

Влияние степени очистки аргона на его дальнейшее использование

И. А. Прокофьев
 ПАО «НЛМК»
 prokofyev_ia@nlmk.com

В. Д. Коршиков
 Липецкий государственный технический университет
 korshvd@mail.ru

Аннотация. Аргон, полученный разными методами, имеет и различные свойства. Применяя современные методы очистки этого газа от кислорода, азота и других газов, аргон, в зависимости от анализа, широко применяется практически во всех сферах жизнедеятельности человека. Важно знать, к какому применению приведет очистка аргона при разных способах улучшения его параметров.

Ключевые слова: аргон; очистка; кислород; применение; цеолиты; ректификация

I. СВОЙСТВА АРГОНА

Аргон – самый распространенный из инертных газов. Это одноатомный газ с температурой кипения (при нормальном давлении) – 185,9 °С (немного ниже, чем у кислорода, но выше, чем у азота) [3]. В 100 мл воды при 20 °С растворяется 3,3 мл аргона, в некоторых органических растворителях аргон растворяется значительно лучше, чем в воде. Химических соединений не образует.

A. Чистота аргона

В зависимости от области применения к чистоте аргона предъявляют различные требования. Обновленный ГОСТ 10157-79[6] с изменениями повышает требования к чистоте и разделяет аргон на два сорта – высший и первый.

ТАБЛИЦА I АРГОН ГАЗООБРАЗНЫЙ И ЖИДКИЙ (ГОСТ 10157-79)

| | Высший сорт | Первый сорт |
|---|-------------|-------------|
| Объемная доля аргона, %, не менее | 99,993 | 99,987 |
| Объемная доля кислорода, %, не более | 0,0007 | 0,002 |
| Объемная доля азота, %, не более | 0,005 | 0,01 |
| Объемная доля водяных паров, %, не более | 0,0009 | 0,001 |
| Температура насыщения аргона водяными парами при давлении 101,3 кПа (760 мм рт. ст.), °С, не выше | - 61 | - 58 |
| Объемная доля суммы углеродсодержащих соединений в пересчете на CO ² , %, не более | 0,0005 | 0,001 |

В связи с повышением требований современных стандартов к качеству промышленной продукции и точности измерительных приборов, повысились и требования к чистоте применяемых газов. Для точного спектрального анализа особенно важно, чтобы аргон, используемый в работе спектрометра, соответствовал требуемой чистоте [9][13].

Для удовлетворения современных требований к качеству, производителями аргона были усовершенствованы технологии получения и очистки, разработаны новые нормативы.

ТАБЛИЦА II СОВРЕМЕННЫЕ СТАНДАРТЫ МАРОК АРГОНА ВЫСОКОЙ ЧИСТОТЫ

| Марка аргона ВЧ | Объемная доля | | |
|--|-----------------------|-----------------------------|----------------------|
| | аргона, % не менее | кислорода, % не менее | азота, % не менее |
| Аргон газообразный высокой чистоты ТУ 6-21-12-94 с изм. 1, 2 (устар.) | 99,998 | 0,0002 | 0,001 |
| Аргон высокой чистоты ТУ 2114-005-0024760-99 | 99,998 | 0,0002 | 0,0006 |
| Аргон газообразный высокой чистоты ТУ 2114-002-49632579-2006 | 99,998 | 0,0002 | 0,0006 |
| Аргон газообразный и жидкий высокой чистоты ТУ 2114-005-05798345-2009 | 99,998 | 0,0002 | 0,001 |
| Аргон высокой чистоты марка 4.4 ТУ 2114-005-53373468-2006 | 99,994 | 0,001 | 0,004 |
| Аргон газообразный высокой чистоты марка 5.5 ТУ 2114-006-45905715-2010 | 99,9995 | 0,0001 | 0,0002 |
| Аргон высокой чистоты марка 5.6 ТУ 2114-005-53373468-2006 | 99,9996 | 0,00012 | 0,0002 |
| Аргон высокой чистоты марка 5.8 ТУ 2114-005-53373468-2006 | 99,9998 | 0,00005 | 0,00008 |
| Аргон особой чистоты марка 6.0 ТУ 2114-005-53373468-2006 | 99,9999 | 0,00001 | 0,00003 |

B. Применение аргона

В настоящее время производство чистого аргона исчисляется многими миллионами кубометров в год. Без аргона невозможно существование ряда отраслей новой техники. Потребность в аргоне продолжает все время возрастать, одновременно повышаются требования в отношении его качества. В то же время технология производства аргона не лишена известных недостатков, в частности именно сложный способ очистки аргона от кислорода определяет довольно высокую стоимость аргона.

Аргон применяется в качестве защитной среды в машиностроении при сварке и резке легких металлов и специальных сталей, в металлургии при получении и обработке высококачественных сталей, цветных и особенно редких и щелочных металлов, в светотехнике для заполнения ламп накаливания, в электронике для

получения точечных ламп и во многих других областях [7][8].

Незаменим аргон и в технологиях обработки таких редких металлов как цирконий, вольфрам, тантал, ниобий, бериллий, гафний и др.

В сфере спектрального анализа и метрологии аргон наиболее часто используется как газ – носитель, инертная среда и плазмообразующий газ в контрольно-измерительных приборах, а также при производстве поверочных газовых смесей (ПГС) для различных газоанализаторов.

В данной сфере применения чистота аргона имеет ключевое значение. Даже при минимальных отклонениях качества аргона от соответствующих ГОСТов и ТУ, регламентированных для использования в конкретных приборах, изменяются условия работы и анализа, что приводит к серьезным искажениям результатов измерений, нарушению работоспособности оборудования, снижению качества продукции и ресурса фильтров и, как следствие, серьезным экономическим убыткам.

Поэтому так важно применять разные способы очистки аргона от кислорода. Ведь в результате технологического процесса полученная степень очистки аргона сильно влияет на его дальнейшее использование [4].

II. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ АРГОНА

Получение чистого аргона включает следующие стадии:

- отбор фракции из ректификационной колонны и получение сырого аргона;
- очистка сырого аргона от кислорода;
- очистка аргона из азота.

A. Низкотемпературная ректификация

Одним из основных продуктов, получаемых из воздуха методом низкотемпературной ректификации, является аргон.

Проводится очистка аргона от кислорода методом ректификации сырого аргона или аргоновой фракции воздухоразделительной установки. Преимущества этого метода состоят в использовании высокоэффективных контактных устройств – насадок из металлической сетки, позволяющих проводить очистку в колоннах небольшого диаметра, и выражаются в отсутствии каталитического гидрирования кислорода, упрощении технологии очистки аргона и исключении вторичного загрязнения аргона водородом [2].

Обычно используют воздухоразделительные аппараты двукратной ректификации, состоящие из нижней колонны высокого давления (предварительное разделение), верхней колонны низкого давления и промежуточного конденсатора-испарителя. В конечном счете, азот отводится сверху, а кислород – из пространства над конденсатором.

Легучесть аргона больше, чем кислорода, но меньше, чем азота. Поэтому аргоновую фракцию отбирают в точке, находящейся примерно на трети высоты верхней колонны, и отводят в специальную колонну (рис. 1).

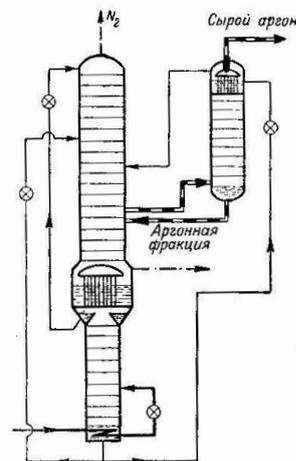


Рис. 1. Отечественная схема получения сырого аргона

Фракцию сырого аргона извлекают из воздуха в две стадии. Аргонная фракция, содержащая 5–12 % Ar, отбирается из разделительной колонны и обогащается в специальной аргоновой колонне. Обогащенный сырой аргон содержит 70–95 % Ar, остальное составляют кислород и азот.

Очистка сырого аргона от кислорода производится разными методами (в последнее время увеличивают высоту колонны технологического, либо чистого аргона, применяя все тот же метод ректификации), а от азота – только низкотемпературной ректификацией. В результате получают производственный жидкий аргон.

Существует несколько основных схем для получения сырого аргона. Все они различаются в основном по состоянию перерабатываемой фракции и методу создания флегмы в колонне сырого аргона.

В промышленных масштабах на данный момент получают аргон до 99,9999%-ой чистоты.

Таким образом, полученный аргон можно применять во всех сферах деятельности.

Одним из ключевых моментов при очистке аргона является очистка сырого аргона от кислорода.

Существуют и другие ректификационные установки, к примеру, российский патент № 2231723 «Способ получения чистого аргона методом ректификации воздуха» [15].

Способ извлечения аргона из воздуха, включающий в себя отбор аргоновой фракции из верхней колонны узла двукратной ректификации и последующую очистку аргоновой фракции от кислорода в трех последовательно установленных колоннах путем многократного чередования процессов ректификации и дефлегмации и получением чистого аргона при дальнейшем разделении смеси $Ar-N_2$ в дополнительной ректификационной колонне.

Однако из-за большого числа ректификационных колонн технологическая схема такой установки получается достаточно сложной. Кроме того, в верхней колонне узла двукратной ректификации необходимо иметь повышенное давление, что при последовательном прохождении разделяемого потока через четыре колонны связано с необходимостью компенсации в них гидравлических потерь.

Недостатком этого способа является то, что в верхней колонне узла двукратной ректификации необходимо поддерживать повышенное давление, так как при последовательном прохождении разделяемого потока аргоновой фракции через вторую и третью колонны приходится преодолевать значительное гидравлическое сопротивление.

Технический результат: заключается в исключении необходимости дополнительного повышения давления в верхней колонне узла ректификации, часть которого тратилась бы на преодоление гидравлического сопротивления третьей колонны для разделения смеси $Ar-N_2$ и возможного снижения холодопроизводительности детандера за счет повышения давления за детандером.

В. Каталитическое гидрирование

В промышленности применяется метод очистки аргона от кислорода, основанный на каталитическом гидрировании кислорода.

Наиболее эффективны катализаторы на основе металлов платиновой группы. Чаще используются платина и палладий, нанесенные на активный оксид алюминия. Содержание активного компонента не превышает 5% (по массе). Температура в контактном аппарате не превышает 500 °С. При стехиометрическом соотношении содержаний водорода и кислорода после установления термодинамического равновесия компонентов давление кислорода по расчетным оценкам составляет 10–10 МПа, а при небольшом избытке водорода давление кислорода можно снизить до 10–25 МПа. На практике глубина очистки аргона от кислорода этим методом составляет менее 10–4 мол. % кислорода [5].

На основании проведенных исследований ВНИИхимашем разработана промышленная установка для очистки сырого аргона методом каталитического гидрирования кислорода. Эти установки успешно эксплуатируются с 1957 г. и известны под названием УТА (установка технического аргона). Опыт эксплуатации установок типа УТА показал, что они могут использоваться для переработки весьма больших количеств сырого аргона при практически любом содержании кислорода в сыром аргоне. Активность катализаторов в установках до настоящего времени остается высокой. Установки обеспечивают получение аргона с остаточным содержанием кислорода не более 0,002–0,003%.

На данный момент в промышленности разработаны и другие установки по принципу работы УТА, например, Арт-0,75. Принципиальная схема этой установки ненамного отличается от УТА, но производительность выше [10][11].

Арт-0,75 разработан в НПО «Криогенмаш» как модифицированная установка для каталитической очистки аргона от кислорода. Установка располагается непосредственно у воздухоразделительного аппарата. Она работает по схеме, близкой к схеме УТА, при давлении, равном 0,3 МПа, создаваемом за счет гидростатического столба жидкого сырого аргона. Теплота реакции связывания кислорода в контактных аппаратах с платиновым катализатором используется для регенерации адсорбента в блоках осушки. Установка позволяет получать аргон с содержанием кислорода

0,001–0,0005 % при общем увеличении выпуска продукции на 10 %.

Таким образом, полученный аргон можно применять почти во всех сферах деятельности, за исключением тех сфер, где необходимо применение марок аргона не ниже 5,5 по табл. 2 (в редких исключениях допускается марка ВЧ 5,5).

Существует и каталитическое гидрирование кислорода с помощью углеводородов и аммиака.

Получение электролитического водорода обходится дорого, поскольку требует специальной и к тому же взрывоопасной установки. В то же время для связывания кислорода могут быть использованы углеводороды или аммиак. При использовании углеводородов в результате реакции образуются в основном водяной пар и углекислый газ. Однако в этом случае не исключена возможность загрязнения очищаемого газа. В связи с этим углеводороды практически не применяются для очистки инертных газов каталитическим гидрированием кислорода.

Применение безводного аммиака вместо водорода не приведет к загрязнению очищаемого газа другими примесями, кроме азота, водорода и водяного пара. При высокой температуре процесса (около 900 °С) происходит диссоциация аммиака с получением азото-водородной смеси, состоящей из 75% водорода и 25% азота. Получаемая таким способом азото-водородная смесь значительно дешевле электролитического водорода. Схема установки является разновидностью метода каталитического гидрирования кислорода с использованием платинового катализатора.

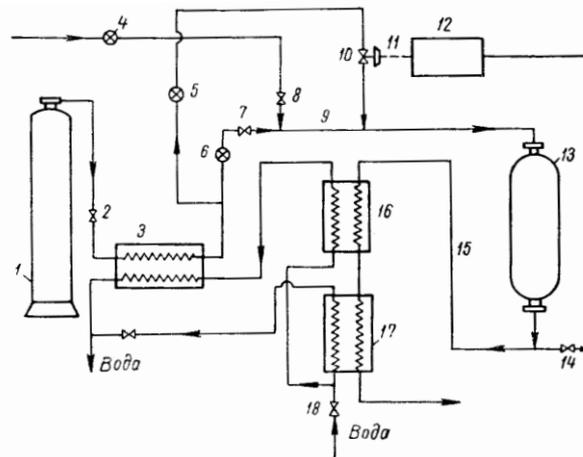


Рис. 2. Схема установки для очистки сырого аргона от кислорода каталитическим гидрированием с помощью водорода, получаемого при разложении аммиака

Сырой аргон, в котором содержится от 12 до 22% кислорода, сжимается до давления 2–2,75 ата и подается на очистку через клапан 4, автоматически регулирующий давление, и вентиль 8, контролирующий расход. В баллоне 1 находится безводный жидкий аммиак, который поступает через регулирующий вентиль 2 в теплообменник 3, где нагревается и испаряется за счет воды. Далее основное количество газообразного аммиака через автоматический клапан 6, регулирующий давление, и вентиль 7, регулирующий расход, поступает на смешение с сырым аргоном. Получаемая смесь по линии 9 направляется в реактор 13. Вентили 7 и 8

приблизительно обеспечивают требуемое соотношение сырого аргона и аммиака.

В результате каталитического гидрирования на платиновом катализаторе при температуре 870–980°C весь кислород связывается и получается смесь, насыщенная водяными парами содержащая аргон, азот и 1–4% водорода. Часть этой смеси через вентиль 14 поступает в автоматический газоанализатор 12, а остальное количество смеси по линии 15 поступает в холодильники 16 и 17, охлаждается в них и направляется для дальнейшей переработки методом глубокого охлаждения. Небольшое количество газообразного аммиака направляется через клапан 5, поддерживающий постоянное давление, и подводится к автоматическому регулируемому вентилю 10, степень открытия которого определяется составом газа, полученного в реакторе и контролируемого газоанализатором 12. Если в газе, выходящем из реактора, содержание водорода менее 1%, то степень открытия вентиля 10 увеличивается и в реактор по линии 11 и 9 поступает больше аммиака. Если же содержание водорода превысит 4%, то через вентиль 10 пропускается меньше аммиака. Охлаждающая вода через вентиль 18 поступает в теплообменники 17, 16 и 3.

Установка обеспечивает получение аргона с остаточным содержанием кислорода менее 0,002% и азота – менее 0,005%, но имеет малую производительность по сравнению с промышленным получением аргона.

Таким образом, полученный аргон можно применять в тех сферах деятельности, где допустим первый сорт аргона (ГОСТ 10157-79).

С. Использование цеолитов

Также для разделения аргона от кислорода используют молекулярно-ситовые свойства цеолитов.

Существуют природные и искусственные цеолиты. Примеры природных цеолитов: морденит, лимонит, натронит и др. Такие цеолиты представляют собой алюмосиликаты металлов, в состав которых входит кристаллизационная вода. После дегидратации цеолиты работают подобно молекулярным ситам.

Катионы, входящие в состав цеолитов, имеют слишком малые размеры, чтобы оказать влияние на свободный объем внутрикристаллической структуры. Однако они могут размещаться таким образом, чтобы замедлить или даже полностью прекратить диффузию поглощаемых молекул внутри адсорбционной полости [17].

В некоторых случаях варьирование размера катиона позволяет осуществить тонкое разделение веществ на основе разницы в размерах адсорбируемых молекул. Так, при – 183°C левинит и цеолит NaA не сорбируют аргон, но сорбируют кислород. Установки адсорбционной очистки аргона от кислорода разной производительности имеются во многих странах, в том числе и в России [1].

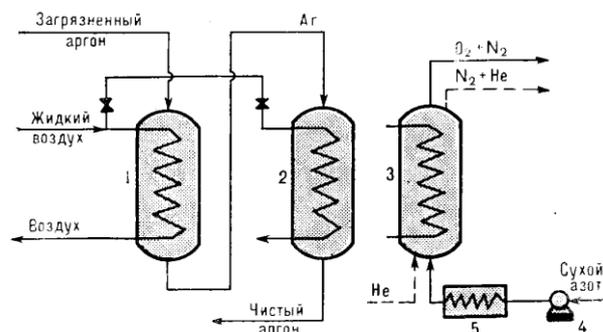


Рис. 3. Схема установки очистки аргона от кислорода цеолитами: 1,2 – адсорберы на стадии очистки; 3 – адсорбер на стадии регенерации; 4 – газодувка; 5 – нагреватель.

Согласно схеме, загрязненный аргон пропускают последовательно через два адсорбера 1 и 2 со встроенными змеевиками, охлаждаемыми кипящим воздухом внутри их жидким воздухом. Адсорбер 3 находится на стадии регенерации. Для регенерации используется подогретый до 90°C сухой азот с установки разделения воздуха. При достижении в слое 20°C заканчивают нагрев цеолита. После этого данный слой охлаждают жидким воздухом с продувкой неадсорбирующегося гелия. В конце продувки содержание азота в гелии не должно превышать 0,1%. Примесь кислорода в аргоне после адсорбционной очистки не превышает 2% (0,2%) [18].

Таким образом, полученный аргон можно применять в тех сферах деятельности, где допустим первый сорт аргона (ГОСТ 10157-79).

Существуют и другие установки на цеолитах, к примеру, российский патент № 2 048 864[14]. «Способ очистки аргона от кислорода». Патентообладателем является Балашихинское научно-производственное объединение криогенного машиностроения «Криогенмаш».

Сущность изобретения: в слой адсорбента при очистке аргона на стадии охлаждения подают аргон в виде парожидкостного потока с содержанием жидкой фазы не менее 50%. Изобретение относится к очистке аргона от кислорода на цеолитах и может быть использовано в установках разделения воздуха низкотемпературной ректификации.

Известен способ очистки аргона от кислорода, включающий адсорбцию при 90-108K, регенерацию и охлаждение адсорбента. Охлаждение адсорбента до рабочих температур перед циклом адсорбции проводят при вакуумировании за счет теплопроводности слоя адсорбента. Процесс охлаждения слоя адсорбента в вакууме длительный и требует большого расхода хладагента, так как велики потери холода в окружающую среду.

Наиболее близким к изобретению по технической сущности является способ очистки аргона от кислорода, включающий очистку аргона в слое адсорбента в кожухотрубном адсорбере, регенерацию адсорбента и охлаждение его жидким аргоном через стенки труб. В этом способе требуется большое количество времени для охлаждения адсорбента.

Технической задачей изобретения является сокращение времени охлаждения. Это достигается тем, что при охлаждении адсорбента аргон подают непосредственно в слой адсорбента в виде парожидкостного потока с содержанием жидкой фазы не менее 50%.

В результате этого метода достигается глубина очистки аргона от кислорода в 0,5 ppm.

Таким образом, полученный аргон можно применять в тех сферах деятельности, где допустим первый сорт аргона (ГОСТ 10157-79).

В настоящий момент именно адсорбция находит широкое применение в процессе разделения и глубокой очистки газовых смесей. Адсорбционный метод разделения газов часто не уступает процессу ректификации, а при глубокой очистке превосходит его и значительно эффективнее химических методов.

D. Использование кислородноактивных металлов

Известна установка производительностью 60 л/ч, в которой для очистки аргона от примесей применены омедненный силикагель и жидкий натрий. Очищенный газ из ресивера 1 поступает через ротаметр 2 в емкость 4, в которую загружено 10 кг омедненного силикагеля. Емкость 4 представляет собой цилиндр из стали 1X18Н9Т диаметром 105 мм и высотой 2500 мм, установленный в печь. Очищенный от основного количества кислорода газ проходит буферную емкость 5 и поступает в емкость 6, аналогичную емкости 4, в которую, однако, заливается 5–7 л натрия или сплава натрия и калия. Для повышения эффективности эта емкость заполняется предварительно кольцами Рашига или пучками стружки из нержавеющей стали. Далее очищенный газ проходит фильтр 7 и поступает в ресивер 8, из которого по мере надобности и отбирается к потребителю.

Предусмотрена возможность вакуумирования всей системы форвакуумным насосом 9. Для восстановления меди в емкости 4 используется водород, подаваемый через ротаметр 2 из баллона 3, при этом бак 10 используется в качестве водяного затвора. Во время работы поглотительные емкости разогреваются до температуры 200–250°C. В период восстановления меди температура в емкости 4 поддерживается на уровне 250–300°C, при этом расход водорода составляет 40 л/ч, а процесс восстановления длится 8 ч.

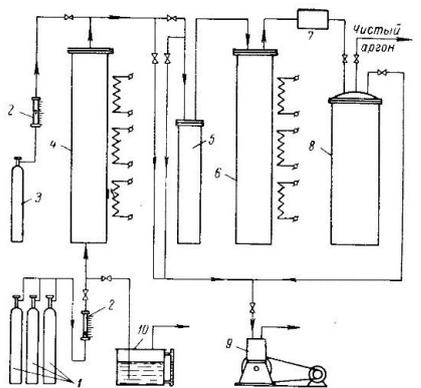


Рис. 4. Схема установки для получения аргона высокой чистоты

Установка, работающая по описанной схеме, эксплуатировалась в течение трех лет. Концентрация кислорода в очищенном аргоне при расходе 60 л/ч

снижалась от 0,1–0,05% до 0,0003%. Смена сплава натрия с калием производилась через полгода.

Таким образом, полученный аргон можно применять в тех сферах деятельности, где допустим первый сорт аргона (ГОСТ 10157-79).

III. ДАЛЬНЕЙШИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Важнейшим моментом в очистке аргона от кислорода является поиск более усовершенствованных методов очистки, в частности снижение энергозатрат при сохранении степени очистки. К примеру, в патенте SU 1787506 А1 говорится о применении синтетического цеолита типа NaA [16]. Способ очистки аргона от кислорода включает дегидратацию слоя синтетического цеолита типа NaA, модифицированного катионами кальция и пропускание через него аргона при криогенной температуре и давлении, превышающем атмосферное [23]. С целью снижения энергозатрат при сохранении степени очистки аргона используют цеолит, модифицированный катионами кальция до их содержания 20–25%, а дегидратацию осуществляют при 260–280°C.

Предложение производить ректификацию под вакуумом с целью увеличения разности состава фаз системы аргон–кислород не нашло пока применения, поскольку осуществление процесса ректификации смеси аргон–кислород под пониженным давлением сопряжено с рядом технических трудностей даже при умеренном разрежении. Существенного же улучшения условий разделения смеси аргон – кислород при этом не достигается [19–21].

Предпринимались также попытки получения чистого аргона физическим методом – вымораживанием, – поскольку температура затвердевания аргона на 29,45° выше, чем у кислорода, и на 20,66° выше, чем у азота. Однако осуществить подобный метод практически довольно сложно, а по причине значительной растворимости аргона в кислороде коэффициент извлечения аргона в этом случае будет, по-видимому, очень низким [22].

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сочетание методов ректификации и адсорбции позволяет существенно повысить эффективность воздухоразделительных установок (получить марки ВЧ аргона 4,4–6,0). В недалеком будущем схемы комплексного разделения, несомненно, будут разрабатываться с учетом максимального использования метода адсорбции для глубокой очистки инертных и других газов [12].

Стоит отметить, что все применяемые в настоящее время способы очистки аргона от кислорода, основанные на химической активности последнего в отношении газов типа водорода или кислородноактивных металлов, не лишены тех или иных существенных недостатков. Они либо слишком громоздки или сложны, либо не обеспечивают возможности получения аргона высокой чистоты, либо не могут быть использованы в промышленном масштабе. В связи с этим не прекращаются поиски новых способов очистки аргона от кислорода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Архаров А.М., Марфенина И.В., Микулин В.И. Криогенные системы. Т.1. М.: Машиностроение, 1996. 575 с.

- [2] Атаманюк В.Г., Ширшев Л.Г., Акимов Н.И. Гражданская оборона: Учебник для ВУЗов. М.: Высшая Школа, 1986. 207 с.
- [3] Беляков В.П. Криогенная техника и технология. М.: Энергоиздат, 1952. 272 с.
- [4] Вихман Г.Л., Круглов С.А. Основы конструирования аппаратов и машин НИЗ. М: Машиностроение, 1978. 324с.
- [5] Головкин Г.А. Установки для производства инертных газов. Л.: Машиностроение. 1974. 384 с.
- [6] ГОСТ 10157-79. Аргон газообразный и жидкий. Технические условия — Введ. 1980-07-01. - Министерство химической промышленности СССР, 1980.
- [7] Епифанова В.И. Разделение воздуха методом глубокого охлаждения. Т.1. М: Машиностроение, 1973. 471 с.
- [8] Епифанова В.И. Разделение воздуха методом глубокого охлаждения. Т.2. М: Машиностроение, 1973. 567 с.
- [9] Использование автоматизированных расчетов и программного обеспечения как способ повышения маневренности установок ТЭС / Д. И. Менделеев, Ю. Я. Галицкий // Электроэнергетика глазами молодежи - 2016: Материалы VII Международной молодежной научно-технической конференции. В 3-х томах, Казань, 19–23 сентября 2016 / Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2016. С. 64-65.
- [10] Кислород. Т.1: Справ. / Под ред. Д.Л. Глизманенко. М.: Металлургия, 1973. 422 с.
- [11] Кислород. Т.2: Справ. / Под ред. Д.Л. Глизманенко. М.: Металлургия, 1973. 464 с.
- [12] Машины и аппараты химических производств / Под ред. В.Н. Соколова. Л: Машиностроение, 1982. 384с.
- [13] Менделеев Д. И., Галицкий Ю.Я. Исследование влияния абсорбционной холодильной машины на режимы работы парогазовой установки // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. Т. 11. № 4(44). С. 37-46.
- [14] Пат. РФ № 2048 864 / В.Б. Воротынцев, А.Н. Федоров, И.А. Давыдов, В.А. Гарин, Г.А. Головкин. Способ очистки аргона от кислорода; Опубл. 27.11.95.
- [15] Пат. РФ № 2231723 / Л.А. Акулов, С.В. Глобенко. Способ получения чистого аргона методом ректификации воздуха; Опубл. 27.06.04. Бюл. № 18.
- [16] Пат. СССР(РФ) № 1662641, SU 1 787 506 A1 / В.Ю. Чельшев, Г.А. Головкин. Способ очистки аргона от кислорода; Опубл. 15.01.93. Бюл. № 2.
- [17] Расчет криогенных установок. Учебное пособие для холодильных и технологических вузов / Под ред. С.С. Будневича. Л.: Машиностроение, 1979. 367 с.
- [18] Study of the work and efficiency improvement of combined-cycle gas turbine plants / D. I. Mendeleev, Y. Y. Galitskii, G. E. Marin, A. R. Akhmetshin // E3S Web of Conferences – 2019: International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems, SES 2019, Kazan, 18–20 сентября 2019 / Kazan: EDP Sciences, 2019. P. 05061. DOI 10.1051/e3sconf/201912405061.
- [19] Файнштейн В.И. Вклад ОАО «Криогенмаш» в разработку принципов и технических решений, обеспечивающих взрывобезопасную работу воздуходелительных установок // Технические газы, 2014. №6. С. 58-59.
- [20] Файнштейн В.И. Кислород, азот, аргон - безопасность при производстве и применении. 1-е изд. Москва: Интермет Инжиниринг, 2008. 192с.
- [21] Файнштейн В.И. Некоторые особенности обеспечения безопасности при производстве и применении продуктов разделения воздуха. 5-е изд. Одесса: Технические газы, 2013. 219с.
- [22] Файнштейн В.И. О влиянии на работу адсорбционных установок загрязнений перерабатываемого воздуха влагой, диоксидом углерода и некоторыми другими примесями // Технические газы, 2012. №4. С. 57-60.
- [23] Файнштейн В.И., Домашенко А.М., Беляев Ю.И. Загрязнение жидких криогенных продуктов при технологических операциях хранения и транспортирования // Технические газы, 2007. №5. С. 65-68.