

УДК 621.59

А.В. Троценко*, **М.В. Поддубная**

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

*e-mail: trotalex@rambler.ru

ОСОБЕННОСТИ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В КРИОГЕННЫХ СИСТЕМАХ

Потери эксергии в криогенных системах могут использоваться в качестве универсального критерия термодинамической эффективности. Рассматривается конкретный смысл эксергетических потерь в случае различной постановки задач термодинамического анализа. Показано, что более обоснованные направления энергосбережения в криогенной системе могут быть установлены при сравнении реального цикла с соответствующим циклом без технических потерь.

Ключевые слова: Эксергетические потери. Криогенная система. Термодинамическая оптимизация. Цикл Линде. Рефрижератор.

A.V. Trotsenko, M.V. Poddubnaya**FEATURES OF EXERGETIC LOSSES IN CRYOGENIC SYSTEMS**

The losses in cryogenic systems can be applied as universal criterion of thermodynamic effectiveness. The concrete sense of exergetic losses is considered in cause of different problem formulation of thermodynamic analysis. It is shown that more substantiated directions of energyprvention in cryogenic system may be obtained by comparison of real cycle with the coresponding cycle without technical losses.

Keywords: Exergetic losses. Cryogenic system. Thermodynamic optimization. Linde cycle. Refrigerator.

1. ВВЕДЕНИЕ

Эксергетические потери D_e являются универсальным критерием, который можно использовать для оценки эффективности любой термодинамической системы и составляющих её подсистем. Этот показатель, например, применяется для определения работоспособности многопоточных теплообменных аппаратов [1].

В отличие от другого критерия термодинамической эффективности — эксергетического КПД, величина D_e однозначно рассчитывается из эксергетического баланса для выделенной совокупности элементов установки [2]. Кроме того, вследствие справедливости принципа аддитивности потерь [3] существует аналитическая зависимость между эксергетическими потерями системы и эксергетическими потерями её элементов. Такую зависимость в общем случае невозможно установить для эксергетических КПД.

Использование эксергетических потерь в качестве целевой функции лежит в основе энтропийного метода, развитого для теплотехнических установок [4,5]. Однако в этих и других работах основное внимание уделяется расчёту D_e в элементах установки и практически не рассматриваются вопросы, связанные с улучшениями её энергетических характеристик исхо-

дя из значений потерь в отдельных элементах. Последнее требует изучения особенностей эксергетических потерь как критерия, начиная с самой их дефиниции.

2. ОСОБЕННОСТИ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ КАК КРИТЕРИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

В общем случае эксергетические потери являются частью эксергии, превратившейся в анергию вследствие необратимости процессов [6]. Такое определение можно конкретизировать в ряде случаев для всей низкотемпературной установки, воспользовавшись составленным для неё эксергетическим балансом:

$$\sum_{i=1}^m E_i = \sum_{j=1}^r P_j + D_e, \quad (1)$$

где E_i — эксергия i -го из m потоков, подведённых к установке; P_j — эксергия j -го из r полученных в установке продуктов; D_e — потери эксергии в установке.

В балансе (1) необходимо иметь в виду, что не всякий подведённый к установке энергетический поток обладает отличной от нуля эксергией. Кроме того, слагаемые $P_j, j=1, 2, \dots, r$, отражают не только количе-

ство полученного j -го продукта, но и его качество.

Пусть задано количество и качество каждого из j продуктов, $j=1,2, \dots, r$. Тогда для низкотемпературной системы D_e представляет собой дополнительные затраты энергии, необходимые для получения продуктов с заданными количеством и качеством, обусловленные необратимостью процессов.

Пусть заданы значения $E_i, i=1,2, \dots, m$, и показатели качества продуктов. Тогда D_e характеризует суммарные потери продуктов. Для одноцелевой установки величина D_e в этом случае определяет эксергетическую потерю, обусловленную необратимостью при производстве продукта.

Переход от энергетических к эксергетическим потокам делает последние равноценными, т.е. лишает их индивидуальных особенностей. По этой причине, если к установке подводится или от неё отводится несколько эксергетических потоков, то распределить потери D_e между этими потоками не представляется возможным. Например, криогенная установка одновременно производит холод и жидкий продукт на одном температурном уровне, т.е. одного качества. В этом случае в эксергетическом балансе исчезает различие между видами полученных продуктов. Когда установка производит холод на двух температурных уровнях, то в эксергетическом балансе нивелируется качество полученных продуктов.

На основе принципа аддитивности потерь [3] в общем случае суммарная потеря эксергии

$$D_e = \sum_{k=1}^{ne} D_k, \quad (2)$$

где D_k — эксергетические потери в k -ом элементе установки ($k=1,2, \dots, ne$).

Их можно конкретизировать, лишь приняв во внимание оговоренные выше постановки задач. Таким образом D_k может представлять собой либо дополнительные затраты энергии при фиксированных количествах и качествах продуктов, либо потери эксергии продуктов при заданном количестве подведённой к установке энергии.

Как отмечено ранее, вне указанных постановок задач трудно установить конкретный смысл эксергетических потерь. Последнее относится также к случаю, когда в качестве целевой функции при термодинамической оптимизации установки используется не величина D_e , а какой-либо относительный показатель типа холодильного коэффициента или эксергетического КПД.

Обычно при рассмотрении характера изменения потерь D_e и $D_k, k=1,2, \dots, ne$, используются неравенства:

$$D_e \geq 0; \quad (3)$$

$$D_k \geq 0, k=1,2, \dots, n. \quad (4)$$

Из соотношений (4) вытекает, что знак равенства в выражении (3) имеет место при $D_k=0, k=1,2, \dots, ne$.

Следовательно

$$D_e=0 \text{ при } D_k=0, k=1,2, \dots, ne. \quad (5)$$

Равенства (5) устанавливают нижний предел изменения потерь в системе и во всех её элементах. Верхний предел изменения величины D_e может быть найден, если учитывать очевидный тезис, что любая установка должна производить какой-либо продукт нужного качества. Такое утверждение приводит к неравенствам:

$$\sum_{j=1}^r P_j \geq 0 \quad (6)$$

при

$$P_j \geq 0, j=1,2, \dots, r. \quad (7)$$

Из неравенств (6) и (7) вытекает

$$\min \sum_{j=1}^r P_j = 0. \quad (8)$$

Тогда из баланса (1) получаем, что

$$\max D_e = \sum_{i=1}^m E_i. \quad (9)$$

Для криогенных рефрижераторных и ожижительных установок можно выявить условия, определяющие нулевое значение полученного продукта при заданной постоянной температуре окружающей среды T_{oc} . Ему соответствует состояние насыщенного пара при температуре T_x . Для случаев, когда установлена величина $\max D_e$, появляется возможность вычислить максимально допустимые значения некоторых термодинамических характеристик (гидравлических потерь, недорекупераций, теплопритоков из окружающей среды), как это сделано для дроссельной ступени окончательного охлаждения криогенной установки [7].

Однако обеспечение выполнения равенства (8) может вызвать определённые трудности даже на логическом уровне. Например, если в криогенной системе имеется детандер, который производит используемую работу, то такая работа также должна рассматриваться как продукт установки. Требование равенства нулю этой работы сводится к условию нулевого значения изоэнтропного КПД детандера. Последнее подразумевает фактическую замену детандера на дроссель, что меняет принципиальную схему установки.

Моделирование ситуаций, связанных с влиянием изменения потерь $D_k, k=1,2, \dots, ne$, на величину D_e , целесообразно проводить с помощью вычислительных экспериментов. Для этого удобно использовать классификацию потерь по причине их возникновения, изложенную в монографии [2]. Согласно ей, эксергетические потери делятся на собственные (принципиально неустранимые) и технические (принципиально устранимые).

3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

В общем случае расчёт эксергетических потерь в установке производится после термодинамического расчёта соответствующего цикла или совокупности процессов, реализуемых в ней. Поэтому величину D_e следует рассматривать как функцию независимых переменных, используемых в термодинамическом расчёте установки. Однако для исследования влияния составляющих эксергетических потерь на значение D_e , что является необходимым этапом создания алгоритма минимизации целевой функции D_e , целесообразно выделить свой набор переменных $x = \{x_1, x_2, \dots, x_{nv}\}$. При этом нужно иметь в виду, что при любом варьировании каждой из этих переменных необходимо проводить термодинамический расчёт всех процессов установки.

Каждая из переменных множества $\{x_1, x_2, \dots, x_{nv}\}$, где nv — общее число независимых переменных функции $D_e(x)$, характеризует вид потери в конкретном элементе, обусловленной какой-либо причиной необратимости. В соответствии с классификацией потерь от необратимости по причине их возникновения эти переменные могут быть отождествлены либо с технической, либо с собственной потерей. Переменные, характеризующие технические потери, обладают следующими свойствами:

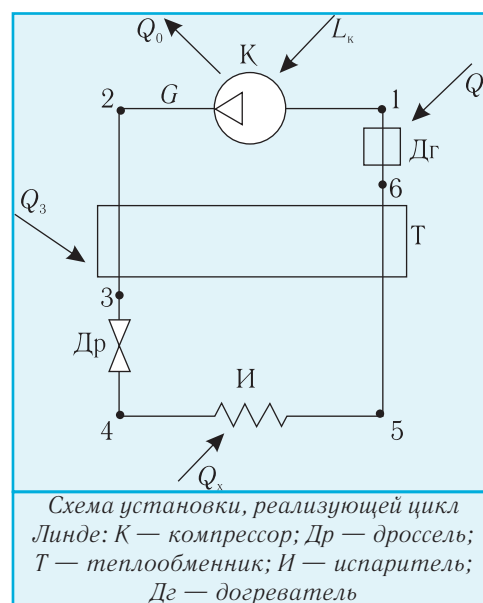
- диапазоны их изменения обычно принимаются на основе опыта эксплуатации и проектирования аналогов исследуемой установки;
- одна из границ диапазона для каждой переменной принципиально может быть установлена, исходя из условия отсутствия соответствующего вида потерь;
- их значения задаются конкретным числом, возможно опосредованно учитывающим эти особенности, для того, чтобы расчёт и анализ установки сводился к чисто термодинамической задаче, т.е. исключая конструктивные особенности её элементов.

Для переменных, отражающих собственные потери от необратимости, трудно выделить как сами переменные, так и установить возможный диапазон их изменения.

Ниже рассмотрен пример выбора независимых переменных для анализа эксергетических потерь рефрижераторного цикла Линде (регенеративного дроссельного цикла), схема которого представлена на рисунке.

При изображении схемы (см. рис.) использовались следующие условные обозначения энергетических и материальных потоков: L_k — энергия, затрачиваемая в компрессоре; Q_x, Q_0 — соответственно холодопроизводительность и тепло, отдаваемое в окружающую среду; Q_2, Q_3 — теплопритоки из окружающей среды, соответственно, к догревателю и теплообменнику; G — расход рабочего тела. Догреватель представляет собой участок трубопровода, на котором за счёт тепла Q_2 происходит подогрев обратного потока до температуры окружающей среды T_{oc} , обусловлен-

ный недорекупацией на теплом конце теплообменника.



С элементами цикла Линде можно связать переменные, определяющие в них виды потерь от необратимости. Для догревателя такой переменной является недорекупация $\Delta T_{1,6} = T_1 - T_6$, для компрессора — изотермический КПД η_k . Эксергетические потери в теплообменнике целесообразно охарактеризовать гидравлическими сопротивлениями по прямому потоку $\Delta p_{2,3} = p_2 - p_3$, гидравлическими сопротивлениями по обратному потоку $\Delta p_{5,6} = p_5 - p_6$, теплопритоками Q_3 .

В приведённых выше выражениях символами p и T , соответственно, обозначены давления и температуры. Их нижние индексы указывают либо номер узловой точки, либо номера узловых точек, определяющие разности, например, $\Delta p_{1,6} = p_1 - p_6$.

Таким образом, задача исследования эксергетических потерь в цикле Линде может быть сведена к анализу зависимости:

$$D_e = D_e(\Delta T_{1,6}, \Delta p_{2,3}, \Delta p_{5,6}, Q_3, \eta_k). \quad (10)$$

Строго говоря, выбранные переменные не являются независимыми, если термодинамическая модель цикла, состоящая из уравнений материальных и энергетических балансов, уравнений процессов в элементах установки, а также дополнительных ограничений типа равенств не имеет степеней свободы. Все указанные переменные зависят от технических потерь, поэтому для них может быть указан один из пределов изменения. В частности, нижний предел изменения величин $\Delta T_{1,6}$, $\Delta p_{2,3}$, $\Delta p_{5,6}$, Q_3 равен нулю, а верхний предел КПД η_k — единице.

В приведённый список переменных функции D_e обычно не включаются параметры, характеризующие собственные потери. К ним для цикла Линде относятся эксергетические потери в дросселе и от неравновесного теплообмена между потоками в теплообменном аппарате. Такая ситуация с параметрами для

собственных потерь обусловлена трудностями как непосредственно с самим их выбором, так и с возможностями их регулирования в реальной установке. Например, для двухпоточного теплообменника криогенной установки неравновесный теплообмен между прямыми и обратными потоками можно характеризовать разностью между средними температурами этих потоков. Но при этом возникают задачи обоснования правила осреднения температуры потока и поиск возможности её изменения в реальной установке. Для многопоточного теплообменника с помощью средних температур крайне трудно, по-видимому, характеризовать необратимый теплообмен между потоками рабочих тел.

В рассмотренной постановке задачи исследования функции D_e для цикла Линде не учтён тепловой поток Q_0 и не рассмотрены эксергетические потери в испарителе. Причины этого различны, но обусловлены взаимодействием криогенной установки с её окружением. Для теплового потока Q_0 априори неясно, является ли он потерей, т.е. каким образом его необходимо учитывать в эксергетическом балансе установки. При термодинамическом анализе испарителя невозможно, без учёта конструктивных особенностей его стыковки с объектом охлаждения, разделить тепловые потоки от объекта и из окружающей среды. Поэтому обычно, чтобы сделать задачу чисто термодинамической, принимается отсутствие потерь в испарителе.

На сегодняшний день не представляет труда вычислить эксергетические потери в элементах установки. Основная проблема эксергетического анализа заключается в отсутствии алгоритма решения задачи повышения термодинамической эффективности систем, в частности, минимизации их эксергетических потерь.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы данной работы сводятся к сле-

дующему:

1. Конкретный смысл эксергетических потерь в криогенной установке может быть установлен в задачах, где заданы либо затраты энергии, либо количество и качество полученных продуктов.

2. При выборе переменных, характеризующих изменения эксергетических потерь, целесообразно ограничиваться параметрами, отражающими технические составляющие этих потерь.

3. Условие равенства нулю количества производимых в установке продуктов может быть использовано для вычисления на термодинамическом уровне предельных значений переменных, характеризующих потери.

ЛИТЕРАТУРА

1. Троценко А.В. Анализ работоспособности многопоточных теплообменных аппаратов// Технические газы. — 2003. — № 2. — С. 9-16.

2. Бродянский В.М., Семёнов А.М. Термодинамические основы криогенной техники. — М.: Энергия, 1980. — 448 с.

3. Архаров А.М., Марфенина И.В., Микулин Е.И. Криогенные системы. В 2-х т. Т1. Основы теории и расчёта. — М.: Машиностроение, 1996. — 576 с.

4. Гохштейн Д.П. Энтропийный метод расчёта энергетических потерь. — М.-Л.: Госэнергоатомиздат, 1963. — 112 с.

5. Гохштейн Д.П., Верхивкер Г.П. Анализ тепловых схем атомных электростанций. — Киев: Вища школа, 1977. — 240 с.

6. Бэр Г.Д. Техническая термодинамика. — М.: Мир, 1977. — 520 с.

7. Троценко А.В. Предельные эксергетические потери в теплообменном аппарате дроссельной ступени окончательного охлаждения криогенной системы// Технические газы. — 2007. — № 2. — С. 56-60.



ВТОРОЕ ВЫСШЕЕ ОБРАЗОВАНИЕ — ЗА 2 ГОДА!

- необходимо наличие законченного высшего инженерно-технического образования;
- обучение в Одесской государственной академии холода по направлению Украинской ассоциации производителей технических газов “УА-СИГМА”;
- специальность 8.090507 “Криогенная техника и технология”;
- форма обучения — заочная контрактная;
- завершение учёбы — сдачей государственного экзамена;
- возможность продолжения обучения для получения диплома магистра;
- диплом Министерства образования и науки Украины признаётся в странах СНГ.

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

