

**Г.К. Лавренченко\*, М.Б. Кравченко\*\***

Одесская государственная академия холода, ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, Украина, 65082

\*e-mail: uasigma@paco.net

\*\*e-mail: kravtchenko@i.ua

## ТЕПЛОВАЯ МАШИНА КАК СТУПЕНЬ ОХЛАЖДЕНИЯ В ЦИКЛАХ КРИОГЕННЫХ СИСТЕМ

*Предложен новый способ улучшения характеристик криогенных систем, основанный на использовании ступени с тепловой машиной. Работа машины организуется в области криогенных температур. С помощью тепловой машины производится дополнительное охлаждение потока рабочего тела с целью снижения потерь при его дросселировании. На примере рефрижератора и ожижителя Линде подтверждена возможность существенного увеличения их характеристик. Показано, что холодопроизводительность рефрижератора возрастает на величину, равную работе тепловой машины. Рост коэффициента ожижения в ожижителе Линде эквивалентен работе, производимой тепловой машиной. При использовании тепловой машины можно холодопроизводительность и эксергетический КПД азотного рефрижератора Линде увеличить в 2,4 раза.*

**Ключевые слова:** Криогенная система. Ступень криогенной системы. Рефрижератор. Ожижитель. Тепловая машина. Дросселирование. Холодопроизводительность. Эксергетический КПД.

**G.K. Lavrenchenko, M.B. Kravchenko**

## THE HEAT MACHINE AS THE COOLING STEP IN CYCLES OF CRYOGENIC SYSTEMS

*A new method for improving the characteristics of cryogenic systems, based on the use of step with the heat machine is offered. The machine work is organized in the field of cryogenic temperatures. An additional cooling stream of an actuating medium with the help of a heat machine is made for the purpose of decrease in losses at its throttling. The possibility of a substantial increase their characteristics is confirmed on the example of the refrigerator and liquefier Linde. It is shown that cold production of refrigerator increases on the size equal to work of the heat machine. The growth rate of liquefaction in the Linde liquefier is equivalent to the work made by heat machine. It is possible cooling and exergy efficiency of the nitrogen refrigerator Linde increase in 2,4 times when using a heat machine.*

**Keywords:** Cryogenic system. Step of cryogenic system. Refrigerator. Liquefier. Heat machine. Throttling. Refrigerating capacity. Exergy efficiency.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Структура криогенных систем базируется на концепции ступеней охлаждения [1,2]. К ним, например, в соответствии с классификацией [1], относятся ступени предварительного охлаждения, использования эффекта охлаждения и окончательного охлаждения. В криогенных системах, использующих термомеханические принципы охлаждения, можно выделить ступени, в которых реализуются такие эффекты внутреннего охлаждения, как дросселирование рабочего тела или расширение его с совершением внешней работы [3].

В данной работе рассматривается новый вид ступени — ступень с тепловой машиной (СТМ), все про-

цессы в которой осуществляются в области криогенных температур. Предложенный тип ступени не заменяет, а наоборот дополняет известные ступени. В ряде случаев СТМ позволяет улучшить характеристики низкотемпературных установок. Покажем, каким образом с помощью СТМ можно повысить эффективность регенеративных дроссельных циклов — так называемых циклов Линде. Однако вначале проанализируем характеристики традиционных рефрижераторов (R) и ожижителей (L) Линде.

### 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕФРИЖЕРАТОРОВ И ОЖИЖИТЕЛЕЙ ЛИНДЕ

Цикл Линде — один из наиболее простых циклов

криогенной техники. Вместе с тем, согласно [1], в нём проявляются два принципа работы криогенных систем: организация компримирования рабочего тела как компенсирующего процесса, в котором уменьшается его энтропия, и использование дросселирования в качестве процесса внутреннего охлаждения. На рис. 1 показана схема рефрижератора Линде и его термодинамический цикл в  $T$ - $s$ -диаграмме.

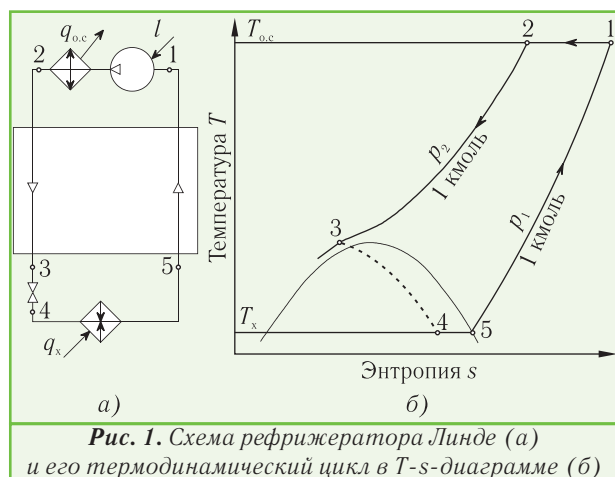


Рис. 1. Схема рефрижератора Линде (а) и его термодинамический цикл в  $T$ - $s$ -диаграмме (б)

Будем при анализе показателей рефрижератора рассматривать его идеализированный цикл, т.е. цикл с собственными потерями от необратимости. Затрачиваемая в цикле удельная работа находится как работа изотермического сжатия в процессе 1-2

$$l = \int_{p_1}^{p_2} v dp = T_{o.c.}(s_1 - s_2) - \Delta i_T, \quad (1)$$

где  $T_{o.c.}$  — температура окружающей среды;  $\Delta i_T = i_1 - i_2$  — изотермический дроссель-эффект рабочего тела.

Удельные холодопроизводительность цикла и его эксергетическую холодопроизводительность можно представить как

$$q_x = i_5 - i_4 = i_1 - i_2 = \Delta i_T; \quad (2)$$

$$q_{x.e} = |\tau_c| q_x, \quad (3)$$

где  $|\tau_c| = \left| 1 - \frac{T_{o.c.}}{T_x} \right|$  — фактор Карно — эксергетическая температурная функция [1];  $T_x$  — температура охлаждения рефрижератора.

Эффективность цикла рефрижератора будем оценивать эксергетическим КПД

$$\eta_e^R = |\tau_c| \frac{q_x}{l} = q_{x.e} / l. \quad (4)$$

Суммарные эксергетические потери в идеализированном цикле рефрижератора Линде

$$d = l - q_{x.e} > 0, \quad (5)$$

так как  $\eta_e^R < 1$ .

Они складываются из двух собственных потерь от необратимости. Первая вызвана неравновесностью регенеративного теплообмена прямого и обратного потоков рабочего тела в рекуперативном теплообменнике. Обусловленная этим эксергетическая потеря

$$d_{to} = T_{o.c.} \Delta s_{to} = T_{o.c.} [(s_1 - s_5) - (s_2 - s_3)]. \quad (6)$$

Потери в теплообменнике удобно показывать в  $q-1/T$ -диаграмме. Напомним, что площадь фигуры, заключённой между линиями прямого и обратного потоков на  $q-1/T$ -диаграмме противоточного рекуперативного теплообменника, пропорциональна величине термодинамических потерь от необратимости теплообмена [4].

Представим в  $q-1/T$ -диаграмме процессы в рекуперативном теплообменнике рефрижератора Линде, работающего на азоте (см. рис. 2). Примем давление прямого потока  $p_2 = 200$  бар, давление обратного —  $p_1 = 1$  бар. Термодинамические свойства азота определялись с помощью автоматизированной системы NIST Chemistry WebBook [5].

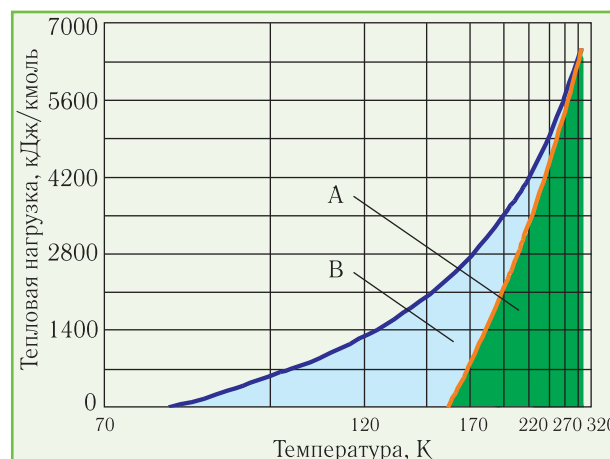


Рис. 2. Изображение на  $q-1/T$ -диаграмме процессов теплообмена в рефрижераторе, работающем по регенеративному циклу Линде: А — эксергия тепла, отводимого от прямого потока азота; В — термодинамические потери в теплообменнике

На диаграмме голубая линия соответствует более холодному обратному потоку, а красная — прямому более тёплому. Площадь фигуры А пропорциональна эксергии тепла, отводимого от прямого потока; площадь же фигуры В — термодинамическим потерям в теплообменнике. Эксергия теплоты, подводимой к обратному потоку, пропорциональна сумме площадей  $F_A$  и  $F_B$  фигур А и В.

Вторая потеря в рефрижераторе обусловлена необратимостью процесса дросселирования 3-4 (см. рис. 1). Соответствующая этому эксергетическая потеря

$$d_{др} = T_{o.c.} \Delta s_{др} = T_{o.c.} (s_4 - s_3). \quad (7)$$

Указанные две необратимости приводят к относи-

тельно низкому значению эксергетического КПД. Причём, потери при регенеративном теплообмене не только сами по себе снижают эффективность цикла, но также способствуют росту потери при дросселировании. Это проявляется в виде большой разности температур на холодном конце рекуперативного теплообменника. Например, при выбранных условиях реализации цикла указанная разность температур

$$\Delta T_{др} = T_3 - T_x = 155,8 - 77,2 = 78,6 \text{ К.}$$

Такое большое значение  $\Delta T_{др}$  приводит к тому, что потери эксергии в дросселе  $d_{др}$ , согласно (7), составляют 7779 кДж/кмоль или 73 % в общей потере эксергии. На рекуперативный же теплообменник при заданных условиях реализации цикла приходится потеря  $d_{то} = 2871$  кДж/кмоль (27 %). Наличие таких потерь обуславливает относительно невысокое значение эксергетического КПД идеализированного цикла рефрижератора  $\eta_e^R = q_{о.с.}/l = 2594/13243 = 0,2$ .

Удельная холодопроизводительность идеализированного рефрижератора Линде  $q_{о.с.} = \Delta i_7 = 899$  кДж/кмоль при этом оказывается меньше каждой из потерь  $d_{то}$  и  $d_{др}$ . Следовательно, большая часть работы цикла  $l$  расходуется на покрытие потерь от необратимости.

Остановимся теперь на основных термодинамических характеристиках ожижителя Линде. На рис. 3 представлены его схема и термодинамический цикл в  $T$ - $s$ -диаграмме.

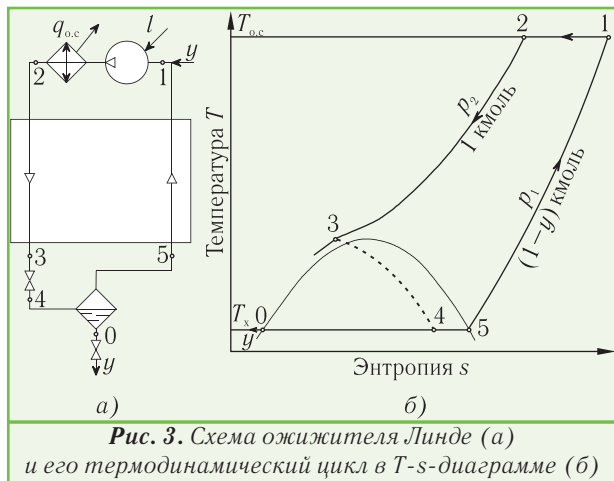


Рис. 3. Схема ожижителя Линде (а) и его термодинамический цикл в  $T$ - $s$ -диаграмме (б)

Удельная работа изотермического сжатия рабочего тела ожижителя определяется по приведённому ранее выражению (1). Что касается других показателей, то они оказываются принципиально другими. Так, если характеристикой интенсивности рефрижератора Линде является его удельная холодопроизводительность  $q_{о.с.}$ , то для ожижителя — коэффициент ожижения

$$y = \Delta i_7 / \Delta i_{ож}, \quad (8)$$

где  $\Delta i_{ож} = i_1 - i_0$  — количество тепла, которое нужно отвести при  $p = p_1$  в процессе охлаждения и ожижения газа.

Нужно учитывать, что значение  $y$  связано со степенью сухости  $x$  рабочего тела в точке 4 двухфазной области соотношением:

$$y = 1 - x = 1 - \frac{s_4 - s_0}{s_5 - s_0} = \frac{s_5 - s_4}{s_5 - s_0}. \quad (9)$$

Характеристика эффективности ожижителя Линде — эксергетический КПД, который представляется как

$$\eta_e^L = y l_{мин} / l, \quad (10)$$

где  $l_{мин} = T_{о.с.}(s_1 - s_0) - (i_1 - i_0)$  — минимальная работа ожижения рабочего тела.

Общая потеря эксергии в идеализированном цикле ожижителя

$$d = l - y l_{мин} > 0 \quad (11)$$

в связи с тем, что  $\eta_e^L < 1$ . Она включает в себя потерю от необратимости регенеративного теплообмена

$$d_{то} = T_{о.с.}[(s_1 - s_5)(1 - y) - (s_2 - s_3)] \quad (12)$$

и процесса дросселирования

$$d_{др} = T_{о.с.}(s_4 - s_3). \quad (13)$$

Расчёты характеристик ожижителя Линде с учётом указанных ранее условий реализации его идеализированного цикла показывают, что коэффициент ожижения  $y = 0,074$ , а эксергетический КПД  $\eta_e^L = 0,12$ . Малое значение  $y$  обусловлено невысокой величиной интегрального изотермического дроссель-эффекта  $\Delta i_7 = 899$  кДж/кмоль. Относительно большие эксергетические потери в цикле приводят к низкому значению  $\eta_e^L$ . Так, потеря из-за необратимости регенеративного теплообмена  $d_{то} = 2882$  кДж/кмоль, а потеря, вызванная необратимостью дросселирования,  $d_{др} = 8748$  кДж/кмоль. В общих потерях эксергии в ожижителе на долю  $d_{то}$  приходится 25 %, а на  $d_{др}$  — 75 %. Высокое значение  $d_{др}$  обусловлено большой разностью температур на холодном конце рекуперативного теплообменника ожижителя

$$\Delta T_{др} = 164,4 - 77,2 = 87,2 \text{ К,}$$

что превышает соответствующий температурный напор в этой части теплообменника в рефрижераторе Линде.

Из приведённых данных видно, что  $\eta_e^R > \eta_e^L$ , причём указанные эксергетические КПД при выбранных нами параметрах отличаются довольно существенно, а именно — в 1,67 раза. Покажем, что это неравенство будет выполняться всегда при одних и тех же значениях  $p_1, p_2, T_{о.с.}$  и  $T_x$ , определяющих условия реализации идеализированных циклов дроссельных рефрижератора и ожижителя.

С учётом (4) и (10)

$$\frac{\eta_e^R}{\eta_e^L} = \left( \frac{T_{o.c}}{T_x} - 1 \right) \left[ \frac{T_{o.c}(s_1 - s_0)}{i_1 - i_0} - 1 \right]^{-1} = \frac{l_K}{l_{min}}, \quad (14)$$

где  $l_K = (i_1 - i_0) \left[ (T_{o.c}/T_x) - 1 \right]$  — работа цикла Карно.

Записанное таким образом отношение эксергетических КПД фактически представляет собой отношение работ двух обратимых циклов 0-1''-1'-2 и 0-5-1-2, имеющих одинаковые холодопроизводительности. Действительно, как следует из рис. 4, в изображённых циклах

$$q_x = i_1 - i_0 = T_x(s_{1'} - s_0). \quad (15)$$

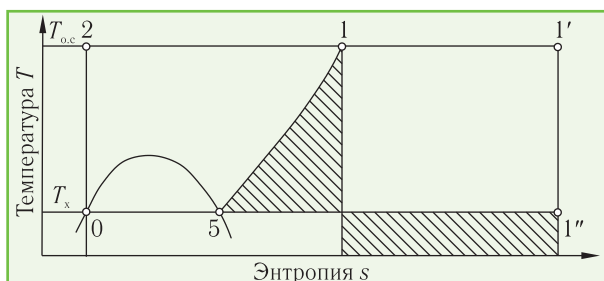


Рис. 4. Изображение в T-s-координатах двух циклов с равными холодопроизводительностями: цикла Карно 0-1''-1'-2 и цикла обратимого ожижения 0-5-1-2 (заштрихованные площади равны)

Подставив в (14) предыдущее выражение, получим:

$$\frac{\eta_e^R}{\eta_e^L} = \left( \frac{T_{o.c}}{T_x} - 1 \right) \left[ \frac{T_{o.c}(s_1 - s_0)}{T_x(s_{1'} - s_0)} - 1 \right]^{-1}. \quad (16)$$

Из (16) можно установить, что  $\eta_e^R/\eta_e^L > 1$ , так как  $(s_{1'} - s_0) > (s_1 - s_0)$ .

Теперь перейдём к исследованию возможности повышения характеристик и рефрижератора, и ожижителя Линде с помощью СТМ.

### 3. АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК РЕФРИЖЕРАТОРА И ОЖИЖИТЕЛЯ ЛИНДЕ С СТМ

Рассмотрение расчётных характеристик рефрижератора и ожижителя Линде показывает, что на их значения существенно влияют потери, вызванные необратимостью процессов дросселирования. Например, в ожижителе эта потеря в 3 раза превосходит потерю, которой сопровождается процесс регенеративного теплообмена. Причём неравновесность последнего, как отмечалось, обуславливает рост термодинамической потери при дросселировании.

Эта потеря может быть значительно уменьшена в результате использования в рассматриваемых рефрижераторе и ожижителе нескольких видов циклов тепловых машин. Эти циклы отдельно представлены на рисунках 5,а и 5,б. Не вдаваясь в проблемы их практической реализации, отметим, что наилучшие из них — обратимые циклы a-b-c-3, a-b'-c'-3 и a-0-c'-3 (см. рис. 5,б). С помощью, например, циклов

a-b-c-3, производится отвод тепла  $q_1$  в процессах 3-с от прямого потока на изобаре, начиная от т. 3. Тепло этих циклов  $q_2$  в процессах a-b передаётся источнику с потенциалом  $T_x$ . Охлаждённый до  $T_c$  криоагент дросселируется в процессе c-4' до давления  $p_1$ , увеличивая при этом холодопроизводительность рефрижератора. Данным циклам a-b-c-3 несколько уступают изображённые на рис. 5 внешнеобратимые циклы Карно a-b-c-d.

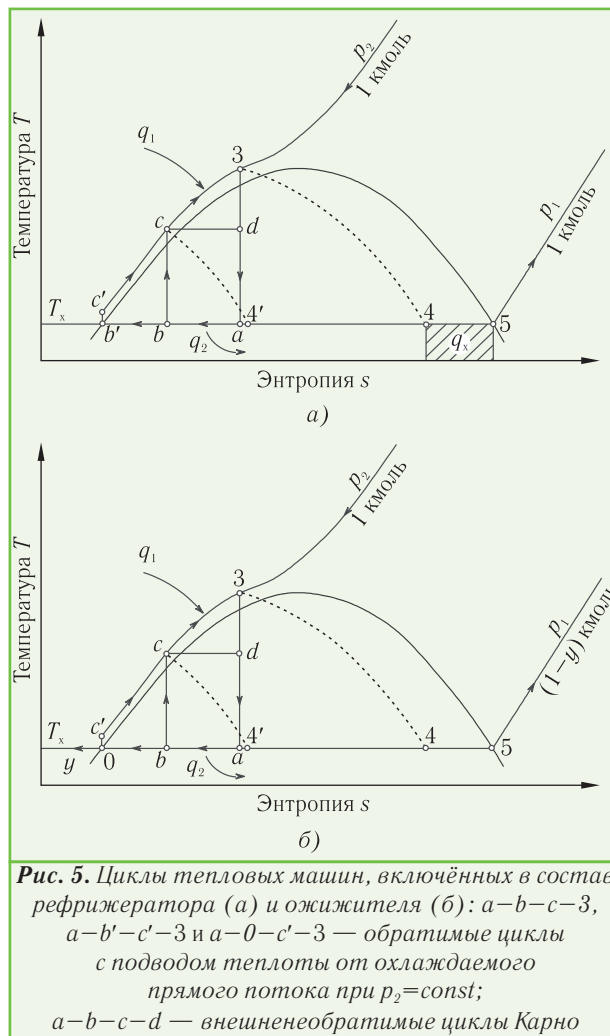


Рис. 5. Циклы тепловых машин, включённых в состав рефрижератора (а) и ожижителя (б): a-b-c-3, a-b'-c'-3 и a-0-c'-3 — обратимые циклы с подводом теплоты от охлаждаемого прямого потока при  $p_2 = const$ ; a-b-c-d — внешнеобратимые циклы Карно

Можно показать, что холодопроизводительность рефрижератора  $q_x$  при использовании в СТМ цикла a-b-c-3 увеличивается на величину работы тепловой машины. Действительно, из рис. 5,а видно, что дополнительная холодопроизводительность  $\Delta q_x = (i_3 - i_c) - (i_a - i_b)$  равна работе тепловой машины  $l_{т.м.}$ . Из анализа процессов, изображённых на рис. 5,б, можно установить, что увеличение коэффициента ожижения  $y$  пропорционально работе  $l_{т.м.}$  цикла a-b-c-3.

В таблицах 1 и 2 представлены результаты расчётов показателей интенсивности рефрижератора и ожижителя ( $q_x$  и  $y$ ) и их эффективности, характеризуемой эксергетическими КПД  $\eta_e^R$  и  $\eta_e^L$ . Нужно иметь в виду, что первые строчки в таблицах соответствуют рефрижератору и ожижителю без СТМ. Во вторых строчках приведены их характеристики для случаев,

**Таблица 1.** Характеристики рефрижератора Линде при использовании в СТМ различных циклов

$T_3, \text{K}$	$T_c, \text{K}$	$T_{c'}, \text{K}$	$T_x, \text{K}$	$\Delta q_x,$ кДж/кмоль	$q_x,$ кДж/кмоль	$\eta_e^R$
155,8	—	—	77,2	—	899	0,20
155,8	135,8	—	77,2	541	1440	0,31
155,8	—	84,2	77,2	1320	2219	0,48

**Таблица 2.** Характеристики ожижителя Линде при использовании в СТМ различных циклов

$T_3, \text{K}$	$T_c, \text{K}$	$T_{c'}, \text{K}$	$T_x, \text{K}$	$\Delta y$	$y$	$\eta_e^L$
164,4	—	—	77,2	—	0,074	0,12
164,4	144,4	—	77,2	0,047	0,121	0,20
164,4	—	82	77,2	0,130	0,204	0,33

когда прямые потоки дополнительно охлаждаются с помощью СТМ на 20 К от температуры  $T_3$  до температуры  $T_c$ . Третьи строчки относятся к предельному охлаждению прямых потоков рефрижератора и ожижителя до температуры  $T_{c'}$ , которой отвечает  $t_{c'}$ , лежащая на одной изоэнтропе с насыщенной жидкостью.

Данные, приведённые в таблицах, показывают, как существенно могут улучшиться характеристики и рефрижератора, и ожижителя Линде. Этот эффект во многом объясняется особенностью цикла тепловой машины, в котором подводимое к источнику с температурой  $T_x$  тепло  $q_2$  меньше тепла  $q_1$ , отводимого от прямого потока, так как их разность равна работе  $l_{т.м.}$ . Для сравнения укажем, что при теплообмене потоков, например, в рекуперативном аппарате, отводимое от охлаждаемого потока тепло равно теплу, передаваемому нагреваемому потоку.

Из анализа таблиц 1 и 2 можно заметить, что применение СТМ приводит к более заметному росту  $\eta_e^L$  (в 2,75 раза) по сравнению с повышением  $\eta_e^R$  (в 2,45 раза).

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Снижению потерь от необратимости дросселирования в ступенях криогенных установок способствовало внедрение ряда разработок. Интерес к ним вызван тем, что потери в этой наиболее низкотемпературной части установки сильнее всего сказываются на эффективности производства холода или сжиженного продукта [6]. Поэтому замена дросселирования другим процессом достаточно актуальна. В качестве примера можно привести использование в криогенном гелиевом ожижителе вместо дросселя двухфазного детандера [7]. Его внедрение позволило на 30-40 % увеличить коэффициент ожижения гелия. Однако перенос этого решения в криогенные рефрижераторы и ожижители, работающие на азоте, а также в воздухо-разделительные установки не дал ощутимого выигрыша. Это нужно было предвидеть, так как существенное улучшение характеристик данных гелиевых ожижителей вызвано рядом уникальных свойств гелия как рабочего тела. И прежде всего — наличием у него исключительно высокой теплоёмкости, которая

обуславливает близкий к адиабатному процесс расширения гелия в парожидкостном детандере (ПЖД).

Разработки последних лет позволили создать эффективные жидкостной (ЖД) и парожидкостной детандеры, заменяющие дросселирование в крупнотоннажных установках производства СПГ [8]. Замена дроссельного вентиля на ЖД даёт возможность увеличить производительность СПГ-установок на 5 %, а в случае применения ПЖД — на 8 %. Достигнутые в этих детандерах высокие эффективность и технологичность позволяют уже на настоящем этапе применять их в высокопроизводительных установках сжижения аммиака, встраиваемых в крупные агрегаты его синтеза [9].

Применение СТМ в рефрижераторах и ожижителях Линде, как следует из приведённых примеров, позволяет существенно повысить их характеристики. Возможно использование СТМ и в других криогенных системах, где высокими являются потери при дросселировании рабочего тела в условиях большой разности температур.

Настоящая статья имеет целью изложение термодинамических аспектов эффективного включения СТМ в криогенные рефрижераторы и ожижители. В связи с этим не рассматриваются практические вопросы реализации циклов тепловых машин в области криогенных температур, а также рациональное использование производимой в них работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бродянский В.М., Семенов А.М. Термодинамические основы криогенной техники. — М.: Энергия, 1980. — 448 с.
2. Троценко А.В. Ступени охлаждения криогенных систем// Технические газы. — 2011. — № 1. — 57-62.
3. Архаров А.М., Марфенина И.В., Микулин Е.И. Криогенные системы. В 2-ух т. Т.1. Основы теории и расчёта. — М.: Машиностроение, 1996. — 576 с.
4. Кравченко М.Б. Анализ термодинамических циклов с помощью  $(q-1/T)$ -диаграммы// Технические газы. — 2004. — № 2. — С. 43-46.
5. Linstrom P.J., Mallard W.G. The NIST Chemistry WebBook: A Chemical Data Resource on the Internet// Abstracts of the Fourteenth Symposium on Thermophysical Properties, June 25-30, 2000, Boulder, Colorado, USA. — P. 315.
6. Троценко А.В., Лавренченко Г.К., Плесной А.В. Термодинамический анализ использования работы детандера в криогенных установках// Технические газы. — 2011. — № 2. — С. 43-47.
7. Jonson R.W., Collins S.C., Smith J.L. Hydraulically operated two-phase helium expansion engine/ Advances in Cryogenic Engineering. — 1971. — V. 16. — P. 171-179.
8. Kimmel H.E., Cathery S. Thermo-fluid dynamics and design of liquid-vapour two-phase LNG expanders// Proc. «Advances in progress equipment». — Paris, France, 2010.
9. Rush S., Kimmel H.E. Magnetically coupled submerged cryogenic pumps and expander for ammonia application// Proc. AIChE «Ammonia safety symposium». — Calgary, Canada, 2009. — Paper 4d.