, что влияние подготовки тары и коммуникаций для марок газа 4.0 и 7.0 в разы отличается. Это демонстрирует, что требуется четкая проработка методик удаления примесей с поверхностей, контактирующих с продукционным криптоном, чтобы минимизировать трудозатраты при сохранении качества продукта. Характерно, что основные примеси для каждой марки газа нормируются на уровне 10–20% от общего количества. Например, количество

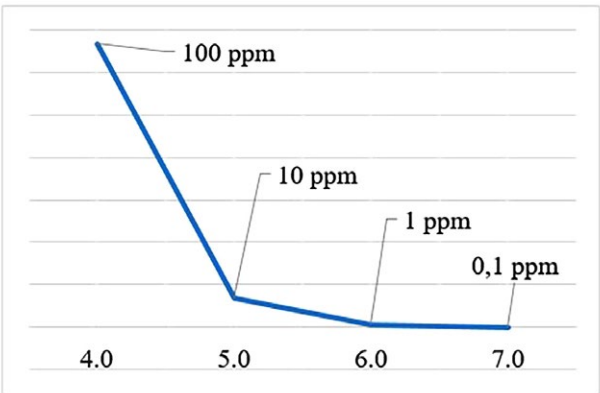

Рис. 2. Зависимость количества примесей от чистоты газа.
Fig. 2. Dependence of the amount of impurities on gas purity.

азота в газе маркой 4.0 может составляет порядка 10 ppm (parts per million, 1 ppm = 10^{-6} моль/моль).

Существует несколько способов подготовки поверхностей для работы с высокочистыми газами, которые позволяют обезгазить твердое тело, то есть довести содержание газа в нем до возможного минимума и тем самым устранить опасность газовыделения из материалов и деталей, которое может стать причиной загрязнения высокочистого криптона [23]:

- Нагрев поверхности;
  вакуумирование системы с ее нагревом хорошо применимо при условии, что молекула вещества адсорбирована поверхностью, однако, химические связи не образованы, и она сохраняет свойства молекулы газа.
- Фотоактивация;
  позволяет добиться высвобождения химически или физически адсорбированного атома путем подвода энергии посредством фотонного поглощения без добавления теплоты.
- Ультразвуковая десорбция;
  используется для очистки металлических вакуумных систем в условиях вакуума. Часто используется для удаления водяного пара.
- Электронная и ионная стимуляция;
  происходит бомбардировка поверхностей с мономолекулярным слоем. Позволяет достичь сверхвысокого вакуума.

Рассмотрим первый способ подготовки тары. Для установки сосудов с последующим нагревом используется металлический кожух с нагревательными элементами внутри. Схему такой установки можно увидеть на рис. 3. В данной работе в качестве насоса для откачки используется безмаслянный, спиральный форвакуумный насос с быстротой откачки 0,016 $м^3$/с и остаточным давлением в 1 Па.

Также дополнительно для удаления влаги с поверхностей сосудов используется продувка сухим азотом. Изначально давление в таре откачивается до значений в 1 кПа, далее происходит заполнение сухим азотом до давления 51 кПа. Цикл продувки заканчивается откачкой газа из сосуда до давления в 1 кПа.

В процессе проектирования и создания тары и коммуникаций под высокочистые газы важно помнить, что они должны по возможности минимизировать взаимодействие на границе твердое тело/газ. Могут иметь место следующие процессы [23]:

- Испарение материалов вакуумной камеры.

На этапе подготовки поверхностей вакуумированием с нагревом могут начать испаряться материалы вакуумной камеры. Это происходит в случае понижения давления в камере ниже давления насыщенных паров материала. Хотя сталь имеет низкое давление пара, тем не менее в ней могут быть включения с высоким давлением паров, используемые для легирования (сера, фосфор, селен), находящиеся в составе противокоррозионного покрытия (кадмий, селен, сера, фосфор), необходимые для механической обработки. В данном случае компоненты диффундируют к поверхности и увеличивают газовую нагрузку.

- Газовыделение адсорбированных веществ.

Происходит при вакуумировании системы и /или нагревании ее при высоком давлении пара. Сложность может возникнуть в случае хемосорбции, когда газ повышенной плотности, твердые вещества или жидкости «приклеиваются» к поверхности. Удаление адсорбированных веществ является ключевой задачей подготовки поверхностей.

Стоит отметить воду, как вещество, которое легко химически сорбируется на металлических поверхностях, находящихся под воздействием воздуха.

- Проницаемость.

Диффузия газа из внешней стороны стенки вакуумной системы к внутренней. Скорость проницаемости изменяется в зависимости от перепадов давления, температуры и толщины стенки согласно законам Фика.

- Объемная и поверхностная диффузия.

Молекулы газа увлекаются внутрь металлической решетки и диффундируют по границам зерен либо в большом количестве прикрепляться к поверхности. Скорость диффузии изменяется в зависимости

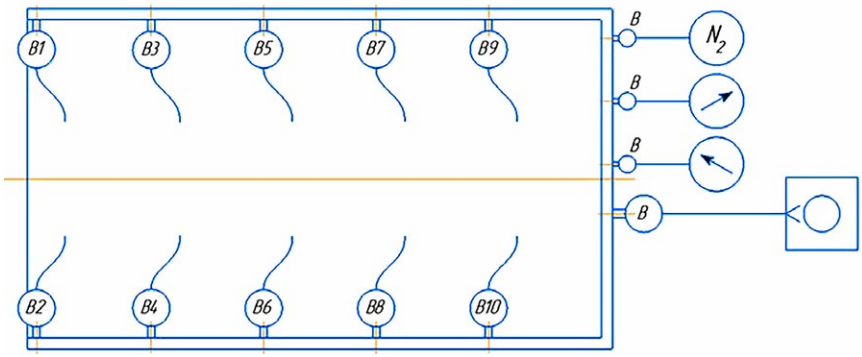

Рис. 3. Схема установки для термовакуумной подготовки тары под высокочистый криптон B, B1–B10 — запорно-регулирующая арматура; N2 — источник газообразного азота.
Fig. 3. Schematic diagram of the unit for thermovacuum preparation of containers for high-purity krypton B. B1–B10, control valves; N2, gaseous nitrogen source.

DOI: https://doi.org/10.17816/RF625543

от перепадов давления, температуры и толщины стенки согласно законам Фика.

Учитывая процессы, которые были описаны выше, можно сделать вывод, что правильный выбор материала систем, которые контактируют с высокочистыми газами поможет снизить воздействия на продукт и сохранить его чистоту. Среди характеристик можно выделить шероховатость поверхности. Чем данный параметр больше, тем больше площадь поверхности, которая не только адсорбирует на себе загрязняющие вещества и малые частицы, но и затрудняет их удаление. Шероховатость и пористость поверхности также допускает капиллярную конденсацию, из-за которой процесс удаления водяного пара из системы становится сложнее. Для борьбы с приведенными факторами используют бомбардировку стеклянной дробью, электрополировку, химическое травление и пассивацию.

Существенное влияние могут оказывать оксидные пленки на поверхности металлических деталей, которые способствуют задержке водяного пара. Однако, они также могут специально создаваться для защиты изделий от коррозии и влияния агрессивных сред, например, кислорода. Роль оксидных пленок и их влияние на системы для высокочистых газах предстоит изучить в будущих экспериментах.

В процессе эксперимента была использована тара с различным типом поверхностей, которые находятся в контакте с высокочистыми газами. Варианты приведены в табл. 1.

Для эксперимента № 1 было подготовлено 20 емкостей типа 1. Откачка проводилась на протяжении 48, 60, 72 и 84 часов с пятикратной продувкой сухим азотом. Целью эксперимента являлось получение зависимостей содержания примесей в продукционном газе от времени подготовки поверхностей. В первую очередь ожидалось увидеть различия в количественных показаниях азота и воды в криптоне, так как состояние тары и коммуникаций непосредственно влияет на эти примеси. После подготовки сосуды заполнялись продукционным криптоном до высокого давления и анализировались на суммарные примеси, углеводороды и воду. В процессе анализа суммарных примесей, куда входит и азот, использовался гелиевый ионизационный детектор (ГИД). Проводилось несколько анализов до получения разницы между двумя измерениями не более чем в 5%. Для анализа на воду на гигрометре требовался дрейф показаний не более 5% за 30 мин. В качестве результата были взяты среднее арифметическое пяти показателей для каждого времени подготовки. Зависимости, полученные по итогам эксперимента, можно увидеть на рис. 4. В суммарные примеси также входят кислород и аргон.

В результате данной работы были получены сосуды с криптоном чистотой 5.8. Из зависимостей на рис. 4 видно, что подготовка длительностью 48 часов позволяет получить количественное содержание воды и азота, соответствующее марке газа 5.0 с большим запасом, что делает возможным в будущих экспериментах уменьшить время подготовки сосудов для данного уровня примесей. При откачке на протяжении 60 часов и выше количество воды соответствует чистоте 6.0, однако азот находится на уровне 0,2 ppm, что является критичным для получения криптона марки 6.0.

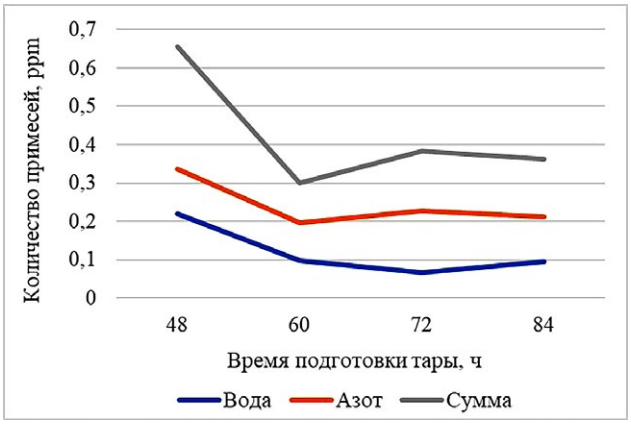

Рис. 4. Зависимость количества примесей от времени подготовки в криптоне маркой 5.8.
Fig. 4. Dependence of the amount of impurities on the preparation time in 5.8-grade krypton.

Таблица 1. Типы сосудов, используемые в экспериментах
Table 1. Vessel types used in the experiments

	Объем, л	Материал	Термообработка, °C	Толщина стенки, мм	Метод изготовления	Срок эксплуатации
Тип 1	50	Сталь 34CrMo4	Закалка 860 Охлаждение (вода) Отпуск 630	5,3	Бесшовный	Не был
Тип 2	50	Сталь 34CrMo4	Закалка 835 Охлаждение 45 (воздух) Отпуск 580	4,85	Бесшовный	Не был
Тип 3	40	Углеродистая сталь		6,8	Бесшовный	Более 10 лет

В эксперименте № 2 на уровне 10 ppm по воде были подготовлены по 5 сосудов типов 1 и 3 при нагреве поверхности до 100 без продувок сухим азотом. Время подготовки составляло 4, 8, 12, 24 и 48 часов для одного сосуда каждого типа. После подготовки в тару был закачен воздух со значениями влажности на уровне 15 ppm до давления 10 МПа . Целью эксперимента было выяснить, увидим ли мы увеличение влагосодержания в воздухе из тары при понижении давления в ней. Для определения этого показателя использовался гигрометр. Требования к дрейфу показаний были аналогичны эксперименту № 1 и составляли не более 5% за 30 мин. Результаты работы представлены на рис. 5.

По зависимостям можно сделать вывод, что износ сосудов типа 3 повлек за собой сильное увеличение шероховатости поверхности их внутренней поверхности, что способствует накоплению влаги на стенках сосуда, и перехода ее в газ при низких давлениях. Причем износ стенок тары произошел не только из-за времени, но и из-за хранения в ней агрессивных сред, таких как кислородсодержащие смеси. Несмотря на это, существенных различий между другими баллонами обнаружено не было, что позволяет предположить, что на уровне 10 ppm по воде разница в подготовке значительно не влияет на качество продукта. При этом, стоит отметить, что показания по влагосодержанию в емкостях ниже, чем был в закачиваемом воздухе. Возможно такое расхождение произошло из-за погрешности измерений в исходном продукте ввиду нестабильности расхода на анализ ввиду постоянного изменения давления при наполнении сосудов.

В эксперименте № 3 приводятся данные по влагосодержанию в аргоне 6.0. Откачка сосудов под продукт производилась при нагреве 65 °C в течение двух часов, после чего тара заполнялась газом и ставилась на наполнительную рампу. Далее производилась откачка еще 1,5 часа и заполнение чистым аргоном, после чего емкости направлялись потребителю. Подготовка производилась насосом производительностью 0,016 м^3/с. Стоит подчеркнуть, что два баллона типа 2 были ранее подготовлены и наполнены чистым криптоном.

Данные по влагосодержанию показаны в виде распределения на рис. 6. Можно отметить, что полученные в результате анализа значения не соответствуют заявленной ранее марке газа 6.0, однако являются достаточными для чистоты 5.0. Также данные по содержанию примесей в двух сосудах из-под чистого криптона сведены в табл. 2. По результатам измерений можно сказать, что криптон в процессе подготовки не был до конца удален с поверхностей тары, однако критичным его содержание является

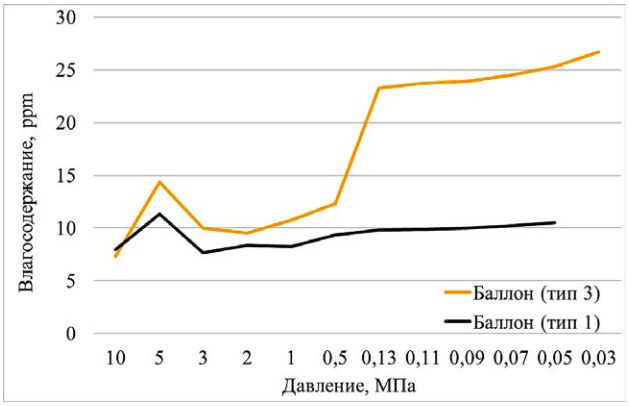

Рис. 5. Зависимости влагосодержания в газе от остаточного давления на уровне 10 ppm по воде.
Fig. 5. Dependences of moisture content in gas on residual pressure at 10ppm on water.

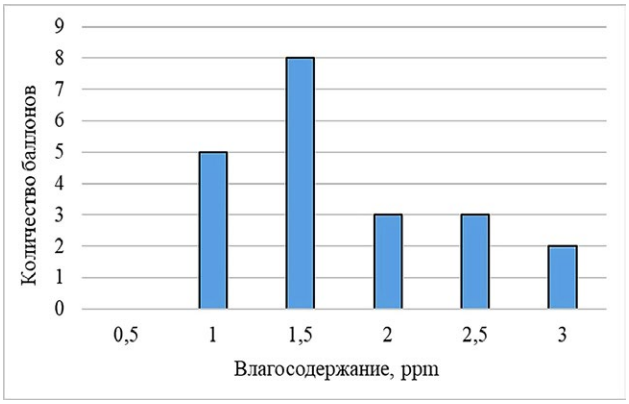

Рис. 6. Влагосодержание в баллонах с аргоном чистой 6.0.
Fig. 6. Humidity content in cylinders with argon purity 6.0.

Таблица 2. Количество примесей в аргоне 6.0 в таре из-под криптона 5.0
Table 2. Amount of impurities in argon 6.0 in krypton 5.0 containers

Номер баллона	Количество примесей, ppm					
	Kr	O_2+Ar	N_2	H_2O	CO_2	H_2
1	**0,25**	0,45	0,4	**0,48**	0,01	0,01
2	**0,03**	0,37	0,6	**0,38**	0,01	0,01

DOI: https://doi.org/10.17816/RF625543

Таблица 3. Свойства примесей высокочистых газов (при 273,15 К и 0,101325 МПа)
Table 3. Properties of high-purity-gas impurities (at 273.15 K and 0.101325 MPa)

Параметр	Элемент						
	Kr	O_2	Ar	N_2	H_2O	CO_2	H_2
Плотность, кг/м^3	3,749	1,429	1,784	1,250	998,2	1,977	0,090
Температура кипения, К	119,73	90,19	87,30	77,36	373,12	194,75	20,37

только для чистоты 6.0. Можно предположить, что различие в удалении примесей с поверхностей в процессе подготовки связано с их физическими свойствами, которые указаны в табл. 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты исследований зависимости чистоты инертного газа криптона от времени подготовки поверхностей тары методом термовакуумной подготовки при получении газа марки 5.8. Согласно полученным данным, есть возможность снизить время откачки, что поможет уменьшить нагрузку на оборудование и уменьшить затраты на подготовку тары.

Получены зависимости влагосодержания в газе от остаточного давления на уровне 10 ppm по воде, из которых видно, что до остаточных давлений в 0,23 МПа. Существенных закономерностей по увеличению влагосодержания нет. Однако при меньших значениях давлений для более изношенных поверхностей наблюдается явный рост количества воды вследствие десорбции со стенок тары, которая проходит лучше при низких остаточных давлениях.

Описаны данные, которые демонстрируют важность проработки методики подготовки поверхностей для марки газа 6.0. Результаты анализа показывают на сколько сложной может быть подготовка на примере нескольких примесей в высокочистых газах. Также стоит отметить, что примесь криптона проходит под более жесткие требования к чистоте газа, в отличии от воды, что позволяет сделать вывод о том, что различные примеси удаляются с разной эффективностью в зависимости от свойств вещества и их количества в остаточном газе.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. А.В. Федоров — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, проведение экспериментов, написание текста и редактирование статьи; М.Ю. Куприянов — анализ литературных источников и редактирование статьи. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).
Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с проведенным исследованием и публикацией настоящей статьи.
Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и подготовке публикации.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. A.V. Fedorov — literature review, collection and analysis of literary sources, conducting experiments, text writing, and article editing; M.Yu. Kupriyanov — analysis of literary sources and article editing. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, and final approval of the version to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work.
Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.
Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Химическая энциклопедия. В 5 т. Т. 2. М.: Советская Энциклопедия, 1990.
2. Пахомов С.А. Разработка экспрессного низкофонового метода определения бета-активности газовых препаратов и опыт его практического применения при проведении мониторинга атмосферного криптона-85. дисс. канд. техн. наук. СПб., 2000. EDN QDISNV
3. Пронько В. В. Экологический мониторинг криптона-85 на территории Краснодарского края. дисс. канд. хим. наук. Краснодар, 2004. EDN NMSXXP
4. Петрянов-Соколов И.В., Станцо В.В., Черненко М.Б. Популярная библиотека химических элементов. Марганец-олово. М.: Наука, 1972.

5. Савинов М.Ю. Исследование рабочих процессов и разработка современных криогенных технологий в производстве криптона и ксенона: дисс. д-р. техн. наук. СПб., 2008. EDN QEHRCD
6. Багаев В.Г. Комбинированная анестезия ксеноном у детей. дисс. д-р. мед. наук. М., 2016. EDN RHQYTI
7. Скобелев В.М. Криптоновая лампа накаливания. В кн.: Большая советская энциклопедия [в 30 т.] / гл. ред. А.М. Прохоров. 3-е изд. М.: Советская энциклопедия, 1969–1978. EDN SITKHI
8. Новый политехнический словарь. Москва: Большая Российская энциклопедия, 2000. С. 249 [internet] [дата обращения: 19.03.2024.]. EDN OVINRW
9. Мечков Б.Ч. Разработка и исследование электродов энергоэкономичных люминесцентных ламп. дисс. канд. техн. наук. М., 1985. EDN NPGWEJ
10. Ракетные двигатели. Исследовательский центр им. М.В. Келдыша [internet] [дата обращения: 13.12.2022.] Доступ по ссылке https://keldysh-space.ru
11. Горшков О.А., Муравлев В.А., Шагайда А.А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов. М.: Машиностроение, 2008. EDN QNVHXT
12. Криптон и аргон рассматривают как альтернативу ксенону в ионных двигателях // ТАСС [internet] [дата обращения: 20.12.2023.]. Доступ по ссылке https://tass.ru/armiya-i-opk/15489501?utm_source=yandex.ru&utm_medium=organic&utm_campaign=yandex.ru&utm_referrer=yandex.ru
13. Шепель Е.В. Экспериментальное и клиническое обоснование возможности использования криптона в качестве рабочего тела для газоплазменной коагуляции при оперативных вмешательствах. дисс. канд. мед. наук. Тверь, 2017. EDN DBKKVM
14. Патент на изобретение ВОИС W02011081612A1 / 31.12.2009. Бондаренко В.Л., Графов А.П., Лозицкий В.П. и др. Применение криптона или ксенона в качестве противовирусного средства. [дата обращения: 19.03.2024.]. Режим доступа: https://patents.google.com/patent/WO2011081612A1/ru
15. Куссмауль А.Р. Биологическое действие криптона на животных и человека в условиях повышенного давления. дисс. канд. биол. наук. М., 2007. EDN NOPIXB
16. Рыбка Д.В. Интенсивное спонтанное излучение ВУФ и УФ диапазонов в наносекундных и микросекундных сильноточных разрядах при высоких давлениях. дисс. канд. физ.-мат. наук. Томск, 2010. EDN QEUFBN
17. Козловский Е.А. Горная энциклопедия. Т. 3. М.: Советская энциклопедия, 1987.
18. Колесников А.В. Оптические методы анализа и разработка средств измерений микропримесей в аргоне, криптоне и ксеноне. дисс. канд. техн. наук. Томск, 2002. EDN QDQFYF
19. Чекирда К.В. Совершенствование и исследование государственного первичного эталона единицы длины. дисс. канд. техн. наук. СПб., 2013. EDN SUVLXV
20. Бондаренко В.Л., Симоненко Ю.М., Криогенные технологии извлечения редких газов. Одесса: Издательский центр, 2009. EDN XKOEFX
21. Ustyugova T.G., Kupriyanov M.Y. Moisture Contamination in High Purity Gas Separation Products // Chem. Petrol. Eng. 2020. Vol. 56. P. 371–377. doi: 10.1007/s10556-020-00783-y
22. Bondarenko V.L., Kupriyanov M.Y., Ustyugova T.G. et al. Gas Chromatography in Technology of High-Purity Noble Gases // Chem. Petrol. Eng. 2019. Vol. 55. P. 384–391. doi: 10.1007/s10556-019-00635-4
23. Справочник по вакуумной технике и технологиям. М: Техносфера, 2011. doi: 10.1016/b978-012352065-4/50053-5

REFERENCES

1. Knunyants IL, editor. *Chemical Encyclopedia.* Vol. 2. Moscow: Soviet Encyclopedia; 1990. 673 p. (In Russ).
2. Pakhomov SA. Development of an express low-background method for determination of beta-activity of gas preparations and experience of its practical application in monitoring of atmospheric krypton-85. [dissertation]. Saint Petersburg; 2000. (in Russ). EDN QDISNV
3. Pronko VV. Ecological monitoring of krypton-85 on the territory of Krasnodar region. [dissertation]. Krasnodar; 2004. (in Russ). EDN NMSXXP
4. Petryanov-Sokolov IV, Stanzo VV, Chernenko MB. *Popular library of chemical elements.* Moscow: Nauka; 1972. (In Russ).
5. Savinov MYu. Research of working processes and development of modern cryogenic technologies in the production of krypton and xenon. [dissertation]. Saint Petersburg; 2008. (in Russ). EDN QEHRCD
6. Bagaev VG. Combined anesthesia with xenon for children. [dissertation]. Moscow; 2016. (in Russ). EDN RHQYTI
7. Skobelev VM. *Krypton incandescent lamp. The Big Soviet Encyclopedia* in 30 vols. Moscow: Soviet Encyclopedia, 1969–1978. (in Russ). EDN SITKHI
8. Ishlinsky AYu, editor. New Polytechnic Dictionary. Moscow: Bolshaya Rossiyskaya entsiklopediya; 2000. (in Russ). EDN OVINRW
9. Mechkov BCh. Development and research of electrodes of energy-efficient fluorescent lamps. [dissertation]. Moscow; 1985. (in Russ). EDN NPGWEJ
10. Keldysh MV Research Center. Rocket engines. (Accessed 13 December 2022) Available from: https://keldysh-space.ru (in Russ).
11. Gorshkov OA, Muravlev AA, Shagaida AA. *Hall and ion plasma engines for spacecraft.* Koroteev AS, editor. Moscow: Mashinostroenie; 2008. (in Russ). EDN QNVHXT
12. Site of Telegraphic Agency for Communication and Message. (Accessed 20 December 2023) Available at: https://tass.ru/armiya-i-opk/15489501?utm_source=yandex.ru&utm_medium=organic&utm_campaign=yandex.ru&utm_referrer=yandex.ru (in Russ).
13. Shepel EV. Experimental and clinical substantiation of the possibility of using krypton as a working body for gas-plasma coagulation during surgical interventions. [dissertation]. Tver; 2017. (in Russ). EDN DBKKVM
14. Patent VOIS W02011081612 A1 / 31.12.2009. Bondarenko VL, Grafov AP, Lozitskiy VP, et al. Use of krypton or xenon as an antiviral agent. (Accessed 19 March 2024) Available from: https://patents.google.com/patent/WO2011081612A1/ru (in Russ).
15. Kussmaul AR. Biological effect of krypton on animals and humans under conditions of increased pressure. [dissertation]. Moscow; 2007. (in Russ). EDN NOPIXB

16. Rybka DV. Intense spontaneous emission of VUV and UV ranges in nanosecond and microsecond high-current discharges at high pressures. [dissertation]. Tomsk; 2010. (in Russ). EDN QEUFBN
17. Kozlovsky EA. *Mountain Encyclopedia.* Vol. 3. Moscow: Soviet Encyclopedia; 1987. (In Russ).
18. Kolesnikov AV. Optical methods of analysis and development of measuring instruments for microimpurities in argon, krypton and xenon. [dissertation]. Tomsk; 2002. (in Russ). EDN QDQFYF
19. Chekirda KV. Perfection and research of the state primary standard of length unit. [dissertation]. Saint Petersburg; 2013. (in Russ). EDN SUVLXV
20. Bondarenko VL, Symonenko YM. *Cryogenic rare gas extraction units.* Odessa: Publishing Center; 2009. (in Russ). EDN XKOEFX
21. Ustyugova TG, Kupriyanov MY. Moisture Contamination in High Purity Gas Separation Products. Chem Petrol Eng. 2020;56:371–377. doi: 10.1007/s10556-020-00783-y
22. Bondarenko VL, Kupriyanov MY, Ustyugova TG. Gas Chromatography in Technology of High-Purity Noble Gases. Chem Petrol Eng. 2019;55:384–391. doi: 10.1007/s10556-019-00635-4
23. Handbook of Vacuum Science and Technology. Moscow: Technosphere; 2011. (In Russ). doi: 10.1016/b978-012352065-4/50053-5

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*** Федоров Александр Владимирович,**
адрес: Российская Федерация, 105005, Москва,
2-я Бауманская улица, 5;
ORCID: 0009-0001-4799-5469;
eLibrary SPIN: 3641-4739;
e-mail: fedorovav@bmstu.ru

Куприянов Максим Юрьевич,
канд. техн. наук;
ORCID: 0000-0003-2180-1221;
eLibrary SPIN: 2716-2525;
e-mail: kupriyanov.m@bmstu.ru

AUTHORS' INFO

*** Aleksandr V. Fedorov**
address: 2-ya Baumanskaya st., 5/1, 105005, Moscow,
Russian Federation;
ORCID: 0009-0001-4799-5469;
eLibrary SPIN: 3641-4739;
e-mail: fedorovav@bmstu.ru

Maksim Yu. Kupriyanov,
Ph.D. of Engineering Sciences;
ORCID: 0000-0003-2180-1221;
eLibrary SPIN: 2716-2525;
e-mail: kupriyanov.m@bmstu.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author