

УДК 621.564.25:551.510.534

Г.К. Лавренченко, С.Г. Швец, А.В. КопытинУкраинская ассоциация производителей технических газов «УА-СИГМА», а/я 271, г. Одесса, Украина, 65026
e-mail: uasigma@paso.net

О РЕЗЕРВАХ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ЖИДКОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

Внедрение новых эффективных технологий производства карбамида обуславливает необходимость снижения затрат на получение низкотемпературного жидкого диоксида углерода. Для определения значений предельно низких затрат построена модель эталонного цикла углекислотной холодильной машины (УХМ), работающей в режиме ожижения CO_2 . Предложено для снижения удельных затрат энергии на производство указанного продукта, а также повышения эксергетического КПД идеализированных УХМ использовать в них переохлаждение сконденсированного при температуре окружающей среды CO_2 с помощью внешних холодильных машин. В качестве таких машин применяется компрессорная холодильная машина, работающая на R134a, или абсорбционная бромистолитиевая холодильная машина. Сравнение характеристик таких УХМ с машинами, реализующими циклы низкого и среднего давлений, показывает, что они не обладают преимуществами по сравнению с углекислотной машиной высокого давления, в которой применяется переохлаждение жидкого CO_2 перед его дросселированием.

Ключевые слова: Диоксид углерода. Компрессорная холодильная машина. Цикл Карно. Эталонный цикл. Работа ожижения. Абсорбционная бромистолитиевая холодильная машина. Термодинамические циклы высокого, среднего и низкого давлений. Компрессор многоступенчатого сжатия.

G.K. Lavrenchenko, S.G. Shvets, A.V. Kopytin

ABOUT RESERVES OF INCREASE OF A PRODUCTION EFFICIENCY LOW-TEMPERATURE LIQUID CARBON DIOXIDE

Introduction of new effective «know-how» of urea causes the necessity of decrease of expenses for reception of low-temperature liquid carbon dioxide. For definition of values of extremely low expenses is constructed the model of ideal cycle of carbon dioxide refrigerating machine (CDRM) working in a mode of liquation CO_2 . It is offered for decrease of specific expenses of energy on manufacture of the specified product, and also for increase of exergetic efficiency of idealized CDRM to use in them overcooling condense at ambient temperature CO_2 with the help of external refrigerating machines. As such machines the compressor refrigerating machine working on R134a, or absorptive lithium bromide refrigerating machine is applied. Comparison of characteristics such CDRM with machines realizing cycles of low and average pressure, shows that they don't possess advantages in comparison with carbon dioxide machine of high pressure in which overcooling of liquid CO_2 before it throttling is applied.

Keywords: Carbon dioxide. Vapor compression machine. Carno cycle. Ideal cycle. Work of the liquefaction. Absorption lithium bromide refrigeration machine. Thermodynamic cycle high, average and low pressure. Multi-stage compressor.

1. ВВЕДЕНИЕ

Газообразный диоксид углерода в относительно небольших количествах извлекают из дымовых газов и продуктов брожения [1]. С помощью углекислотных холодильных машин (УХМ) из него производят три вида продуктов: конденсированный при температуре

окружающей среды жидкий CO_2 , именуемый жидким диоксидом углерода высокого давления; жидкий CO_2 низкого давления; твёрдый CO_2 — так называемый сухой лёд.

В УХМ для этого реализуются циклы высокого давления с использованием поршневых компрессоров многоступенчатого сжатия. Работу УХМ в последние

годы стали также организовывать на основе циклов среднего давления, применяя для этого каскадную схему. Это позволяет несколько снижать затраты энергии на производство CO_2 низкого давления, но одновременно с этим происходит рост капитальных затрат, так как требуется включать в технологическую схему каскадной установки низкотемпературную холодильную машину. В такой установке можно вырабатывать только два продукта из перечисленных трёх.

Больше всего газообразного CO_2 производится в агрегатах синтеза аммиака, где от него очищают продукты риформинга природного газа [2]. В результате из блока риформинга постоянно выводятся два потока: газовая смесь $\text{H}_2\text{-N}_2$ для синтеза из неё аммиака и газообразный CO_2 .

Этот диоксид углерода, имеющий достаточно высокую чистоту, в большинстве своём применяется там же на предприятиях крупнотоннажной химии при производстве карбамида и метанола. Для этого он сжимается в компрессорных машинах до высоких давлений, при которых ведётся синтез этих продуктов. Некоторая часть CO_2 охлаждается в УХМ и выдаётся потребителям. Самым большим спросом при этом пользуется низкотемпературный жидкий CO_2 с давлением 1,6-1,8 МПа.

В настоящее время нами разработаны эффективные технологии, в которых низкотемпературный жидкий CO_2 может в больших количествах после сжатия его в насосе до давления 15 МПа подаваться на синтез карбамида [3]. Техничко-экономические показатели новых технологий будут зависеть от удельного энергопотребления УХМ, производящей требуемый для этого жидкий диоксид углерода. В связи с этим актуальным, несмотря на предыдущие наши исследования [4,5], является оценка возможных резервов повышения термодинамической эффективности получения низкотемпературного CO_2 .

2. ОСОБЕННОСТИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭТАЛОННОГО ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ЦИКЛА ОЖИЖЕНИЯ CO_2

В качестве объекта исследования выберем УХМ, работающую в режиме производства жидкого CO_2 низкого давления. Для анализа её предельных характеристик необходимо создать модель, по терминологии В.С. Мартыновского [6], эталонного цикла ожижительной холодильной машины.

Холодильная машина (см. рис. 1) работает с высоким конечным давлением сжатия CO_2 в многоступенчатом компрессоре. В его n ступенях сжатие осуществляется по обратимым адиабатам, например, 0-1, 2-3, 4-5 и 6-7. После последовательного сжатия газа в ступенях компрессора он каждый раз охлаждается до T_0 в результате его неравновесного теплообмена с окружающей средой. В случае, когда $n \rightarrow \infty$ многоступенчатое адиабатическое сжатие трансформируется в изотермическое 0-8 при $T_0 = \text{const}$. Этот процесс представляется как совокупность двух процессов изотермического сжатия с различными коли-

чествами CO_2 : в процессе 0-6 — y кг/кг; в 6-8 — 1 кг. Температуры конденсации и охлаждения приняты совпадающими с температурами окружающей среды T_0 и ожижения $T_{\text{ож}}$. В цикле используется однократное дросселирование.

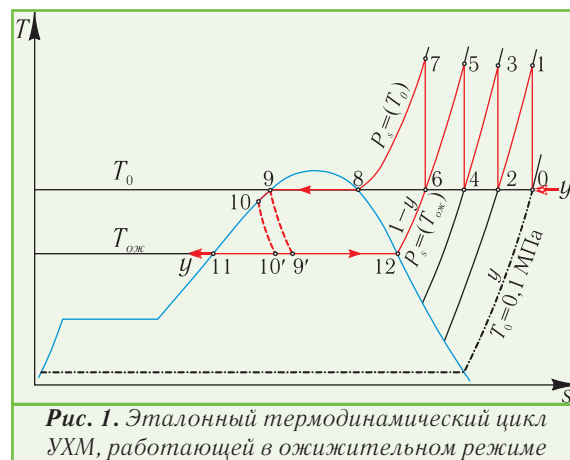


Рис. 1. Эталонный термодинамический цикл УХМ, работающей в ожижительном режиме

Назначение рассматриваемой УХМ — производство жидкого низкотемпературного диоксида углерода в виде насыщенной жидкости (точка 11) при давлении $P_s(T_{\text{ож}}) > P_0$. После дросселирования её образуется в количестве $y = (1-x)$, где x — степень сухости двухфазной смеси. Жидкая фаза y постоянно выводится из сепаратора УХМ. Паровая же фаза в количестве $(1-y)$ из сепаратора поступает в рекуперативный теплообменник, где нагревается в процессе 12-6 за счёт подвода теплоты от охлаждаемого в процессе 9-10 прямого потока сконденсированного CO_2 . Затем это количество пара $(1-y)$ после смешения с предварительно сжатым от P_0 до $P_s(T_{\text{ож}})$ потоком газообразного диоксида углерода в количестве y окончательно изотермически компримируется в процессе 6-8 до давления $P_s(T_0)$. Работа изотермического сжатия

$$l_{\text{из}} = y[T_0(s_0 - s_6) - (i_0 - i_6)] + [(1-y)(T_0(s_6 - s_8) - (i_6 - i_8))]. \quad (1)$$

Для определения $l_{\text{из}}$ необходимо установить количество жидкости y , производимой в разомкнутом термодинамическом цикле. Оно находится из решения системы уравнений:

$$(i_6 - i_{12})(1-y) = i_9 - i_{10}; \quad (2)$$

$$y = (i_{12} - i_{10'}) / (i_{12} - i_{11}); \quad (3)$$

$$i_{10} = i_{10'}. \quad (4)$$

Из (2)-(4) следует, что

$$y = (i_6 - i_9) / (i_6 - i_{11}). \quad (5)$$

Смоделированный указанным образом эталонный цикл ожижительной УХМ характеризуют два показателя:

1. Удельный расход энергии на ожижение диоксида углерода

$$l_{ож} = l_{из} / y, \tag{6}$$

где $l_{из}$ — работа изотермического сжатия, затрачиваемая в цикле и определяемая по формуле (1).

2. Эксергетический КПД

$$\eta_e = y l_{ож}^{min} / l_{из}, \tag{7}$$

где $l_{ож}^{min}$ — минимальная работа ожижения, которая требуется при обратимом переводе газообразного CO_2 из состояния равновесия с окружающей средой (точка 0) в состояние насыщенной жидкости (точка 11). Из точки 0 в точку 11, как известно, можно, с одной и той же по величине работой, перейти обратимо различными путями [7]. Наиболее естественный из них — 0-6-12-11. При обозначениях, соответствующих рис. 1,

$$l_{ож}^{min} = T_0 (s_0 - s_{11}) - (i_0 - i_{11}) \tag{8}$$

или

$$l_{ож}^{min} = e_{11} - e_0, \tag{9}$$

где $e = i - T_0 s$ — удельная эксергия потока газа.

На эффективности эталонного цикла сказываются две потери от необратимости, обусловленные, во-первых, дросселированием CO_2 в процессе 10-10' и, во-вторых, теплообменом в рекуперативном теплообменнике между прямым и обратным потоками в процессах 12-6 и 10-10' при конечных разностях температур.

Наличие необратимых процессов приводит к тому, что согласно второму началу термодинамики изменение энтропии тел (ожижаемого газа и окружающей среды), участвующих в разомкнутом цикле ожижения, должно быть больше нуля. В изотермических процессах 0-6 и 6-9, в которых рабочее тело взаимодействует с окружающей средой,

$$\Delta s_1 = q_0 / T_0 = y (s_0 - s_6) + (s_6 - s_9), \tag{10}$$

где q_0 — количество теплоты, отводимой от рабочего тела в среду с температурой T_0 .

Энтропия ожижаемого CO_2 уменьшается. Её изменение

$$\Delta s_2 = y (s_{11} - s_0). \tag{11}$$

С учётом (10) и (11)

Таблица 2.

Показатель	Значения при различных процессах сжатия	
	изотермическое	адиабатное
Доля производимого низкотемпературного жидкого CO_2 y , кг/кг	0,668	0,668
Суммарная работа изотермического сжатия в процессах 0-6 и 6-8 $l_{из}$, кДж/кг	155,5	—
Суммарная работа адиабатного сжатия в 4-х ступенях $l_{ад}$, кДж/кг	—	185,4
Удельный расход энергии на ожижение CO_2 $l_{ож}$, кДж/кг	232,7	277,5
Минимальная работа ожижения $l_{ож}^{min}$, кДж/кг	209,1	209,1
Эксергетический КПД η_e	0,90	0,75

$$\Delta s_1 + \Delta s_2 = (s_6 - s_9) - y (s_6 - s_{11}) > 0. \tag{12}$$

С другой стороны, рост энтропии в перечисленных необратимых процессах составит:

$$\Delta s_{оп} = s_{10'} - s_{10}; \tag{13}$$

$$\Delta s_{пто} = (s_6 - s_{12})(1 - y) - (s_9 - s_{10}), \tag{14}$$

где $\Delta s_{оп}$, $\Delta s_{пто}$ — рост энтропии, вызванный неравновесностью используемых в эталонном цикле ожижения процессов дросселирования и теплообмена между потоками рабочего тела в рекуперативном теплообменнике.

После суммирования $\Delta s_{оп}$ с $\Delta s_{пто}$ получаем:

$$\Delta s_1 + \Delta s_2 = \Delta s_{оп} + \Delta s_{пто} > 0. \tag{15}$$

В этом можно легко убедиться, если в преобразованиях учитывать, что $y = (s_{12} - s_{10'}) / (s_{12} - s_{11})$.

Перечисленные потери от необратимости объясняются особенностями применяемого способа ожижения диоксида углерода и параметрами эталонного цикла УХМ. Для оценки характеристик цикла заддимся его параметрами (см. табл. 1).

Таблица 1.

Параметр	Значение
Температура окружающей среды (конденсации), К (°С)	293 (20)
Давление нагнетания $P_s(T_0)$, МПа	5,72
Давление всасывания P_0 , МПа	0,1
Температура ожижения $T_{ож}$, К (°С)	246,5 (−26,5)
Давление производимого низкотемпературного жидкого CO_2 , МПа	1,6

Использував указанные параметры, вычислим основные характеристики цикла. Примем, что в процессах 6-8, 8-9, 9-10, 10-10' участвует 1 кг CO_2 . Результаты расчётов сведём в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что построенный эталонный термодинамический цикл ожижительной УХМ обладает достаточно высокими значениями эксергетического КПД и доли получаемого продукта. Хотя желательно было бы коэффициент ожижения иметь близким к единице, но, конечно, при относительно небольших удельных затратах энергии. Такое решение, что немаловажно, позволит использовать в составе УХМ

компрессор с равными расходами газа в его ступенях, так как потока, реализующего процесс 12-6, в ней практически не будет.

Модель эталонного цикла ожижения CO_2 имеет определенное методическое значение. Она позволяет при наличии в цикле минимальных собственных потерь, которые принимались нами во внимание, получить наилучшие значения основных его показателей.

Для изучения возможных путей улучшения показателей УХМ, которую назовём идеализированной, будем использовать в ней n -ступенчатое сжатие газа по обратимым адиабатам, например, в процессах 0-1, 2-3, 4-5 и 6-7 (см. рис. 1). Значения показателей УХМ с адиабатными процессами сжатия для сравнения приведены в табл. 2. Видно, что они уступают аналогичным показателям УХМ с изотермическими процессами сжатия рабочего тела.

Рассмотрим резервы повышения эффективности идеализированной УХМ, работающей в режиме производства низкотемпературного жидкого диоксида углерода.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИДЕАЛИЗИРОВАННЫХ УХМ

На начальном этапе исследования проведём оценку предлагаемых способов улучшения характеристик УХМ в рамках цикла, в котором сжатие газа производится по обратимым адиабатам в многоступенчатом компрессоре.

Анализ показывает, что при незначительных дополнительных затратах работы можно повысить одновременно и коэффициент ожижения y , и эксергетический КПД η_e идеализированной УХМ, если организовать в ней эффективное переохлаждение жидкого CO_2 перед дросселированием.

Необходимый для переохлаждения CO_2 холод можно производить с помощью различных термодинамических циклов. Целесообразность такого приёма подтверждают наши предыдущие исследования идеализированной аммиачной холодильной машины (АХМ) [8]. В результате нами была подтверждена возможность повышения основных показателей АХМ: холодильного коэффициента — на 12,6 % и удельной холодопроизводительности — на 17,3 %. На эффективность переохлаждения жидкого хладагента ещё ранее обращалось внимание В.М. Бродягин-ским [9].

Определим предельные значения показателей идеализированной УХМ (см. рис. 2) при использовании в ней для переохлаждения жидкого диоксида углерода цикла Карно 13-9'-d-e-13 и «треугольного» цикла 13-9-e-13 [6]. Конечную температуру переохлаждения T_{13} принимаем равной $T_{ож}$. В этом случае температуры начала 13 и конца 13' процесса дросселирования будут равны, т.е. $T_{13'}=T_{ож}$. Холодопроизводительности циклов одинаковы и представляются площадью $c-13-9-b-c$ под изобарическим процессом 9-13 охлаждения жидкого CO_2 на изобаре $P_s(T_0)$. Вычислим значения удельных расходов энергии на ожи-

жение продукта $l_{ож}=l_{ад}/y$ при использовании двух указанных циклов для его переохлаждения. Необходимые для этого параметры возьмём из табл. 1.

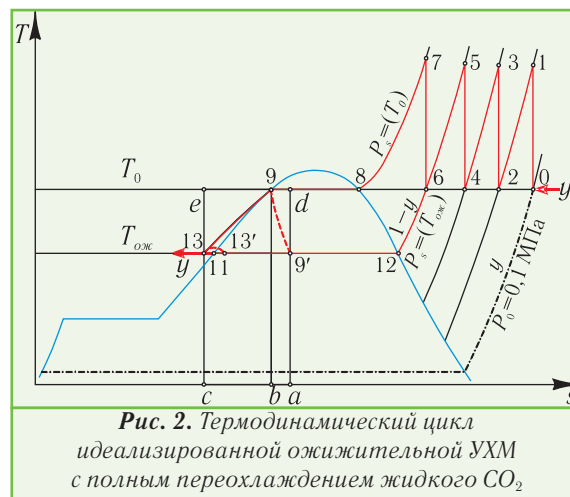


Рис. 2. Термодинамический цикл идеализированной ожижительной УХМ с полным переохлаждением жидкого CO_2

Суммарный удельный расход энергии идеализированной УХМ с переохлаждением жидкого диоксида углерода с помощью цикла Карно в процессе 9-13

$$l_{ож}^k = (l_{ад} + l_k) / y,$$

где l_k — работа в цикле Карно. Холодопроизводительность цикла Карно $(i_9 - i_{13})$ при $P_s(T_0)$ одновременно с этим равна разности энтальпий $(i_9 - i_{11})$ в двухфазной области на изобаре $P_s(T_{ож})$. Как можно заметить из сравнения данных, приведённых в таблицах 2 и 3, выигрыш в η_e от реализации такого комбинированного цикла получается всего на уровне 5,3 %. Это объясняется тем, что реализуемый цикл Карно 13-9'-d-e-13 в таких условиях является внешнеобратимым. Затраты работы в нём на переохлаждение жидкого CO_2 оказываются высокими из-за того, что весь необходимый холод вырабатывается на уровне наиминишей температуры $T_{ож}$.

Эффективность идеализированной УХМ можно повысить более существенно, если в ней переохлаждение жидкого CO_2 проводить с помощью обратимой холодильной машины, работающей по «треугольному» циклу 13-9-e-13.

Суммарный удельный расход энергии в идеализированной УХМ в этом случае

$$l_{ож}^{тр} = (l_{ад} + l_{тр}) / y, \quad (17)$$

где $l_{тр} = T_0(s_9 - s_e) - (i_9 - i_{13})$ — работа в «треугольном» цикле.

Из таблиц 2 и 3 следует, что рост η_e при осуществлении цикла УХМ с указанной обратимой холодильной машиной в её составе достигает 10,6 %.

Необходимо отметить, что в двух идеализированных УХМ с включёнными в их состав достаточно совершенными холодильными машинами вырабатывается предельно возможное количество низкотемпературного жидкого диоксида углерода ($y=0,99$).

Таблица 3.

Показатель	Значения при различных процессах переохлаждения жидкого CO ₂	
	Карно	«Треугольный» цикл
Доля производимого низкотемпературного жидкого CO ₂ y , кг/кг	0,99	0,99
Суммарная работа адиабатного сжатия в 4-ёх ступенях l_{ad} , кДж/кг	239,1	239,1
Работа в холодильном цикле для переохлаждения жидкого CO ₂ , кДж/кг: — при использовании цикла Карно — в случае применения «треугольного» цикла	21,6 —	— 9,0
Удельный расход энергии на ожижение CO ₂ кДж/кг: — $l_{ож}^к$ — $l_{ож}^{тр}$	263,3 —	— 250,6
Минимальная работа ожижения $l_{ож}^{min}$, кДж/кг	209,1	209,1
Эксергетический КПД η_e	0,79	0,83

Определим характеристики УХМ, в которых для переохлаждения жидкого CO₂ будут использоваться более доступные способы производства холода.

4. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ В УХМ

Для повышения эффективности УХМ можно ориентироваться на три пути решения этой задачи. Первый из них основывается на использовании для переохлаждения жидкого диоксида углерода отдельной фреоновой компрессорной холодильной машины (КХМ). Второй путь предусматривает применение для этой цели теплоиспользующей абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины (АБХМ). Источники теплоты для АБХМ — горячая вода с температурой не ниже 95 °С, водяной пар и другие потоки относительно низкопотенциальных теплоносителей. Однако более эффективным оказывается третий путь, когда переохлаждение жидкого CO₂ проводится совместно в АБХМ и КХМ.

Технологические схемы УХМ, в которых реализуются перечисленные варианты повышения эффективности, приведены на рис. 3.

Для переохлаждения жидкого диоксида углерода в схеме УХМ, показанной на рис. 3,а, используется

компрессорная холодильная машины, работающая на R134а. Температуры кипения R134а варьировались от –26,5 до 10 °С. Температура конденсации в КХМ принималась равной 20 °С. Было установлено, что при снижении температурного уровня производимого холода, несмотря на рост затрат в КХМ, суммарная удельная работа уменьшается.

На рис. 3,б изображена схема УХМ, в которой для переохлаждения CO₂ применяется АБХМ, для её питания используется высокотемпера-

турная часть теплоты компримирования диоксида углерода. За счёт этой теплоты АБХМ может переохлаждать жидкий диоксид углерода до 7 °С.

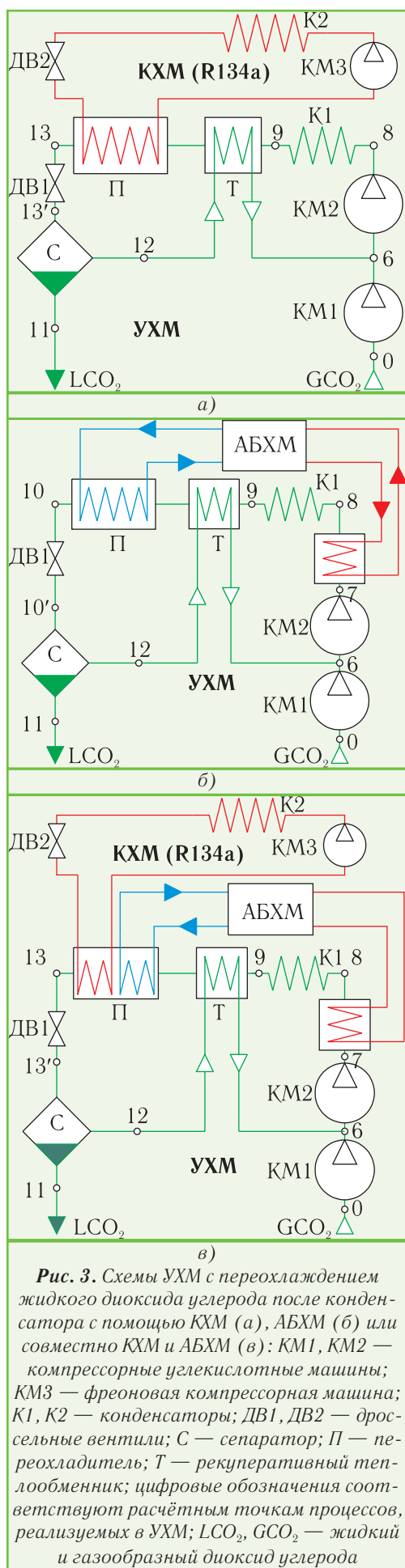
Целесообразно организовать переохлаждение диоксида углерода перед дросселированием в два этапа. Причём, на первом этапе можно применить АБХМ, а на втором — КХМ (см. рис. 3,в).

В табл. 4 приведены результаты расчётов характеристик идеализированных УХМ, созданных с учётом технологических схем, изображенных на рис. 3. В первой из них (см. рис. 3,а) для переохлаждения жидкого CO₂ до –26,5 °С, т.е. до температуры, соответствующей давлению 1,6 МПа, используется КХМ. В другой схеме (рис. 3,б) для переохлаждения жидкости до 7 °С применяется АБХМ. Незначительное предварительное переохлаждение жидкого CO₂ после конденсатора в таких УХМ осуществляется в рекуперативном теплообменнике Т, показанном на рис. 3,б. И, наконец, в последней колонке приведены данные, характеризующие последнюю схему, когда с помощью АБХМ охлаждают жидкий диоксид углерода до 7 °С, а потом в КХМ — до –26,5 °С, т.е. до равновесной температуры ожижения CO₂.

Из табл. 4 следует важный вывод о том, что характеристики трёх рассмотренных УХМ оказываются

Таблица 4.

Показатель	Значения при различных процессах переохлаждения жидкого CO ₂		
	рис. 3,а	рис. 3,б	рис. 3,в
Доля производимого низкотемпературного жидкого CO ₂ y , кг/кг	0,99	0,75	0,99
Суммарная работа адиабатного сжатия в 4-ёх ступенях l_{ad} , кДж/кг	239,1	199,1	239,1
Работа в холодильном цикле для переохлаждения жидкого CO ₂ $l_{ож}$, кДж/кг	26,7	—	17,2
Удельный расход энергии на ожижение CO ₂ , кДж/кг	268,5	265,1	258,9
Минимальная работа ожижения $l_{ож}^{min}$, кДж/кг	209,1	209,1	209,1
Эксергетический КПД η_e	0,78	0,79	0,81



близкими. В таком случае, очевидно, нужно отдавать предпочтение схеме (см. рис. 3,б), где в УХМ переохладение жидкого CO₂ будет выполняться с помощью АБХМ.

5. ХАРАКТЕРИСТИКИ УХМ НИЗКОГО И СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЙ

В УХМ низкого давления компримирование газообразного диоксида углерода производится до давления 1,6 МПа. Для сжатия можно применять двухступенчатый компрессор. Указанному давлению нагнетания соответствует температура ожигения диоксида углерода — 26,5 °С.

Данные из табл. 5 дают представление о характеристиках двух типов УХМ низкого давления. В указанных машинах для охлаждения газообразного CO₂ в процессе 6-12 (рис. 2) применяют КХМ малой производительности или КХМ и АБХМ. Вся же теплота фазового перехода (процесс 11-12) отводится более мощной КХМ, работающей на R134a.

Проводилась также оценка значений основных характеристик идеализированных УХМ, реализующих цикл среднего давления (см. табл. 6). Принималось, что давление ожигаемого CO₂ равняется 3,5 МПа. Соответствующая этому давлению температура — 0 °С. Необходимый для ожигения CO₂ холод производится в КХМ, использующей R134a в качестве хладагента. Предварительное охлаждение сжатого до 3,5 МПа газообразного CO₂ перед ожигением осуществлялось в рекуперативном теплообменнике за счёт холода паров CO₂, которые образуются после его дросселирования от 3,5 до 1,6 МПа. Этот поток паров CO₂ с температурой — 26,5 °С проходит через рекуперативный теплообменник, где нагревается, охлаждая газообразный поток CO₂ с давлением 3,5 МПа. В табл. 6 этой УХМ отвечает левая колонка значений. В правой колонке приведены характеристики УХМ, в которой ожигенный при 3,5 МПа CO₂ переохлаждается с помощью отдельной КХМ (см. рис. 3,а) до температуры — 26,5 °С, отвечающей равновесному давлению 1,6 МПа.

Анализ приведённых в таблицах 4-6 данных указывает на то, что УХМ, создаваемые по схемам низкого и среднего давлений, не обладают заметными преимуществами перед УХМ высокого давления.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Переохладение жидкого диоксида углерода перед его дросселированием позволяет повысить эффективность УХМ, работающих в режимах производства низкотемпературного жидкого CO₂ по циклам высокого давления. Переход на циклы среднего и низкого давлений, несмотря на существенное усложнение УХМ, не даёт заметного выигрыша по основным показателям в сравнении с циклами высокого давления.

В таких УХМ высокого давления появляется возможность использования многоступенчатого компримирования.

Таблица 5.

Показатель	Значения при различных процессах охлаждения и ожижения газообразного CO ₂	
	КХМ	КХМ и АБХМ
Доля производимого низкотемпературного жидкого CO ₂ y, кг/кг	1	1
Суммарная работа адиабатного сжатия в 2-ух ступенях $l_{ад}$, кДж/кг	179,4	179,4
Работа в холодильном цикле для охлаждения и конденсации жидкого CO ₂ , кДж/кг	80,7	77,6
Удельный расход энергии на ожижение CO ₂ $l_{ож}$, кДж/кг	260,1	257
Минимальная работа ожижения $l_{ож}^{min}$, кДж/кг	209,1	209,1
Эксергетический КПД η_e	0,80	0,81

Таблица 6.

Показатель	Значения при различных процессах охлаждения, ожижения и переохлаждения CO ₂	
	с регенерацией	рис. 3,а
Доля производимого низкотемпературного жидкого CO ₂ y, кг/кг	0,80	1
Суммарная работа адиабатного сжатия в 3-ёх ступенях $l_{ад}$, кДж/кг	184,4	219,4
Работа в холодильном цикле (кДж/кг) для:		
— охлаждения	—	2,5
— ожижения	17,3	18,6
— переохлаждения	—	13,8
Удельный расход энергии на ожижение CO ₂ , кДж/кг	252,1	254,2
Минимальная работа ожижения $l_{ож}^{min}$, кДж/кг	209,1	209,1
Эксергетический КПД η_e	0,83	0,82

рессора с равными расходами в ступенях сжатия. Для работы в этих условиях можно создать более эффективный и надёжный, а также хорошо уравновешенный компрессор.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пименова Т.Ф. Производство и применение сухого льда, жидкого и газообразного диоксида углерода. — М.: Лёгкая и пищевая промышленность, 1982. — 208 с.
2. Справочник азотчика. В 2-ух томах. Т.2. — М.: Химия, 1969. — 444 с.
3. Лавренченко Г.К., Копытин А.В. Энергетические показатели различных процессов сжатия диоксида углерода до сверхкритических давлений// Технические газы. — 2007. — № 1. — С. 31-36.
4. Лавренченко Г.К., Копытин А.В., Шве́ц С.Г. Совершенствование комплексов для производства жидкого низ-

котемпературного диоксида углерода из дымовых газов. 1. Снижение энергопотребления в циклах высокого давления// Технические газы. — 2004. — № 1. — С. 12-21.
5. Лавренченко Г.К., Копытин А.В., Шве́ц С.Г. Совершенствование комплексов для производства жидкого низкотемпературного диоксида углерода из дымовых газов. 2. Снижение энергопотребления в каскадных установках среднего давления// Технические газы. — 2004. — № 2. — С. 9-14.
6. Мартыновский В.С. Анализ действительных термодинамических циклов. — М.: Энергия. 1972. — 216 с.
7. Бродянский В.М., Меерзон Ф.И. Производство кислорода. — М.: Изд-во «Металлургия», 1970. — 384 с.
8. Лавренченко Г.К., Копытин А.В., Шве́ц С.Г. Пути повышения эффективности крупных аммиачных холодильных машин// Технические газы. — 2008. — № 3. — С. 60-63.
9. Бродянский В.М. Низкотемпературная техника на пороге XXI века// Холодильная техника. — 1998. — № 1. — С. 26-28.