

УДК 621.5.012.2/3

Разработка и исследование схемы получения сжиженного диоксида углерода технологией мембранного разделения с системой рециркуляции

Канд. техн. наук И. Е. СЯЗИН¹, д-р техн. наук Г. И. КАСЬЯНОВ²,
д-р техн. наук А. В. ГУКАСЯН³, канд. техн. наук О. Н. КАМИНИР⁴

¹isyazin@gmail.com, ²kasyanov@kubstu.ru, ³aleksandr_gukasyan@mail.ru, ⁴kaminir17@gmail.com

Кубанский государственный технологический университет

Статья посвящена способу получения CO_2 из смеси атмосферных газов, имеющего научно-прикладное значение. Исследована возможность получения CO_2 из состава атмосферных газов при низких давлениях (порядка 0,5...1,0 МПа) и температурах в диапазоне 32...37 °С. Предлагаемая схема состоит из модуля разделения смеси газов на «пермеат» и «ретентрат», и модуля ожижения, и отличается в первую очередь тем, что вначале процесса производится разделение смеси атмосферных газов в целях получения чистого газообразного диоксида углерода. После всасывания воздушной смеси безмасляным винтовым компрессором в модуле разделения газов на выходе получается «ретентрат» — CO_2 и сбросной «пермеат» (остальные газы). В результате процесса однократного нагнетания газа в ресивер для газообразного воздуха, осуществляется его рециркуляция винтовым сухим компрессором (насосом) через мембранный блок до достижения концентрации CO_2 не менее 93...95%, после чего последний поступает в модуль ожижения. В статье делается вывод о том, что количество получаемого CO_2 напрямую зависит от коэффициента извлечения диоксида углерода в мембранном блоке. Стоимость единицы получаемого предлагаемым способом жидкого CO_2 приблизительно равно средней рыночной стоимости жидкого CO_2 , что обусловлено, во-первых, использованием атмосферного воздуха, который содержал в объемной доле всего 0,04% диоксида углерода, во-вторых, применением мембранных фильтров в небольшом количестве, качественные мембранные фильтры позволили бы резко сократить себестоимость единицы жидкого CO_2 . Разработанная схема перспективна для промышленных установок по очистке природного газа и получению сжиженных и сжатых инертных газов, в которых CO_2 является сбросным газом с относительно высоким содержанием в «пермеате», а также для предприятий с острой постоянной потребностью в стационарной установке по получению CO_2 .

Ключевые слова: диоксид углерода, получение CO_2 , разделение газов, сжижение газов, сжиженные газы.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 16.03.2023, одобрена после рецензирования 26.12.2023, принята к печати 10.01.2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-1-34-42

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Сязин И. Е., Касьянов Г. И., Гукасян А. В., Каминир О. Н. Разработка и исследование схемы получения сжиженного диоксида углерода технологией мембранного разделения с системой рециркуляции // Вестник Международной академии холода. 2024. № 1. С. 34–42. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-1-34-42

The scheme of liquefied carbon dioxide production by membrane separation with recirculation system

Ph. D. I. E. SYAZIN¹, D. Sc. G. I. KASYANOV², D. Sc. A. V. GUKASYAN³,

Ph. D. O. N. KAMINIR⁴

¹isyazin@gmail.com, ²kasyanov@kubstu.ru, ³aleksandr_gukasyan@mail.ru, ⁴kaminir17@gmail.com

Kuban State Technological University

The article describes the method of obtaining CO_2 from a mixture of atmospheric gases, the information in the article is of scientific and applied value. The possibility of obtaining CO_2 from the composition of atmospheric gases at low pressures (of the order of 0.5–1.0 MPa) and temperatures in the range of 32–37 °C has been studied. The proposed scheme consists of modulating the gas mixture into «permeate» and «retentate» and modulating liquefaction, and is characterized first of all by the fact that, at the beginning of the process, distributing the mixture of atmospheric gases occurs with the release of emission gas carbon dioxide. After the air mixture is sucked in by an oil-free screw compressor in the gas separation module, the output is «retentate» — CO_2 and waste «permeate» (other gases). As a result of the process of single injection of gas into the receiver for gaseous air, it is recirculated by a screw dry compressor (pump) through the membrane unit until

the CO₂ concentration is at least 93–95 %, after which the latter enters the liquefaction module. The article concludes that the amount of CO₂ produced directly depends on the carbon dioxide recovery factor of the membrane filter. The unit cost of liquid CO₂ obtained by the proposed method does not exceed the average market cost of liquid CO₂, which is due, firstly, to the use of atmospheric air, which contained only 0.04 % carbon dioxide in the volume fraction, and secondly, the use of membrane filters in a small amount as high-quality membrane filters would dramatically reduce the cost of a unit of liquid CO₂. The developed scheme is promising for industrial installations for natural gas purification and production of liquefied and compressed inert gases, in which CO₂ is a waste gas with a relatively high content in the «permeate», as well as for enterprises with an acute constant need for a stationary installation for the production of CO₂.

Keywords: carbon dioxide, obtaining CO₂, separation of gases, liquefaction of gases, liquefied gases.

Article info:

Received 16/03/2023, approved after reviewing 26/12/2023, accepted 10/01/2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-1-34-42

Article in Russian

For citation:

Syazin I. E., Kasyanov G. I., Gukasyan A. V., Kaminir O. N. The scheme of liquefied carbon dioxide production by membrane separation with recirculation system. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2024. No 1. p. 34–42. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-1-34-42

Введение

Диоксид углерода — газ, имеющий довольно широкий диапазон концентрации в атмосфере (0,03...0,05%), что, по всей видимости, зависит от географической широты места, интенсивности движения атмосферных масс и, главным образом, от выбросов в атмосферу продуктов сгорания топлива и переработки различного сырья, особенно сильно этот фактор выражен в крупных городах с большими промышленными предприятиями. Причем наблюдается тенденция к повышению уровня CO₂ в атмосфере [1, 2], что, однако, несмотря на теорию (считающуюся доказанной концепцией, что может быть, было обусловлено некоторыми политическими аспектами) глобального потепления вследствие повышения CO₂, учитывая подвижность атмосферных масс и выброс CO₂ в космическое пространство, не до конца обосновано, аналогичного мнения авторы публикаций [3, 4]. В том же самом ключе по вопросу зависимости хлорсодержащих хладагентов и уменьшения толщины озонового слоя можно отметить, что при принятии Монреальского протокола не учитывался факт максимального пропускания жесткого космического излучения в районах, где осуществлялись запуски ракет-носителей, что смело и открыто сообщается в некоторых статьях соответствующих специалистов, например, в работе [5]. По этой причине, в связи с известными политическими событиями, вполне возможно возвращение России к чистым хлорсодержащим хладагентам — R12 и R22, поставщиком которых предшественник РФ занимал одно из лидирующих мест по объемам производства, при этом для экономики России с 2010 г. убытки составляют 18 млрд \$/г — по результату ратификации Киотского протокола, а ранее — Монреальского протокола (3 млрд \$) [6].

Применение диоксида углерода во многих областях производства обусловлено его абсолютной инертностью и другими специфическими свойствами, характерными для соответствующих отраслей прикладного значения.

На сегодняшний день известны несколько способов получения диоксида углерода [7]: физическая абсорбция; хемосорбция; адсорбция; каталитическое гидрирование; мембранное разделение; ферментативная сепарация;

электрохимическое восстановление. Наиболее перспективным и нашедшим применение является мембранная технология, что отмечалось в работе [8].

В научных работах [9]–[14] представлены результаты исследования по получению сжиженных газов. Ввиду расширения областей применения CO₂, повышения объемов его потребления [15], увеличения потребности в сжиженных газах [16], компрессорном оборудовании [17], соответственно, и в схемах установок, выглядит перспективным разработка и исследование рациональной схемы по получению жидкого CO₂.

Современные мембранные технологии позволяют производить разделение газов при невысоких давлениях и температуре [18]. Мембранное разделение характеризуется несколькими основными параметрами (движущими силами разделения), определяющими эффективность и протекание самого процесса разделения: скорость газа v , давление газовой смеси p , плотность газов ρ , коэффициент диффузии d (зависит от толщины мембраны) и разность давлений на сторонах мембраны Δp . Характер движущей силы разделения газов зависит преимущественно от характеристик газоразделительных мембран — размера пор, полезной площади, толщины фильтрующего материала и давления смеси и др. Меняя значения v становится возможным определить податливость CO₂ разделению, в зависимости от напора смеси газов Q .

По данным работы [18], максимальные значения давления разделения не позволяют получить в одномембранном блоке компонент атмосферного воздуха (атмосферный целевой «ретентрат») с концентрацией выше 50 %. Отсюда следует, что применение более низких давлений может не сказаться на извлечении нужного компонента воздушной смеси (CO₂) за счет применения дополнительной единицы в блоке разделения (мембраны), а общее снижение давления в схеме позволит уменьшить металлоемкость и стоимость оборудования. Авторы работы [19] полагают, что увеличение температуры в схемах с непористыми мембранными блоками несколько повышает их удельную производительность, однако уменьшает селективность.

Цель и задачи исследований

Целью настоящей работы является разработка и исследование схемы по получению жидкого диоксида углерода посредством технологии мембранного разделения.

Задачами исследований являются:

- разработка схемы по мембранному получению сжиженного CO₂ из состава атмосферных газов;
- составление математических зависимостей, определяющих показатель производительности схемы;
- определение оптимальных основных термодинамических параметров работы (давление и температура) схемы;
- определение стоимости единицы CO₂ на основе максимальных энергозатрат на примере работы лабораторно-экспериментальной установки.

Результаты исследования и их обсуждение

Первая часть исследований посвящена схеме для аппаратного лабораторно-исследовательского исполнения на базе Кубанского государственного технологического университета. Примем условные обозначения на схемах, сведенные в табл. 1.

Разработанная установка по получению сжиженного CO₂ из атмосферного воздуха представляет собой два основных модуля: газоразделительный и холодильный (сжижающий).

На рис. 1 представлена схема модуля разделения смеси атмосферных газов с получением CO₂.

Воздух поступает в воздухоразделительный модуль через заслонку регулируемую ЗР при давлении 0,1 МПа и температуре 0...20 °С, проходит через фильтры грубой

Ф1, тонкой Ф2 и особо тонкой очистки Ф3. На всасывании предусмотрен обратный клапан КО, а перед системой фильтров установлен счетчик FG (что обосновано контрольно-измерительной задачей) и шаровый вентиль ВШ. Следующий после фильтров обратный клапан обеспечивает недопущение перепуска газа в обратную сторону, что снизило бы КПД и затруднило работу модуля. Винтовой безмасляный компрессор ВН1 обеспечивает перепад давлений, не загрязняя систему компрессорным маслом (что высвобождает лишний аппарат по его отделению), которое, как хорошо известно, в общем случае незначительно лучше смешивается с воздухом при более высоких температурах, однако на растворимость преимущественно влияет не температура, а давление [20]. Повышение температуры масла сопровождается уменьшением его плотности, что также увеличивает растворимость. В этой связи и требовалось обеспечить схему машинами сухого сжатия, что также определит чистоту мембранных блоков. Давление после компрессора составляет 0,7...0,9 МПа, при этом давлении по сравнению с более высокими значениями, становится возможным с помощью мембранной технологии произвести газоразделение атмосферных компонентов. Мембранные фильтры обладают селективной проницаемостью, разделение газов происходит за счет разности в скоростях диффузии компонентов воздуха, при этом CO₂ в сжатом состоянии при умеренных давлениях относится к среднескоростным газам.

В модуле разделения предусмотрен еще один винтовой насос-компрессор сухого типа ВН2, который также обеспечивает незагрязненность воздушной смеси маслом перед повторным газоразделением воздушной смеси на компоненты.

Таблица 1

Условные обозначения на схемах модулей разделения и ожижения CO₂

Table 1

Symbols on schemes of CO₂ separation and liquefaction modules

Буквенное условное обозначение на схеме	Наименование элемента	Буквенное условное обозначение на схеме	Наименование элемента
ЗР	Заслонка регулирующая	РП	Ресивер приемный для газообразного CO ₂
ВШ	Вентиль шаровый	ОЖ	Сборник жидкого CO ₂
Ф1... Ф5	Фильтр, соответственно, грубой (1), тонкой (2), особо тонкой очистки (3), комбинированный фильтр адсорбционный — фильтр-осушитель) (4–5)	КХ1... КХ2	Компрессор, соответственно, высоко- и низкотемпературного каскадов
КО	Клапан обратный	ВР	Вентиль регулирующий
ВН1... ВН2	Компрессор винтовой безмасляный	ТРВ	Вентиль терморегулирующий
ЭН	Электронагреватель	КП	Клапан предохранительный
КС	Клапан соленоидный	ОХ	Холодильник (охладитель газа)
ММ1... ММ3	Модули, соответственно, для отделения атмосферных газов (H ₂ , O ₂ , N ₂ , Ar) от CO ₂	КД	Конденсатор машины холодильной
Контрольно-измерительные приборы и автоматика			
FG	Счетчик проходящего газа (жидкости)	PI	Индикатор давления
PDS	Реле давления дифференциальное	TI	Индикатор температуры
PS	Реле давления	FI	Индикатор протока
PDC	Регулятор давления (на модуле разделения)	TE	Датчик температуры (на модуле сжижения для каскадной холодильной установки — термобаллон ТРВ)
АС	Реле концентрации	Н	Срабатывание по высокому значению
РС	Редуктор газовый	L	Срабатывание по низкому значению
P и t	Давление и температура	—	—

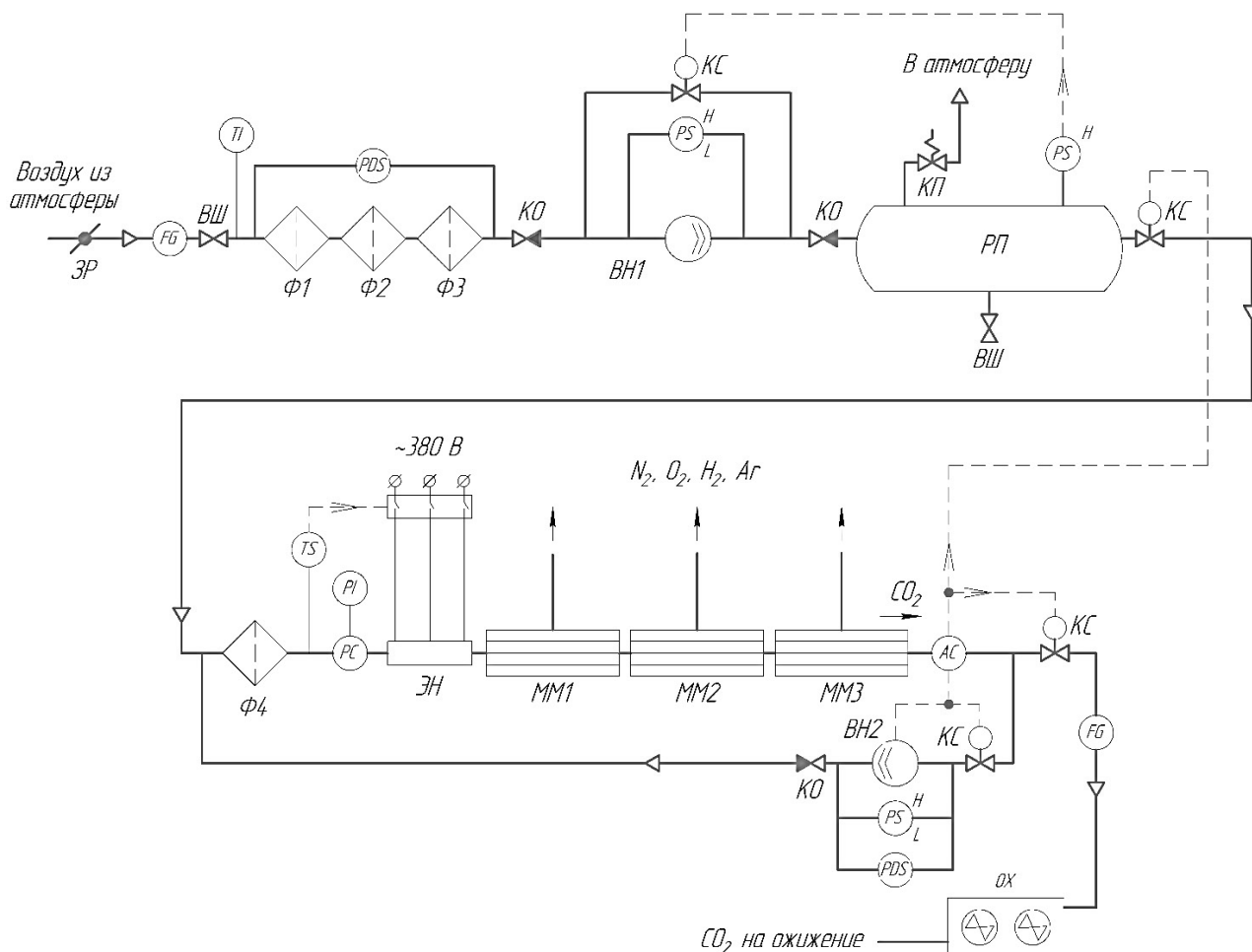


Рис. 1. Схема модуля разделения смеси атмосферных газов с получением CO₂
 Fig. 1. Schematic diagram of the atmospheric gas mixture separation module with CO₂ production

Реле концентрации АС при меньшем, чем 95 % содержания в смеси CO₂ после крайнего из фильтров ММ3, меняет схему питания катушек соленоидных клапанов, обеспечивая рециркуляцию CO₂ с помощью компрессора ВН2 в целях обеспечения более полной очистки газа CO₂ от «пермеата». В этой время компрессор ВН1, как предполагается, может не останавливаться, при этом осуществляется байпасирование свежего воздуха, что согласуется с более безопасной эксплуатацией компрессора (по количеству пусков, которое, как хорошо известно, является основной причиной полного отказа электродвигателей компрессоров). Для контроля загрязненности фильтров и обеспечения безопасной работы компрессоров (аналогично насосам) предусмотрены дифференциальные и обычные реле давления. Установка реле перепада давлений на компрессорах и вопрос байпасирования проверялись на адекватность действия в заданных условиях по результату срабатывания при аварийных режимах. Также в схеме предусмотрены предохранительные клапаны. Резерв в схеме РП обеспечивает запас газа, поступающего на газоразделение. При правильном подборе компрессора ВН1 (по производительности), емкости аппарата РП и производительности мембранных фильтров ММ1... ММ3 запуск компрессора не станет чаще рекомендуемого (максимум 2–3 запуска в час), можно отказаться от байпасирования.

В целях снижения давления перед ММ1... ММ3 установлен газовый редуктор РС, поскольку разделение газов в зависимости от свойств разделяющих мембран может происходить при определенном максимальном давлении, превышение которого нецелесообразно ввиду возможного повреждения мембран, недопустимого увеличения токовой нагрузки на электродвигатель компрессора, и исходя из известного уравнения индикаторной работы $L_{инд}$ сжатия газа 1–2 и расширения 3–4 при соответствующих давлениях p и объемах газа V :

$$L_{инд} = \int_1^2 V dp - \int_4^3 V dp. \tag{1}$$

Утверждение о максимальном рациональном давлении разделения P_{max} выражается уравнением вида

$$P_{max} = r_{max} Q_{max}, \tag{2}$$

если

$$r = f(P), \tag{3}$$

то, при коэффициенте пропорциональности r_{max} и максимальной производительности мембраны Q_{max} , исходя из максимальной работы выхода L_{max} пермеата и целевого ретентрата при их разнице последних Δ_{max} по обе стороны мембраны, другими словами, работы L_{max} , затрачиваемой на получение газов в мембранном блоке при максимальной разнице в пермеате и целевом ретен-

трате искомого компонента (CO_2) при времени работы оборудования (t):

$$Q_{\max} = u \lim_{t \rightarrow 0} \frac{L_{\max}}{t}, \quad (4)$$

где u — коэффициент пропорциональности (коэффициент потерь, или диссипации энергии, характеризующий потери реального цикла в отличие от теоретического).

Работа L определяется удельной работой l по получению целевого компонента начальной смеси газов при увеличении разницы его содержания в пермеате и целевом ретентрате $d\Delta$ при коэффициенте пропорциональности k , определяющим обратную пропорциональность между dl и $d\Delta$

$$dL = \frac{k \cdot dl}{d\Delta}, \quad (5)$$

при $k > 1$

$$\Delta = \Delta_2 - \Delta_1, \quad (6)$$

здесь Δ_2 и Δ_1 — реальные концентрации целевого компонента на выходе и входе в мембранный модуль (или разность концентрации пермеата и целевого ретентрата по обе стороны мембраны).

Тогда, чтобы оценить целесообразность повышения давления в разделительном цикле, можем найти приращение выхода целевого компонента при увеличении разницы давления dP отношением

$$dN = \frac{dL}{dP}. \quad (7)$$

Увеличение dN сопровождается уменьшением энтропии ds , что логично, исходя из уменьшения длитель-

ности цикла dt при максимальной производительности оборудования, что почти всегда сопровождается уменьшением бесполезного выброса целевого ретентрата.

Для цикла можем записать уравнения КПД идеального (8) и действительного теоретического (9) циклов

$$\eta_{100} = \frac{Q \cdot t}{L}; \quad (8)$$

$$\eta = \frac{Q \cdot t}{kL/\Delta}, \quad (9)$$

где Q и L — производительность и работа, соответственно.

В идеальном цикле отсутствуют потери, выраженные k и Δ , поэтому $\eta = 1$.

После фильтра адсорбционной очистки Ф4 (фильтра-осушителя) и редуктора РС установлен электронагреватель ЭН, чтобы обеспечить нужную температуру всасываемого атмосферного воздуха (32...37 °С) при умеренных давлениях.

Проведем обоснование применения в схеме дифференциального реле давления PDS. Работа компрессора в данном случае аналогична работе насоса. При повышении давления процесс разделения осуществляется с большими затратами энергии. По этим причинам повышать давление в рециркуляционном компрессоре (насосе) нецелесообразно, значит необходимо автоматическое устройство, которое обеспечит отключение насоса после создания незначительного перепада давления для обеспечения рециркуляции смеси газов, поступающей на разделение в мембранный блок. Таким способом обеспечивается поддержание заданного перепада давления в виде «напора», т. е. столба потока газа, обеспечив тем самым определенную пороговую скорость газа, ко-

Таблица 2

Влияние температуры смеси воздуха на выход диоксида углерода при постоянном давлении ($P = \text{const}$) на относительную продолжительность работы оборудования рециркуляции

Table 2

Influence of the temperature of air mixture on carbon dioxide yield at constant pressure ($P = \text{const}$) on the relative operating time of recirculation equipment

Температура смеси, °С	Давление смеси, МПа	Относительная влажность наружного воздуха, %	Выход CO_2 на ожижение (количество), %	Относительная продолжительность работы оборудования рециркуляции, %
32	≈ 0,8	65	93...95	100
35				98
37				97

Таблица 3

Влияние начального давления смеси воздуха на выход диоксида углерода при постоянной температуре ($t = \text{const}$)

Table 3

Influence of initial pressure of air mixture on carbon dioxide yield at constant temperature ($t = \text{const}$)

Температура смеси, °С	Давление смеси после компрессора, МПа	Относительная влажность наружного воздуха, %	Выход CO_2 на ожижение (количество), %	Относительная продолжительность работы оборудования рециркуляции, %
35	0,5	65	93...95	100
	0,6			96
	0,7			94
	0,8			86
	0,9			85
	1,0			83

Таблица 4

Параметры полученного сжиженного CO₂

Table 4

Parameters of the obtained liquefied CO₂

Количество атмосферного (всасываемого) воздуха на 1 л CO ₂	Количество сжиженного CO ₂	Температура сжиженного CO ₂	Давление сжиженного CO ₂	Относительная влажность наружного воздуха, %	Температура наружного воздуха
≈6750 л	1 л	-15 °C	4 МПа	65	15 °C

торая является основной принципа газоразделения чистых атмосферных компонентов. Таким образом, в схеме предусматривается аварийное реле давления PS и дифференциальное управляющее реле давления PDS.

Чем выше давление, тем больше из воздуха выпадает конденсата (H₂O), сжатие воздуха в смеси с H₂O вызывает прирост энтропии системы (при дальнейшем удалении H₂O). Данный факт стал причиной применения в начале процесса отделения большей части водяных паров с помощью фильтров-осушителей (ФН1... ФН3), установленных перед компрессором, поскольку, согласно закону Дальтона о парциальных давлениях, давление смеси пропорционально сумме парциальных давлений компонентов (в том числе H₂O), соответственно, по уравнению (1) величина работы в результате этого несколько уменьшается.

Рис. 2 демонстрирует схему модуля сжижения CO₂.

Температура кипения хладагента высокотемпературного каскада должна быть пределах 5... -20 °C, низкотемпературного -80...5 °C, что обеспечит возможность перевода CO₂ в жидкое агрегатное состояние (или нахождение CO₂ преимущественно в жидкой фазе) в широком диапазоне значений температур. Следует заметить, что температура любого газа на входе в вентиль ВР в целях его ожигения должна быть ниже точки инверсии.

Результаты экспериментальной части для первого модуля (модуля разделения смеси) сведены в табл. 2, 3. За основной индикатор наиболее подходящего значения термодинамического параметра разделения взята относительная продолжительность работы оборудования рециркуляции (т. е. минимальная продолжительность по отношению к максимальной для данного диапазона температур и давления).

Как видно из табл. 2, температура незначительно скаывается на продолжительности процесса (соответственно, и на энергозатратах), к тому же температура, более 40 °C, вследствие увеличения давления CO₂, согласно закону Шарля, негативно может повлиять на материал мембраны, сократив срок ее службы. В этом направлении необходимы дополнительные данные от производителей, которые, обычно, создают мембранные картриджи под технологию, основанную на сжижении как последнего этапа процесса получения инертного атмосферного газа.

Влияние температуры и давления на результат протекания процесса разделения сведен в табл. 3.

Температура на уровне 35 °C была выбрана на основе экспериментальных данных табл. 2, с учетом того, что критическая температура CO₂ составляет 31,1 °C.

Очень важным аспектом следует отметить определяющую функцию характеристик мембран в части влияния

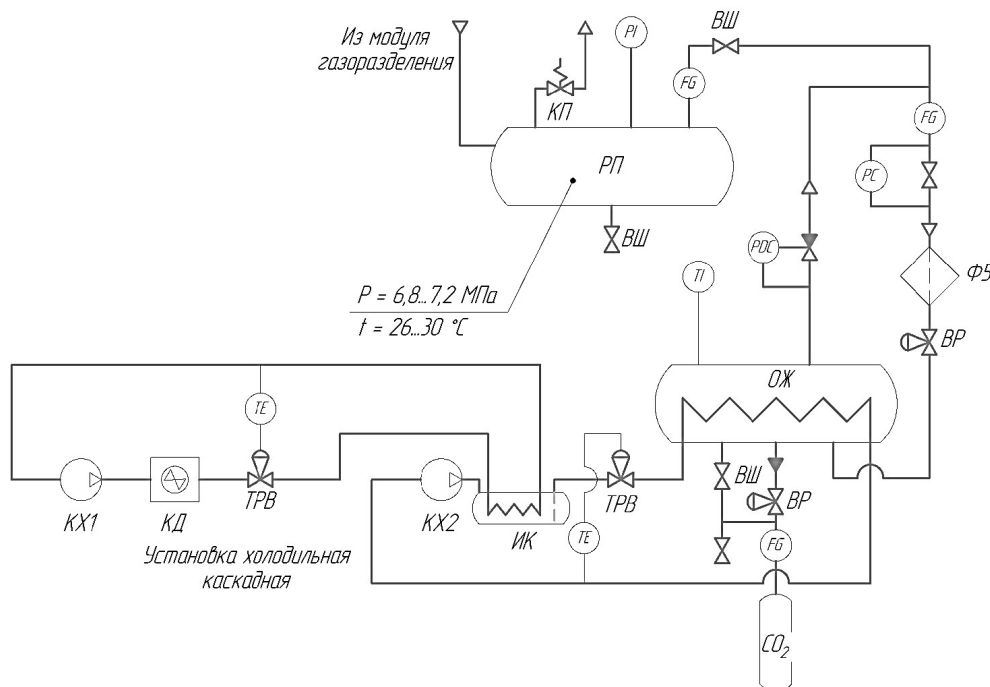


Рис. 2. Схема модуля сжижения CO₂

Fig. 2. Schematic diagram of CO₂ liquefaction module

на количество получаемого CO_2 , кратность рециркуляции газовой смеси, давление и температуру процесса.

Результаты экспериментальной части по получению сжиженного CO_2 представлены в табл. 4.

При расчете коэффициента извлечения, что составляет долю проникшего через мембрану потока CO_2 , было принято объемное содержание CO_2 в атмосферном воздухе приблизительно равное 0,04 %. Данные показали, что коэффициент извлечения применяемых мембран составил 0,37, т. е. приблизительно 37 % от первоначального содержания CO_2 во всасываемом воздухе. Такой относительно низкий процент извлечения обусловлен малым количеством блоков мембран, применением фильтрующего материала мембран с некоторой степенью износа и в целом недостаточным несовершенством мембранных материалов. При правильном управлении системой сброса «пермеата» (рециркуляции), а также применение более качественных, соответствующих материалов в мембранах и увеличения в схеме количества последних, возможно извлечь большее количество CO_2 .

При определении затрат электроэнергии оборудования были взяты электрические мощности приводов, без учета их пусковых мощностей:

$$W_{\Sigma} = \sum W_{\text{в.км}} + \sum W_{\text{хм}} + \sum W_{\text{ск}}, \quad (10)$$

где $\sum W_{\text{в.км}}$ — суммарная мощность винтовых воздушный безмасляных компрессоров;

$\sum W_{\text{хм}}$ — суммарная мощность для работы каскадной холодильной машины;

$\sum W_{\text{ск}}$ — суммарная мощность на соленоидные клапаны.

Соответственно, суммарная мощность будет равна $W_{\Sigma} = 4,6 + 2,0 + 0,05 = 6,65$ кВт.

Суммарная продолжительность работы установки (обоих модулей) составило приблизительно 24 ч. Необходимо учитывать, что при подборе, подходящего под задачу оборудования, затраты на электропривод обычно снижаются и, как правило, чем выше объемная производительность компрессора, тем выше его КПД. В расчете на получение 1 л сжиженного CO_2 при условной

стоимости единицы электроэнергии 7,5 руб/кВт и потребленной мощности 54 кВт, себестоимость равна 405 руб, при этом стоило бы учитывать также, что срок службы мембранных блоков ограничен, что удорожает стоимость единицы CO_2 , как и периодичность обслуживания оборудования. Себестоимость полученного предлагаемым способом сжиженного CO_2 может существенно измениться в меньшую сторону при повышении коэффициента извлечения, что достигается качеством и количеством мембранных блоков. Средняя цена жидкого CO_2 гораздо ниже, но учитывая вышеупомянутые факторы, позволим заключить о перспективах приведенной схемы разделения атмосферных газов в целях получения сжиженного CO_2 .

Выводы

Проведенное исследование показало, что предложенная в работе схема, кроме основного назначения — получения CO_2 из атмосферных газов путем мембранного разделения, может быть применена (при условии некоторой доработки) для очистки природного газа (метана) от CO_2 с дальнейшим ожижением в целях полезного использования. Данная схема предусматривает в начале процесса получения сжиженного диоксида углерода осуществление процесса газоразделения, а затем ожижения. Дополнительной особенностью и отличием схемы является установка в указанной последовательности оборудования (фильтров, системы рециркуляции, клапанов, КИПиА, компрессоров и другого оборудования), позволяющей достичь высокую степень очистки CO_2 от газов, масла и примесей. Ввиду довольно низкого содержания CO_2 в атмосферном воздухе, данная схема, в первую очередь, перспективна для:

- установок ожижения азота, аргона, кислорода и других газов, как часть сложного технологического процесса ожижения газов соответствующих промышленных комбинатов;
- предприятий с высоким содержанием CO_2 в сбросных газах;
- предприятий с острой постоянной потребностью в CO_2 .

Литература

1. Гордеев Л. Ю. О влиянии автотранспорта на загрязнение атмосферного воздуха в горнопромышленных и сельских районах региона КМА // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: естественные науки. 2015. № 9 (206). С. 168–175.
2. Жумабоев А. Г. Очистка дымовых газов от диоксида углерода из промышленных выбросов и его утилизация // Universum: химия и биология. 2021. № 10–1 (88). С. 17–19.
3. Мазурин И. М. и др. Глобальная природоохранная гипотеза, создавшая глобальный кризис в выборе хладагентов. Часть 1. // Пространство и время. 2015. № 3 (21). С. 313–319.
4. Мазурин И. М. и др. Глобальная природоохранная гипотеза, создавшая глобальный кризис в выборе хладагентов. Часть 2. // Пространство и время. 2015. № 4 (22). С. 233–244.
5. Останина Н. Г., Кубриков М. В. Воздействие ракетно-космической техники на озоновый слой // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2012. Т. 1. № 8. С. 227–228.

References

1. Gordeev L. Yu. On the impact of motor transport on atmospheric air pollution in the mining and residential regions of the KMA region. *Scientific Bulletin of the Belgorod State University. Series: natural sciences*. 2015. no 9 (206). P. 168–175. (in Russian)
2. Zhumaboev A. G. Cleaning flue gases from nitrogen dioxide due to the danger of its disposal. *Universum: chemistry and biology*. 2021. no 10–1 (88). P. 17–19. (in Russian)
3. Mazurin I. M. et al. Global environmental hypothesis, which created a global crisis in the choice of refrigerants. Part 1. *Space and Time*. 2015. no 3 (21). P. 313–319. (in Russian)
4. Mazurin I. M. et al. Global environmental hypothesis, which created a global crisis in the choice of refrigerants. Part 2. *Space and Time*. 2015. no 4 (22). p. 233–244. (in Russian)
5. Ostanina N. G., Kubrikov M. V. The impact of rocket and space technology on the ozone layer. *Actual problems of aviation and cosmonautics*. 2012. vol. 1. no 8. P. 227–228. (in Russian)

6. Мазурин И. М. и др. Системный кризис при выборе рабочих тел энергетических установок. // *Пространство и Время*. 2013. Т. 2. № 1. С. 13.
7. Ахметова В. Р., Смирнов О. В. Улавливание и хранение диоксида углерода — проблемы и перспективы // *Башкирский химический журнал*. 2020. № 3. С. 103–115.
8. Касьянов Г. И., Сязин И. Е. Криообработка: учеб. пособие. Краснодар: Экоинвест, 2014. 372 с.
9. Лавренченко Г. К., Грудка Б. Г. Анализ показателей установок для производства низкотемпературного жидкого диоксида углерода // *Технические газы*. 2018. Т. 18. № 1. С. 20–27.
10. Патент № 2380628 C1 Российская Федерация, МПК F25J 1/00. установка ожижения диоксида углерода. / В. Н. Махлай и др. № 2008137873/06, заявл. 22.09.2008, опубл. 27.01.2010.
11. Патент № 2378590 C1 Российская Федерация, МПК F25J 1/02. Линия ожижения диоксида углерода. / В. Н. Махлай и др. № 2008137898/06, заявл. 22.09.2008, опубл. 10.01.2010.
12. Патент № 2376537 C1 Российская Федерация, МПК F25J 1/02. Способ ожижения диоксида углерода. / В. Н. Махлай и др. № 2008137902/06, заявл. 22.09.2008, опубл. 20.12.2009.
13. Технологические решения по снижению энергозатрат при производстве жидкого низкотемпературного диоксида углерода / С. В. Афанасьев, Ю. Н. Шевченко, С. П. Сергеев, В. А. Селезнев // Инновации и «зеленые» технологии: Региональная научно-практическая конференция: сборник материалов и докладов, Самара, 29 ноября 2017 года. Самара: Вектор, 2018. С. 51–59.
14. Афанасьев С. В. и др. Энергосбережение в производстве жидкого низкотемпературного диоксида углерода. // Проблемы экологии городского округа Тольятти и пути их решения: Сборник докладов конференции с участием предприятий, учреждений, организаций городского округа Тольятти. Тольятти: Кассандра, 2015. С. 10–12.
15. Roy Z., Halder G., Barman S. Carbon dioxide sorptive cooling in substitute model refrigeration system for replacing halogenated refrigerants // *Environmental Technology and Innovation*. 2021. Vol. 23. P. 101636.
16. Баранов А. Ю., Соколова Е. В., Иванов Л. В., Иконникова А. Ю. Перспективы развития технологий СПГ в Российской Федерации. // *Вестник Международной академии холода*. 2023. № 1. С. 23–34. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-1-23-34
17. Пронин В. А., Кованов А. В., Цветков В. А. Современное состояние и перспективы развития холодильного компрессоростроения. Часть 1. Рынок и производство. // *Вестник Международной академии холода*. 2023. № 1. С. 10–22. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-1-10-22
18. Бондаренко В. Л. и др. Мембранное разделение газовых смесей на основе компонентов воздуха // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2012. № 5 (5).
19. Акимов А. М. Теоретические основы мембранного разделения газовых смесей. // *Химические технологии*. 2020. vol. 6. no 4. p. 112–116.
20. Башта Т. М. Машиностроительная гидравлика. Справочник. М.: Машиностроение, 1971. 672 с.
6. Mazurin I. M. et al. Systemic crisis in the choice of working bodies of power plants. *Space and Time*. 2013. vol. 2. no 1. P. 13. (in Russian)
7. Akhmetova V. R., Smirnov O. V. Capture and storage of carbon dioxide — problems and prospects. *Bashkir chemical journal*. 2020. no 3. P. 103–115. (in Russian)
8. Kasyanov G. I., Syazin I. E. Cryoprocessing: textbook. allowance. Krasnodar: Ecoinvest, 2014. 372 p. (in Russian)
9. Lavrenchenko G. K., Grudka B. G. Analysis of indicators of installations for the production of low-temperature liquid carbon dioxide. *Technical gases*. 2018. vol. 18. No 1. P. 20–27. (in Russian)
10. Patent № 2380628 C1 Russian Federation, IPC F25J 1/00. Carbon dioxide liquefaction plant. V. N. Makhlay et al. no 2008137873/06, Appl. 09/22/2008, publ. 27.01.2010. (in Russian)
11. Patent № 2378590 C1 Russian Federation, IPC F25J 1/02. Carbon dioxide liquefaction line. / V. N. Makhlay et al. no 2008137898/06, Appl. 09/22/2008, publ. 01/10/2010. (in Russian)
12. Patent № 2376537 C1 Russian Federation, IPC F25J 1/02. process for liquefying carbon dioxide. V. N. Makhlay et al. no 2008137902/06, Appl. 09/22/2008, publ. 12/20/2009. (in Russian)
13. Technological solutions to reduce energy consumption in the production of liquid low-temperature carbon dioxide / S. V. Afanasiev, Yu. N. Shevchenko, S. P. Sergeev, V. A. Seleznev / Innovations and «green» technologies: Regional scientific and practical conference: collection of materials and reports, Samara, November 29, 2017. Samara: Vector, 2018. P. 51–59. (in Russian)
14. Afanasiev S. V. et al. Energy saving in the production of liquid low-temperature carbon dioxide. *Problems of ecology of the urban district of Togliatti and ways to solve them*: Collection of reports of the conference with the participation of enterprises, institutions, organizations of the urban district of Togliatti. Tolyatti: Kassandra, 2015. P. 10–12. (in Russian)
15. Roy Z., Halder G., Barman S. Carbon dioxide sorptive cooling in substitute model refrigeration system for replacing halogenated refrigerants. *Environmental Technology and Innovation*. 2021. V. 23. P. 101636.
16. Baranov A. Yu., Sokolova E. V., Ivanov L. V., Ikonnikova A. Yu. Prospects for the development of LNG technologies in the Russian Federation. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2023. No 1. p. 23–34. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-1-23-34 (in Russian)
17. Pronin V. A., Kovanov A. V., Tsvetkov V. A. State of the art and prospects for refrigerating compressor industry. Part 1. Market and production. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2023. No 1. p. 10–22. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-1-10-22 (in Russian)
18. Bondarenko V. L. et al. Membrane separation of gas mixtures based on air components. *Engineering Journal: Science and Innovations*. 2012. no 5 (5). (in Russian)
19. Akimov A. M. Theoretical foundations of membrane separation of gas mixtures. *Chemical technologies*. 2020. V. 6. no 4. P. 112–116. (in Russian)
20. Bashta T. M. Mechanical engineering hydraulics. Reference manual. Moscow, Mashinostroenie, 1971. 672 p. (in Russian)

Сведения об авторах

Сязин Иван Евгеньевич

К. т. н., доцент кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения Кубанского государственного технологического университета, 350020, г. Краснодар, ул. Красная, 135, 1syazin@gmail.com.
ORCID 0000-0003-3939-7722

Касьянов Геннадий Иванович

Д. т. н., профессор, профессор кафедры технологии продуктов питания животного происхождения Кубанского государственного технологического университета, 350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2, kasyanov@kubstu.ru, ORCID 0000-0001-9848-7715

Гукасян Александр Валерьевич

Д. т. н., доцент, директор Института механики, робототехники, инженерии транспортных и технических систем Кубанского государственного технологического университета, 350020, г. Краснодар, ул. Красная, 135, aleksandr_gukasyan@mail.ru.
ORCID 0000-0003-3622-448X

Каминир Ольга Николаевна

К. т. н., доцент кафедры общей математики Кубанского государственного технологического университета, 350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2, kaminir17@gmail.com,
ORCID 0000-0002-8506-6126

Information about authors

Syazin Ivan E.

Ph. D., Associate Professor of Technological Equipment and Life Support Systems Department of Kuban State Technological University, Russia, 350020, Krasnodar, 135 Krasnaya St., 1syazin@gmail.com.
ORCID 0000-0003-3939-7722

Kasyanov Gennady I.

D. Sc., Professor, Professor of the Department of Food Technology of Animal Origin of Kuban State Technological University, Russia, 350072, Krasnodar, 2 Moskovskaya St., kasyanov@kubstu.ru,
ORCID 0000-0001-9848-7715

Gukasyan Aleksandr V.

D. Sc., Associate Professor, Director of the Institute of Mechanics, Robotics, Engineering of Transport and Technical Systems of Kuban State Technological University, Russia, 350020, Krasnodar, 135 Krasnaya St., aleksandr_gukasyan@mail.ru.
ORCID 0000-0003-3622-448X

Kaminir Olga N.

Ph. D., Associate Professor of Department of General Mathematics of Kuban State Technological University, Russia, 350072, Krasnodar, 2 Moskovskaya St., kaminir17@gmail.com,
ORCID 0000-0002-8506-6126



Статья доступна по лицензии

Creative Commons «Attribution-NonCommercial»



**29-я международная выставка
«Оборудование, технологии, сырье и ингредиенты для
пищевой и перерабатывающей промышленности»
7-11 октября 2024 г.**

«Агропродмаш» – международная выставка оборудования, машин и ингредиентов для пищевой и перерабатывающей промышленности – на протяжении двух десятилетий демонстрирует лучшие мировые достижения, способствуя внедрению новых современных технологий российскими предприятиями пищевой и перерабатывающей промышленности.

«Агропродмаш» – абсолютный лидер среди выставок России по тематике «Пищевая промышленность, оборудование и ингредиенты» во всех категориях:

Пищевые технологии.

Переработка сырья. Оболочки.

МясоПром.

ПтицеПром.

РыбПром.

КондитерПром.

ХлебПром.

ЗерноПром.

ФруктПром.

МолТех.

Розлив.

Напитки.

Мороженое.

Ингредиенты.

Пищевая безопасность.

Холод.

УпакМаш.

Пищевая безопасность.

Организатор выставки:

ЦВК «Экспоцентр», 123100, Россия, Москва, Краснопресненская набережная, 14



<https://www.agroprod mash-expo.ru/>