

УДК 621.59

А.В. Троценко*, М.В. Поддубная**

Одесская государственная академия холода, ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, Украина, 65026

*e-mail: trotalex@rambler.ru

**e-mail: marina.sak@mail.ru

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЦИКЛОВ КРИОГЕННЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ИСКЛЮЧЕНИЯ ПОТЕРЬ

Предложено развитие метода последовательного исключения эксергетических потерь для циклов и ступеней охлаждения криогенных установок. Рассмотрены особенности его применения для структур установок по сравнению с эксергетическим анализом отдельных её элементов. Приведены результаты расчётов и их анализ для распространённых циклов криогенной техники.

Ключевые слова: Эксергетические потери. Термодинамическая оптимизация. Циклы криогенных установок.

A.V. Trotsenko, M.V. Poddubnaya

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF THE CRYOGENIC CYCLES BY THE METHOD OF EXERGETIC LOSSES ELIMINATION

The method of the exergetic losses elimination for cryogenic cycles and their cooling stages is developed. The particularities of its applying to the structures of cryogenic installations in comparison with the exergetic analysis of their individual elements are considered. The results of calculations and analysis of the elements for the considered cycles of cryogenic technique are given.

Keywords: Exergetic losses. Thermodynamic optimization. Cycles of cryogenic plants.

1. ВВЕДЕНИЕ

Эксергетические потери являются универсальным критерием, используемым в энтропийном [1] и эксергетическом [2] методах термодинамического анализа. Не составляют особых сложностей расчёты их величин в установившихся режимах работы установок для отдельных элементов, ступеней охлаждения и циклов. В этих расчётах более предпочтительным представляется использование эксергетического метода, базирующегося на эксергетических балансах и, по этой причине, поддающегося формализации.

Основная проблема любого метода термодинамического анализа цикла состоит в отсутствии алгоритма уменьшения энергозатрат в соответствующей установке посредством использования на каждом его шаге результатов вычислений эксергетических потерь в элементах рассматриваемой системы. При этом возникают вопросы, связанные с выбором независимых переменных в термодинамической модели установки, направлением их изменения, учётом неравноценности потерь и т.д. Отдельные из указанных вопросов рассмотрены в работе [3].

Одним из возможных направлений решения данной проблемы является распространение метода последовательного исключения эксергетических потерь, разработанного для отдельных элементов [4,5], на ступени охлаждения и циклы. Его реализация в приложе-

нии к двух- и многопоточным теплообменным аппаратам воздухоразделительных установок подтвердила соответствие полученных результатов качественным выводам, известным для теплообменников.

2. МЕТОД ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ИСКЛЮЧЕНИЯ ПОТЕРЬ В СТУПЕНЯХ И ЦИКЛАХ ОХЛАЖДЕНИЯ

Основная идея данного метода безотносительно объекта термодинамического анализа заключается в исключении одной потери и повторении процедуры термодинамического анализа без неё с целью установления степени влияния рассматриваемой i -ой потери D_i на суммарные потери D_s . Принципиальное отличие использования рассматриваемого метода для структуры и её элемента заключается в его обоснованности. Для отдельного элемента исключаемая потеря определяется причиной её возникновения (трение, неравновесный теплообмен и др.). В связи с этим эксергетический подход к вычислению составляющих потерь в элементе, по сути, является приближением, так как он основан на эксергетическом балансе. Последний может быть составлен для элемента или его части, но не для логически выделенного понятия, к которому относится причина необратимости [4]. Для структуры эксергетические балансы составляются для отдельных элементов и их совокупности, поэтому

метод исключения потерь в этом случае можно рассматривать как вполне строгий. Кроме того, при термодинамическом анализе отдельного элемента при исключении потери возникает некоторая неопределённость, связанная с выбором параметров, «реагирующих» на это исключение. Такой неопределённости не имеется при исследовании данным методом эксергетических потерь структуры, так как при этом придерживаются одного и того же алгоритма её термодинамического расчёта.

Для отдельных элементов установки исключаемая потеря определяется причиной, её обуславливающей (трение, неравновесный теплообмен и др.). При анализе ступеней и циклов имеется несколько возможных подходов к организации процесса исключения.

Первый — предполагает последовательное пренебрежение потерями в элементах установки. Второй — состоит в предположении об отсутствии определённого вида потерь в ряде элементов, обусловленных одной и той же причиной необратимости. Например, согласно второму подходу можно принять допущение об изобарности процессов охлаждения прямого потока в теплообменных аппаратах криогенной установки. Принципиально возможен и третий подход, который сочетает в себе оба предыдущих.

В данной работе рассматривается задача, связанная с особенностями применения метода последовательного исключения потерь для термодинамического анализа циклов криогенных установок в соответствии с первым из указанных подходов.

Алгоритм решения данной задачи сводится к выполнению следующих шагов:

1. Для заданной схемы установки и принятых значений независимых переменных производится её термодинамический расчёт, который включает в себя вычисление термодинамических функций рабочих тел в узловых точках, определение расходов материальных потоков и расчёт энергетических показателей установки.

2. На основании эксергетических балансов рассчитываются суммарные эксергетические потери в установке D_s и в её i -ых элементах D_i , $i=1, 2, \dots, n$, где n — число рассматриваемых элементов.

3. Анализируется распределение величин D_s между элементами.

4. Одновременно изменяются отдельные составляющие эксергетических потерь i -го элемента и осуществляется возврат к пункту 1 настоящего алгоритма до тех пор, пока имеет место неравенство $i \leq n$.

Кроме того, в данном исследовании решается задача, когда одновременно принимаются равными нулю отдельные составляющие эксергетических потерь во всех n элементах или в выделенной их совокупности.

Основными целями решения указанных задач являются:

- Исследование влияния изменения потерь от необратимости в элементах на суммарные потери в установке.
- Установление предельных значений увеличения термодинамической эффективности для анализируе-

мых структур циклов.

- Выявление возможных качественных закономерностей в распределении суммарных потерь по элементам установки.

Реализация каждого из этапов представленного алгоритма содержит особенности, которые необходимо учитывать при проведении соответствующих вычислительных экспериментов.

Прежде всего, на первоначальном этапе задаётся структура (схема) установки, которая должна быть сохранена в дальнейшем. Последнее требование накладывает ограничение на возможные диапазоны изменения независимых переменных. Например, для циклов низкого и среднего давлений криогенных установок условие равенства нулю технических потерь в детандере означает, что процесс в нём будет изоэнтальпным. В этом случае из схем данных циклов фактически должна быть удалена дроссельная ступень окончательного охлаждения.

При постановке задачи термодинамического анализа, целесообразно придать эксергетическим потерям конкретный смысл. Это предполагает фиксацию количества и качества полученного в установке продукта либо величины затрат энергии в ней [3].

В число независимых переменных желательно включить величины, непосредственно отражающие эксергетические потери. Варьирование некоторых из них и даёт возможность достичь сформулированных выше целей решения поставленных задач. Начальные значения этих величин по возможности должны соответствовать принципу равноценности потерь [1].

Определённые трудности возникают при выборе варьируемых переменных и установлении возможного диапазона их изменения. Априори ясно, что такие переменные должны отражать технические потери. Относительно таких величин как гидравлические сопротивления и теплопритоки из окружающей среды, выражающие только технические потери, сомнений не возникает, если речь идет об их уменьшении. В то же время такая обычно задаваемая переменная как недорекуперация на конце теплообменного аппарата опосредованно характеризует не только технические потери, обусловленные конечной поверхностью теплообмена, но и собственные потери, причиной которых являются индивидуальные особенности термодинамических свойств рабочих тел [6]. По этой причине, например, нельзя принять равными недорекуперации на теплых концах для двух теплообменников, входящих в последовательно включённые ступени охлаждения. В противном случае для более высокотемпературного теплообменника недорекуперация на обоих концах аппарата будет нулевой, и при этом не будет выполняться его энергетический баланс из-за различия изобарных теплоёмкостей рабочих тел в потоках.

Иная проблема возникает с определением верхнего предела изменения изоэнтальпного КПД детандера, которая проистекает из условия сохранения структуры цикла установки. Природа данной проблемы обусловлена отсутствием математических соотношений, выражающих данное условие.

3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ИСКЛЮЧЕНИЯ ПОТЕРЬ ДЛЯ АНАЛИЗА ЦИКЛОВ КРИОГЕННЫХ УСТАНОВОК

Некоторые из рассмотренных в предыдущем разделе особенностей применения метода последовательного исключения потерь были установлены в процессе моделирования циклов криогенных установок.

Проведены расчётные исследования четырёх классических схем криогенных установок в рефрижераторных и ожижительных режимах работы:

- цикл Линде на азоте;
- водородный дроссельный цикл с внешней ступенью промежуточного охлаждения;
- водородный дроссельный цикл с внешней и детандерной ступенями промежуточного охлаждения;
- цикл Гейландта на водороде.

На рис. 1 приведены расчётные схемы водородно-дроссельного цикла с внешней и детандерной ступенями охлаждения (рефрижераторный режим *R*) и водородно-дроссельного цикла с промежуточным азотным охлаждением (ожижительный режим *L*), результаты анализа которых отражают основные характерные особенности остальных исследованных систем.

На рис. 1 использованы следующие условные обозначения:

- элементы схем: К — компрессор; Д — детан-

дер; Т1, Т2, Т3, Т4 — теплообменники; Др — дроссель; И — испаритель; С — сборник жидкости; В — ванна с жидким азотом; Дг — догреватель;

• расходы материальных потоков: G_L — расход жидкого продукта; G_K — расход рабочего тела через компрессор; G_D — расход рабочего тела через детандер; G_B — расход жидкого азота, подаваемого в ванну;

• энергетические потоки: Q_x — холодопроизводительность цикла; $Q_{31}, Q_{32}, Q_{33}, Q_{34}, Q_{3B}, Q_2$ — теплопритоки из окружающей среды к теплообменникам Т1, Т2, Т3, Т4, ванне, догревателю соответственно; Q_0 — тепло, отдаваемое в окружающую среду; L_K — работа, затрачиваемая компрессором; L_D — работа, получаемая в детандере. Имена и стрелки, относящиеся к энергетическим потокам, учитываемым в эксергетических балансах, выделены синим цветом, а рассматриваемые как потери — красным цветом.

Догреватель физически представляет собой участок трубопровода от места выхода обратного потока из наиболее высокотемпературного теплообменника до входа в компрессор и осуществляет подогрев обратного потока до температуры окружающей среды из-за имеющей место недорекуперации.

Основные исходные данные, принятые при термодинамическом расчёте изображенных на рис. 1 схем, отображены в таблице.

В таблице производительность установки в рефрижераторном режиме выражена в Вт, в ожижитель-

ном — в моль/с.

Производительность установки в ожижительном режиме определяет её производительность в рефрижераторном режиме. Данные, характеризующие потери от необратимости, выбраны согласно рекомендациям [7,8] и распределены между элементами циклов в соответствии с принципом неравноценности потерь.

При составлении эксергетических балансов элементы, в которых основной продукт установки выдаётся потребителю (испаритель, сборник жидкости), считались идеальными, т.е. в них отсутствовали потери от необрати-

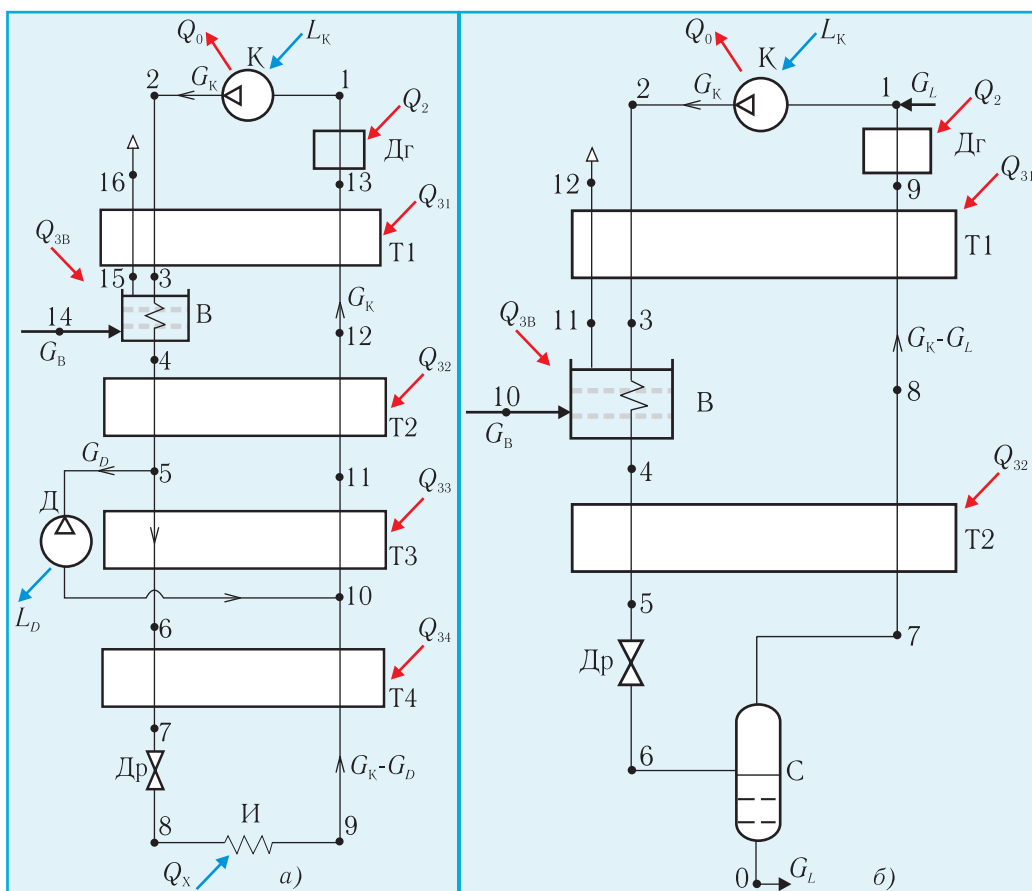


Рис. 1. Схемы криогенных циклов: а — дроссельный цикл с внешней и детандерной ступенями промежуточного охлаждения; б — дроссельный цикл с внешней ступенью промежуточного охлаждения

мости. Также принималось, что работа, полученная в детандере, полезно используется.

Исходные данные для расчёта криогенных циклов

Схема	Режим	Производительность	T_x , К	Давление цикла, МПа	η_k	η_s
Рис. 1,а	R	100	21	10	0,65	0,7
	L	0,11				
Рис. 1,б	R	100	21	10	0,65	—
	L	0,11				

Примечание: η_k — изотермический КПД компрессора; η_s — изоэнтропный КПД детандера.

На рис. 2 приведены гистограммы распределения потерь по элементам установок, изображенных на рис. 1, для рефрижераторного и оживительного режимов их работы.

Величины потерь на рис. 2 выражены в Вт; в нижней подрисуночной строке на каждом из них содержатся численные значения эксергетических потерь в указанных элементах.

Сравнение гистограмм, полученных для каждого из рассмотренных циклов в различных режимах работы установки, указывает на то, что их вид в основном сохраняется при смене режима, но существенно изменяется в зависимости от вида цикла. Этот факт может быть использован для создания алгоритма увеличения энергетической эффективности установки, не зависящего от вида получаемого в ней продукта.

Наблюдаемые существенные отличия для значений эксергетических потерь в элементах установок при различных режимах их работы объясняются масштабным фактором — расходом газа через компрессор. Последний обусловлен указанным выше принятым условием перехода из рефрижераторного режима работы на оживительный. В случае сохранения при таком переходе величины G_k потребовалось бы усложнить задачу, используя различный для каждого из режимов свой алгоритм термодинамического расчёта цикла.

На рис. 2 элементы рассматриваемых установок расположены по признаку уменьшения наибольшей температуры входящих в эти элементы материальных потоков. Цель такого построения гистограммы — установить, соблюдается ли принцип неравноценности потерь для исследованных систем и принятых исходных данных. В соответствии с ним по мере понижения температуры рабочего тела необходимо стремиться к уменьшению потерь от необратимости процессов. При выполнении принципа неравноценности на гистограммах рис. 2 должно иметь место монотонное уменьшение высоты прямоугольников, чего на самом деле не наблюдается. Несмотря на обоснованность данного принципа, остаются неконкретизированными вопросы его практического применения. В частности, это касается процедуры выбора характерной температуры процессов в элементе установки. Возможно, принятый способ распределения элементов по температуре не пригоден для анализа выполнимости принципа неравноценности потерь.

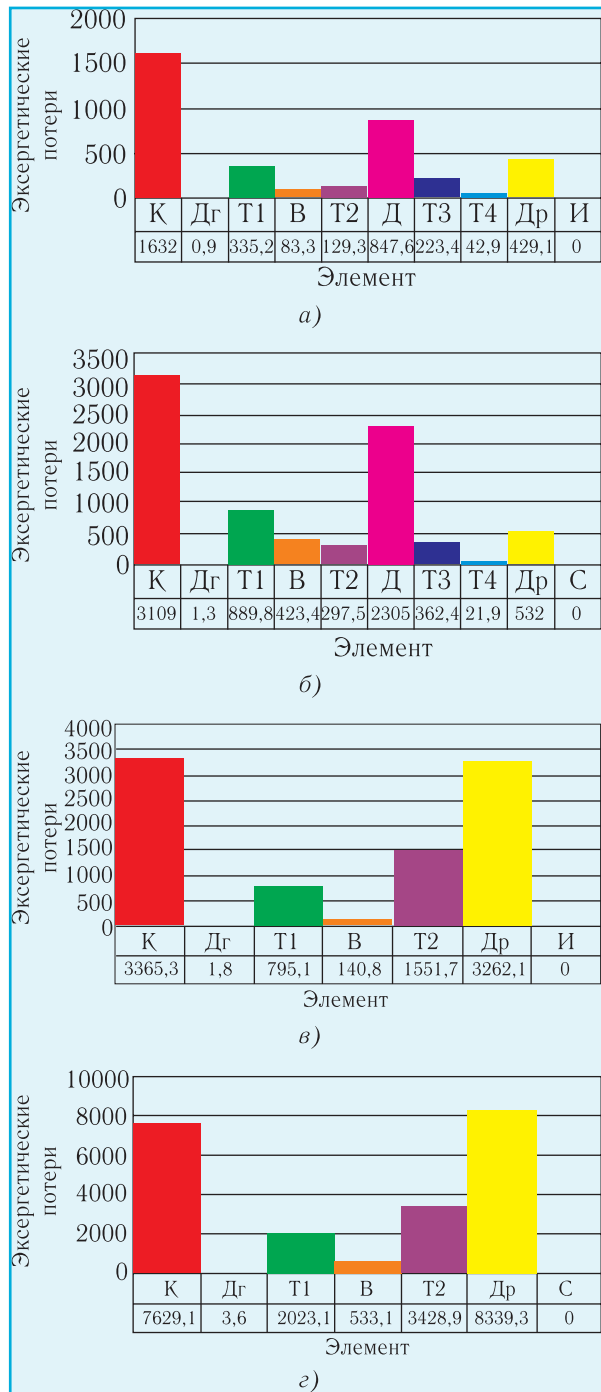


Рис. 2. Гистограммы распределения потерь по элементам: а — дроссельный цикл с внешней и детандерной ступенями охлаждения (рефрижераторный режим); б — дроссельный цикл с внешней и детандерной ступенями охлаждения (оживительный режим); в — дроссельный цикл с внешней ступенью промежуточного охлаждения (рефрижераторный режим); г — дроссельный цикл с внешней ступенью промежуточного охлаждения (оживительный режим)

При сравнении цикла Гейландта и дроссельного цикла с внешней и детандерной ступенями промежуточного охлаждения, удалось установить, что чем выше температура перед детандером, тем меньше его вклад в суммарные эксергетические потери установки.

Анализируя все рассматриваемые схемы, можно

сделать вывод, что вклад дросселя уменьшается с ростом числа ступеней охлаждения.

Основная цель проведённых вычислительных экспериментов заключается в исследовании влияния технических потерь на суммарные эксергетические потери в установке D_s . Результаты расчётов для цикла, изображённого на рис. 1, б, представлены на гистограмме рис. 3.

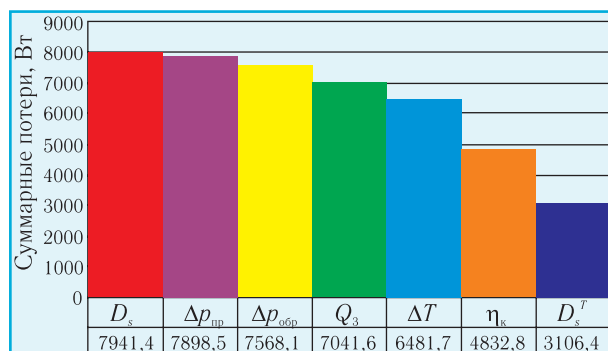


Рис. 3. Влияние исключаемых технических потерь на суммарные потери в дроссельном цикле с внешней и детандерной ступенями промежуточного охлаждения

На рис. 3 первая колонка представляет собой величину D_s , определённую с учётом всех принятых технических потерь, а последняя D_s^T — для цикла с собственными потерями. В подрисуночной строке, содержащей имена колонок, использованы следующие обозначения исключаемых технических потерь: ΔT — недорекуперация на теплых концах теплообменников; $\Delta p_{пр}$ — гидравлические сопротивления по прямому потоку; $\Delta p_{обр}$ — гидравлические сопротивления по обратному потоку; η_k — изотермический КПД компрессора; Q_3 — теплопритоки из окружающей среды. Эти имена определяют вид исключаемых потерь, а высота колонки соответствует суммарным потерям в цикле без исключенной технической потери. Колонки на гистограмме расположены по признаку уменьшения величины потерь.

Как следует из рис. 3, величина D_s более чувствительна к изменению $\Delta p_{обр}$ по сравнению с уменьшением $\Delta p_{пр}$, несмотря на то, что имеет место соотношение $\Delta p_{пр} \gg \Delta p_{обр}$. В случае цикла Линде [3], уменьшение $\Delta p_{пр}$ может привести к увеличению D_s в рефрижераторном режиме работы. В остальных циклах изменение $\Delta p_{пр}$ практически не приводит к изменению D_s .

Исключение всех технических потерь D_s^T независимо от режима работы и цикла приводит к уменьшению D_s .

Исходя из проведённых расчётов, можно установить, что распределение потерь зависит как от режима работы, так и от цикла криогенной установки.

Отметим, что все технические потери невозможно полностью исключить. В цикле Гейландта [9] на водороде (рефрижераторный режим) при исключении гидравлических потерь по обратному потоку высокотемпературный теплообменник оказывается неработоспособным; в случае исключения теплопритоков из окружающей среды либо недорекуперации на теплом

конце высокотемпературного теплообменника, неработоспособными окажутся оба теплообменника. В ожижительном цикле Гейландта высокотемпературный теплообменник является неработоспособным в том варианте, когда исключены все технические потери. Из этого примера следует, что составляющие эксергетических потерь могут служить критерием работоспособности цикла.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленное в данной работе развитие и исследование метода исключения потерь для эксергетического анализа циклов криогенных установок приводит к следующим основным выводам:

1. Требование положительности значений эксергетических потерь в любом элементе цикла может рассматриваться как необходимое, но недостаточное условие работоспособности цикла для заданной структуры и выбранных исходных данных.

2. Не каждая техническая потеря является полностью устранимой, что обусловлено требованиями сохранения структуры цикла и его работоспособности. Поэтому для отдельных видов потерь можно говорить лишь об их уменьшении. Определение же нижнего предела такого уменьшения пока является проблемой.

3. Характер распределения эксергетических потерь в исследованных вариантах в меньшей степени зависит от режима работы установки (рефрижераторного или ожижительного), чем от её цикла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бродянский В.М., Семёнов А.М. Термодинамические основы криогенной техники. — М.: Энергия, 1980. — 448 с.
2. Гохштейн Д.П. Современные методы термодинамического анализа энергетических установок. — М.: Энергия, 1969. — 368 с.
3. Троценко А.В., Поддубная М.В. Исследование эксергетических потерь криогенных систем// Технические газы. — 2009. — № 2. — С. 56-59.
4. Троценко А.В. Метод определения и анализ составляющих эксергетических потерь в теплообменных аппаратах// Технические газы. — 2007. — № 1. — С. 56-62.
5. Троценко А.В. Определение составляющих эксергетических потерь методом исключения// Холодильная техника и технология. — 2008. — № 1 (111). — С. 40-45.
6. Троценко А.В. Термодинамическая идеализация процессов и циклов низкотемпературных систем// Технические газы. — 2008. — № 3. — С. 56-61.
7. Примеры расчётов криогенных установок/ С.С. Будневич, Л.А. Акулов, Е.И. Борзенко и др. — Л.: Машиностроение, 1972. — 288 с.
8. Расчёт криогенных установок/ Л.А. Акулов, Е.И. Борзенко, С.С. Будневич и др. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1979. — 367 с.
9. Герш С.Я. Глубокое охлаждение. Ч.1. Термодинамические основы сжижения и разделения газов. Изд. 3-е, доп. и перераб. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957. — 392 с.