

УДК 536.48.001

**А.В. Троценко\***, **Г.К. Лавренченко\*\***, **А.В. Плесной**

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

\*e-mail: trotalex@rambler.ru

\*\*e-mail: uasigma@paco.net

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАБОТЫ ДЕТАНДЕРА В КРИОГЕННЫХ УСТАНОВКАХ

*В детандерах криогенных установок, наряду с охлаждением газа, также производится и работа. Использование работы детандера приводит к повышению ряда энергетических показателей криогенных систем. Анализируется характер изменения отношения работы детандера к работе компрессора в простом детандерном цикле. Полученные выводы могут быть распространены на более сложные циклы рефрижераторов и ожижителей. Приводятся результаты термодинамического исследования способов использования работы детандера в криогенных установках. Из эксергетических балансов криогенных установок найдены выражения для максимальных дополнительных величин продуктов рефрижераторных и ожижительных криогенных установок, полученных за счёт использования работы детандера.*

**Ключевые слова:** Криогенная установка. Детандер. Термодинамический цикл. Компрессор. Работа сжатия. Работа расширения. Кислород. Азот. Гелий. Эксергия. Эксергетический баланс. Холодопроизводительность.

**A.V. Trotsenko, G.K. Lavrenchenko, A.V. Plesnoy**

## THERMODYNAMIC ANALYSIS OF THE EXPANDER WORK USAGE IN CRYOGENIC UNITS

*In expander cryogenic units in addition to gas cooling, the work is also produced. The usage of expander work improves some energetic performances of cryogenic systems. The character of the change of the ratio of the expander work to that of compressor in a simple expander cycle is analyzed. The findings can be applied for more complex cycles of refrigerators and liquefier. The results of thermodynamic researches of ways to use the expander work in cryogenic units are given. Based on exergic balances in case of use of expander work, the expressions for the maximal additional amounts of cryogenic units products are obtained.*

**Keywords:** Cryogenic units. Expander. Thermodynamic cycle. Compressor. Compression work. Expansion work. Oxygen. Nitrogen. Helium. Exergy. Exergic balance. Refrigerating capacity.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Один из возможных и очевидных путей повышения термодинамической эффективности в детандерных и детандерно-дроссельных циклах криогенных установок — использование работы, производимой в детандере.

Детандеры находят широкое применение в криогенных и вообще низкотемпературных установках. В детандере производится расширение газа с понижением его температуры и одновременным совершением внешней работы. Отношение работы расширения в детандере к работе сжатия компрессора — важная характеристика обратных газовых циклов [1]. Её использовал В.С. Мартыновский для оптимизации па-

раметров воздушных холодильных машин.

Работу детандера в обратных циклах зачастую расходуют для снижения общих затрат энергии. Однако такой подход возможен в случаях, когда компрессорная и расширительная машины связаны механически. Примером является воздушная турбохолодильная машина, работающая по регенеративному циклу с разомкнутым процессом [2]. В ней имеется компрессорно-детандерный агрегат с осевыми турбомашинами, размещёнными на общем валу.

Работа расширения может также передаваться на общий с компрессором кривошипно-шатунный механизм. Такие достаточно эффективные решения реализуются в криогенных газовых машинах, работающих по обратному циклу Стирлинга [3].

В криогенных установках, где нет прямой механической связи между компрессорной и расширительной машинами, работу последней используют по-другому. Так, в крупных воздуходелительных установках (ВРУ) работа детандера затрачивается на повышение давления воздуха перед ним в компрессорной ступени. Ступени расширения и компримирования расположены на одном валу детандер-компрессорного агрегата ВРУ.

Целесообразность повышения эффективности криогенной установки за счёт работы детандера будет в первую очередь определяться технико-экономическими критериями. Однако термодинамический аспект данной задачи может играть ключевую роль на научно-исследовательском этапе разработки криогенной установки.

Данная статья посвящена решению следующих термодинамических задач, связанных с использованием производимой в детандере энергии:

- анализ максимально возможного отношения полученной в детандере работы к работе, затраченной в установке;
- исследование способов использования работы детандера в криогенной установке.

## 2. ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛУЧЕННОЙ В ДЕТАНДЕРЕ ЭНЕРГИИ

Величина отношения работ детандера и компрессора является важной характеристикой, определяющей обоснованность финансовых затрат на использование в цикле криогенной установки энергии, полученной в детандере. Она в общем случае зависит от многих факторов, среди которых необходимо в первую очередь выделить схему цикла, давление в цикле и температурный уровень охлаждения. Максимальное отношение этих работ для достижения состояний рабочего тела ниже температуры окружающей среды  $T_{о.с}$  может быть найдено исходя из анализа процессов, изображённых на рис. 1. На нём символами  $T, s$  соответственно обозначены температура и энтропия.

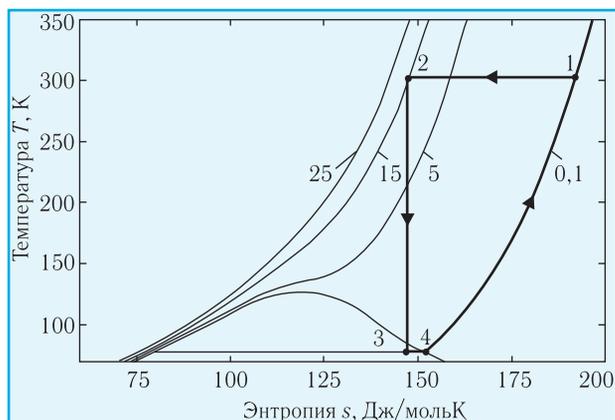


Рис. 1. Обратимые процессы сжатия и расширения азота в  $T, s$ -диаграмме (давления на изобарах — в МПа)

Процесс 1-2 на рис. 1 представляет собой изотермическое сжатие рабочего тела при  $T=T_{о.с}$  от давления  $p_1$  до давления  $p_2$ . Он требует минимальных удельных затрат энергии в компрессоре  $l_k$ . Процесс 2-3 является изэнтропным расширением рабочего тела в детандере и характеризуется максимальной удельной величиной полученной энергии  $l_d$ . Таким образом, для перехода рабочего тела из точки 1 в точку 3 с помощью этих процессов достигаются минимальные затраты энергии ( $l_k - l_d$ ) при максимальном отношении  $l_d/l_k$ .

Величина  $\Delta e = l_k - l_d$  по смыслу является изменением физической составляющей эксергии при переходе рабочего тела из точки 1 в точку 3 и представляется как

$$\Delta e = T_{о.с}(s_1 - s_3) - (h_1 - h_3), \quad (1)$$

где  $h$  — удельная энтальпия рабочего тела. В [4] приведена методика эксергетического анализа отдельных термомеханических процессов внутреннего охлаждения рабочего тела. Однако в ней и других известных литературных источниках отсутствует исследование отношения  $l_d/l_k$ .

В общем случае величина  $l_d/l_k$  может рассматриваться как функция давления  $p_2$  при фиксированных значениях переменных  $p_1$  и  $T_{о.с}$ , а также заданном роде рабочего тела. На рис. 2 представлена зависимость  $l_d/l_k(p_2)$  для водорода (синяя кривая) и азота (красная) при  $p_1 = 1$  бар,  $T_{о.с} = 293$  К. Расчёты выполнялись по уравнению состояния Редлиха-Квонга-Вильсона (РКВ) [5]. В них использовались известные формулы для вычисления соответствующих работ:

$$l_k = T_{о.с}(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2); \quad (2)$$

$$l_d = (h_2 - h_3). \quad (3)$$

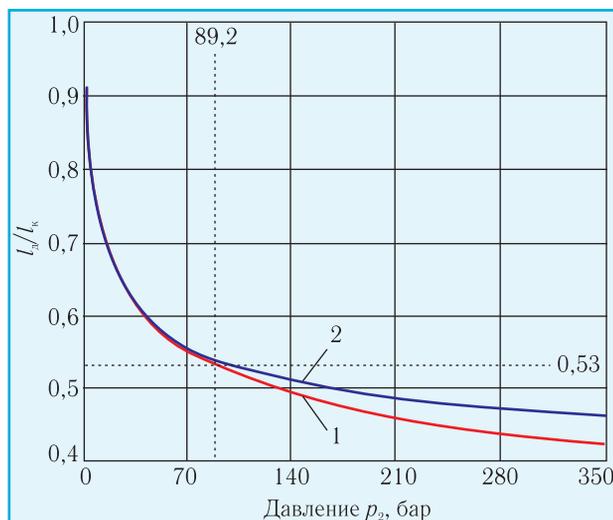
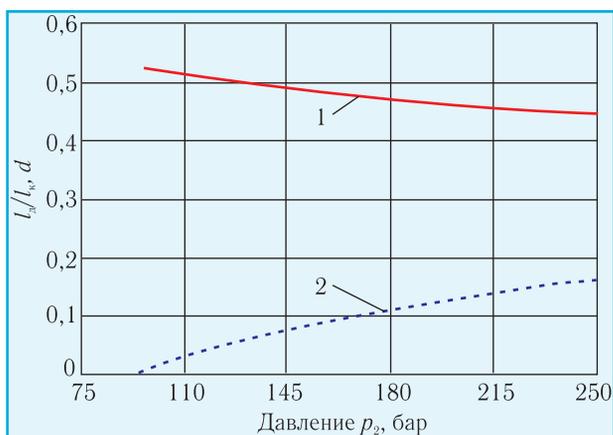


Рис. 2. Характерный вид зависимости  $l_d/l_k(p_2)$  для криогенных веществ: 1 — азота; 2 — водорода

К основным особенностям рассматриваемой функции для всех рабочих тел относится её монотонное убывание при увеличении давления  $p_2$ , а также

уменьшение темпа её изменения с ростом этого давления. При  $p_2 \rightarrow p_1$  имеет место  $l_n/l_k \rightarrow 1$ . Маркерами на рис. 2 выделена точка на кривой для азота, соответствующая состоянию насыщенного пара (точка 4 на рис. 1). Поскольку в большинстве криогенных установок протекают процессы в области парожидкостного равновесия, координаты этой точки для других веществ также представляет интерес. В частности, точке насыщенного пара для кислорода при  $p_1=1$  бар соответствует  $p_2=47,7$  бар,  $l_n/l_k=0,57$ . Для гелия и водорода вычисление давлений  $p_2$  для этой точки связано с определёнными трудностями, обусловленными возможной неадекватностью уравнения состояния, так как величины  $p_2$  превышают 1000 бар.

Вид функций  $l_n/l_k(p_2)$  и  $d(p_2)$ , где  $d$  — доля жидкости, для двухфазной области изображён на рис. 3. Качественно аналогичный вид этих функций сохраняется и для других криогенных веществ. Он характеризуется монотонным ростом величины  $d$  при увеличении давления  $p_2$ .



**Рис. 3.** Отношение работ  $l_n/l_k$  и доля  $d$  жидкого азота для давлений, соответствующих двухфазной области: 1 —  $l_n/l_k$ ; 2 —  $d$

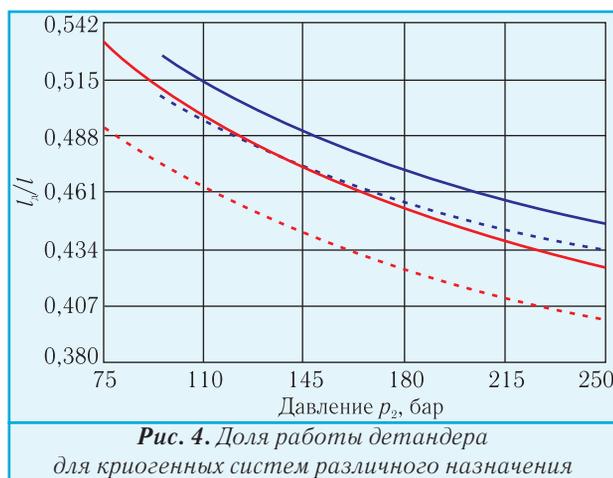
Несмотря на то, что приведённые выше результаты относятся к исследованию двух процессов, их выводы могут быть распространены на рефрижераторные и оживительные циклы. Это обусловлено тем, что данные процессы отражают основные принципы, лежащие в основе функционирования низкотемпературных установок. Первый из них заключается в необходимости затрат энергии в этих установках (процесс сжатия рабочего тела в компрессоре), второй — в обязательности реализации процесса внутреннего охлаждения для достижения криогенных температур (процесс расширения рабочего тела в детандере). Для газоразделительных криогенных систем при анализе максимального отношения  $l_n/l_k$  затраты энергии должны быть дополнены минимальной работой извлечения продуктов из исходной смеси.

На рис. 4 представлены результаты вычислений величины  $l_n/l$  для азота (синие линии) и кислорода (красные) для давлений после компрессора, соответствующих двухфазным областям этих веществ. Работа  $l$  учитывает возможные минимальные затраты

энергии на выделение вещества из смеси. Данные для сплошных кривых получены на основании расчётов по соотношениям (2) и (3), т.е. полагалось  $l=l_k$ . Пунктирные линии отражают затраты энергии на извлечение азота и кислорода из воздуха  $l_e$ , т.е. принималось  $l=l_k+l_e$ . Значение  $l_e$  рассчитывалось по формуле:

$$l_e = -RT_{0,c} x \ln x, \quad (4)$$

где  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $x$  — мольная доля вещества в воздухе.



**Рис. 4.** Доля работы детандера для криогенных систем различного назначения

Как следует из рис. 4 и выражения (4), вклад минимальной работы  $l_e$  в величину  $l$  возрастает при увеличении значения  $x$ . Он не является существенным для случаев извлечения из воздуха азота и кислорода, но становится определяющим для отношения  $l_n/l$  при получении аргона и неона.

Так как любая необратимость ведёт к уменьшению значения  $l_n/l_k$ , то исходя из проведённого анализа, следует принять, что её величина для любой криогенной системы, в которой существует парожидкостное состояние рабочего тела, не превышает 0,5. Более реальный верхний предел для проектируемой криогенной установки может быть установлен на основе термодинамического расчёта её цикла без учёта технических потерь от необратимости процессов.

### 3. АНАЛИЗ СПОСОБОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛУЧЕННОЙ В ДЕТАНДЕРЕ ЭНЕРГИИ

Полная работа детандера  $L_d$  может быть формально использована для решения следующих задач улучшения показателей криогенной установки:

- уменьшения энергетических затрат;
- увеличения её производительности;
- повышения качества полученного продукта.

В зависимости от вида поставленной задачи изменяются как технические аспекты её реализации, так и соответствующие критерии эффективности.

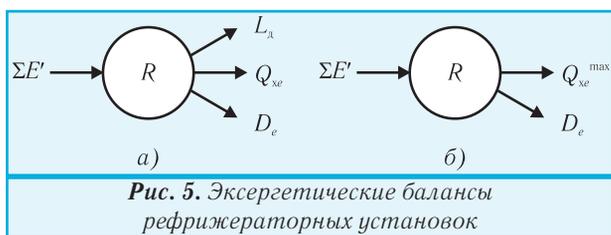
Полученная величина  $L_d$  относится к механической энергии, которая теоретически является полностью превратимой в другие формы энергии, т.е. энергия  $L_d$  и её эксергия равны. Данное обстоятель-

ство даёт возможность установить максимальный эффект от использования работы детандера.

Наиболее простым представляется анализ влияния работы  $L_d$  на суммарные энергетические затраты  $L$ , когда она выводится из системы и преобразуется в электрическую энергию. Примером этого служат криогенные установки, в которых используются поршневые детандеры. Вклад величины  $L_d$  в данном случае часто определяется её сравнением со значением  $L$ . Однако это сравнение является не единственным возможным способом оценки эффективности криогенной системы. Во-первых, если работа  $L_d$  выводится из системы, то формально установка должна считаться многоцелевой, вырабатывающей как криогенный продукт, так и энергию. По этой причине работа  $L_d$  может рассматриваться как самостоятельный критерий. Во-вторых, возможны постановки задачи, цель которых состоит в исследовании влияния величины  $L_d$  на составляющие затрат  $L$ . К последним, например, относятся затраты энергии в компрессоре или в ванне промежуточного охлаждения в гелиевых установках.

Более сложным является изучение возможного увеличения производительности установки за счёт использования работы  $L_d$ . Это обусловлено тем, что криогенные продукты, в отличие от работы  $L_d$ , не полностью могут превращаться в другие формы энергии. Кроме того, на увеличение производительности определяюще сказывается место подвода энергии  $L_d$  в технологическую цепочку установки. Как известно, для криогенной системы технологическая цепочка начинается от температуры  $T_{o.c}$  и заканчивается температурой охлаждения  $T_x$ . Наихудшим вариантом подвода эксергии  $L_d$  является начало цепочки, а наилучшим — её конец. Это обусловлено тем, что по мере продвижения эксергии по технологической цепочке накапливаются потери от необратимости процессов в элементах криогенной установки. Таким образом, максимальный вклад в производительность установки может быть достигнут, если подвести эксергию  $L_d$  непосредственно в криогенные продукты, хотя априори ясно, что практически такой вариант нереализуем.

Для определения этого максимального вклада в криогенные системы различного назначения удобно использовать эксергетические балансы. Для рефрижераторной установки (тип  $R$ ) соответствующие балансы представлены на рис. 5.



На рис. 5 использованы следующие условные обозначения:  $\Sigma E'$  — алгебраическая сумма подведённых к системе эксергий;  $D_e$  — эксергетические потери;  $Q_{xe}$ ,  $Q_{xe}^{max}$  — соответственно эксергетическая и

максимальная эксергетическая холодопроизводительности установки. Схема 5,а составлена для случая, когда рефрижератор вырабатывает два вида продукта: работу детандера и холод. Схема 5,б отвечает варианту, когда работа  $L_d$  полностью трансформируется в холод. Данные схемы предполагают, что при нахождении величины  $E'$  другие полезные эксергетические потоки, кроме  $L_d$  и  $Q_{xe}$ , должны быть вычтены из затрат эксергии.

В соответствии со сделанным допущением

$$Q_{xe}^{max} = Q_{xe} + L_d \tag{5}$$

При постоянном значении температуры  $T_x$  выражения для рассматриваемых эксергетических холодопроизводительностей записываются в виде:

$$Q_{xe} = Q_x \frac{T_{o.c} - T_x}{T_x}; \tag{6}$$

$$Q_{xe}^{max} = Q_x^{max} \frac{T_{o.c} - T_x}{T_x}, \tag{7}$$

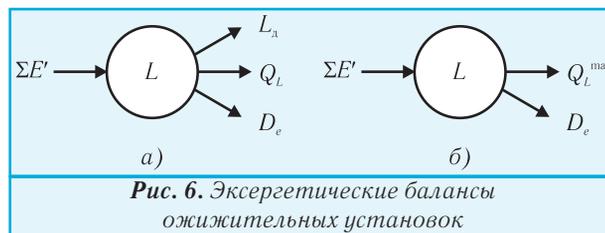
где  $Q_x$ ,  $Q_x^{max}$  — соответственно действительная и максимально возможная холодопроизводительности рефрижератора.

Из выражений (6) и (7) с учётом соотношения (5), следует формула для вычисления наибольшего увеличения холодопроизводительности установки  $\Delta Q_{xe}^{max}$  за счёт использования работы детандера:

$$\Delta Q_{xe}^{max} = Q_x^{max} - Q_x = L_d \frac{T_x}{T_{o.c} - T_x} = L_d \epsilon_K, \tag{8}$$

где  $\epsilon_K$  — холодильный коэффициент обратного цикла Карно.

Для ожижительной установки (тип  $L$ ) эксергетические балансы представлены на рис. 6, где через  $E_L$  и  $E_L^{max}$  соответственно обозначены действительные и максимально возможные эксергии основных полученных продуктов. Различие между рисунками 6,а и 6,б по смыслу идентично соответствующим схемам на рис. 5.



Значения  $E_L$  и  $E_L^{max}$  связаны соотношением:

$$E_L^{max} = E_L + L_d \tag{9}$$

В свою очередь величины  $E_L$  и  $E_L^{max}$  находятся из выражений:

$$E_L = G_L I_{ок}^{min}; \tag{10}$$

$$E_L^{\max} = G_L^{\max} l_{\text{ож}}^{\min}, \quad (11)$$

где  $G_L$  и  $G_L^{\max}$  — соответственно действительный и максимальный расходы жидкого продукта, выдаваемого потребителю;  $l_{\text{ож}}^{\min}$  — удельная (мольная) минимальная работа ожижения.

Из уравнений (9)-(11) следует выражение для определения наибольшего увеличения производительности ожижительной установки  $\Delta G_L^{\max}$ , обусловленной использованием работы детандера:

$$\Delta G_L^{\max} = L_d / l_{\text{ож}}^{\min}. \quad (12)$$

Необходимо отметить, что формулы (8) и (12) непосредственно могут быть использованы только для анализа установок, вырабатывающих один вид криогенного продукта.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты термодинамического анализа простого детандерного цикла могут быть распространены на более сложные циклы и схемы рефрижераторных и ожижительных установок. Это объясняется тем, что выбранный для исследования цикл удовлетворяет основным требованиям функционирования низкотемпературных систем. На основе анализа простого детандерного цикла изучен характер изменения отношения

работы детандера к работе компрессора с ростом давления конца изотермического сжатия.

В рефрижераторах и охладителях в общем случае работа детандера может использоваться для уменьшения энергетических затрат, увеличения производительности или повышения качества продукта. Из эксергетических балансов получены общие выражения для определения роста холодопроизводительности или увеличения количества ожижаемого продукта в случае использования в этих целях работы детандера.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мартыновский В.С. Термодинамические характеристики циклов тепловых и холодильных машин. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1952. — 116 с.
2. Мартыновский В.С. Циклы, схемы и характеристики термотрансформаторов. — М.: Энергия, 1979. — 288 с.
3. Архаров А.М. Низкотемпературные газовые машины (криогенераторы). — М.: Машиностроение, 1969. — 224 с.
4. Бродянский В.М., Семенов А.М. Термодинамические основы криогенной техники. — М.: Энергия, 1980. — 448 с.
5. Wilson G.M. Vapour-liquid equilibria correlation by means of a modified Redlich-Kwong equation of state// Adv. Cryog. Eng. — 1964. — V. 9. — № 5. — P. 198-207.



### ВНИМАНИЮ РУКОВОДИТЕЛЕЙ ПРЕДПРИЯТИЙ, ВЫПУСКНИКОВ ТЕХНИКУМОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ КОЛЛЕДЖЕЙ!



- получение высшего образования без отрыва от производства за 4 года;
- зачисление без экзаменов сразу на 3-ий курс Одесской государственной академии холода по направлению Украинской ассоциации производителей технических газов «УА-СИГМА»;
- специальность — 7.090507 «Криогенная техника и технология»;
- форма обучения — заочная контрактная;
- завершение учебы — защитой дипломного проекта;
- диплом Министерства образования и науки Украины признается в странах СНГ.

Условия приёма по контактному тел./факсу: +38 (048) 777-00-87