

УДК 621.311

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЦИКЛА ЛИНДЕ
IMPROVEMENTS TO THE LINDE CYCLE**

Ю.С. Кохан, О.Г. Щесняк

Научный руководитель – Ю.П. Ярмольчик, к.т.н., доцент
Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, республика Беларусь

yarmolchik@bntu.by

J. Kokhan, O. Schesnyak

Supervisor – Y. Yarmolchik, Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: Принцип действия цикла Линде и его усовершенствование путем уменьшения необратимости процесса.

Abstract: The principle of operation of the Linde cycle and its improvement by reducing the irreversibility of the process.

Ключевые слова: дросселирование, двухступенчатое сжатие и двухступенчатое расширение, переохлаждение сжатого газа.

Keywords: throttling, two-stage compression and two-stage expansion, supercooling of compressed gas.

Введение

Впервые цикл высокого давления с однократным дросселированием был осуществлен в 1895 году К. Линде и известен как цикл Линде. В установке Линде используется регенеративный принцип, который заключается в непрерывном понижении температуры при дросселировании для последующего охлаждения новой порции газа. Процесс непрерывного понижения температуры продолжается до тех пор, пока не наступит температура снижения газа.

Основная часть

Схема ожижения воздуха по способу К. Линде с дросселированием сжатого воздуха представлена на рис. 1. Атмосферный воздух подается в компрессор 1, где сжимается до определенного давления, откуда направляется по змеевику 2 в холодильник 3. В холодильнике сжатый воздух охлаждается водой, отдавая свою теплоту сжатия, образовавшуюся вследствие затраты работы на сжатие воздуха в компрессоре. На выходе из холодильника воздух имеет приблизительно такую же температуру, как и на входе его в компрессор. Сжатый воздух поступает в теплообменник 8 и далее в дроссельный вентиль 4, где происходит дросселирование и охлаждение воздуха. Расширившийся и охладившийся воздух поступает в резервуар 5, откуда отводится по трубе 7 в наружную трубу теплообменника 8. Проходя наружную трубу теплообменника, дросселированный воздух охлаждает сжатый воздух, поступающий по трубе к дроссельному вентилю. Предварительно охлажденный сжатый воздух при дросселировании через вентиль 4 охлаждается до более низкой температуры. Наступает момент, когда предварительное охлаждение сжатого воздуха в теплообменнике будет происходить до температуры, когда воздух, проходя через дроссельный вен-

ть 4, начнет частично сжижаться и стекать в виде жидкости в резервуар 5, откуда его можно сливать через вентиль 6. Не сжижившаяся часть воздуха будет отводиться по трубе 7 в теплообменник 8 и охлаждать поступающий к дроссельному вентилю сжатый воздух.

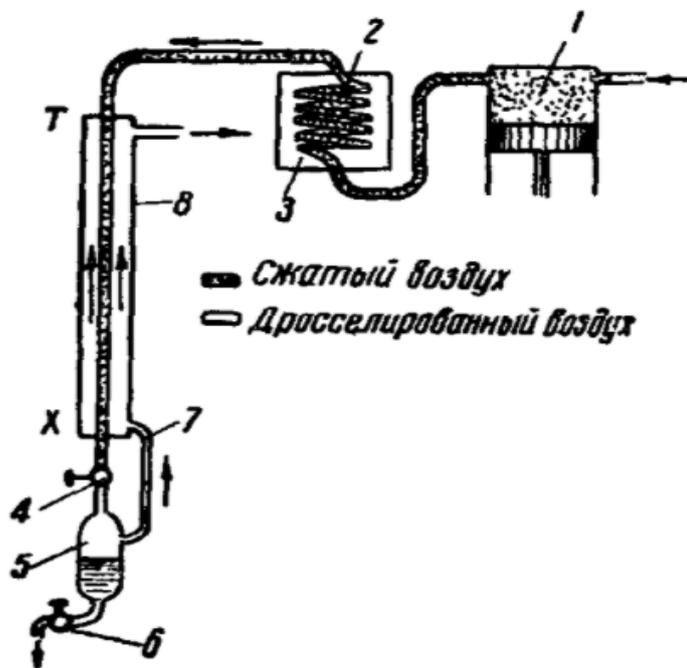


Рисунок 1 – Установка цикла Линде

Количество холода, получаемого при сжижении воздуха по способу К. Линде, зависит только от разности теплосодержаний при начальном и конечном давлениях сжатия воздуха, поступающего в теплообменник. По способу К. Линде в установке с каждого сжатого килограмма воздуха получают примерно 5,25 кал/кг.

Необратимостью данного цикла является сумма необратимых потерь, возникших в редукционном венти́ле (ΔL_B) и теплообменнике (ΔL_T):

$$\Delta L = \Delta L_B + \Delta L_T, \quad (1)$$

Усовершенствования цикла заключаются в уменьшении необратимости процесса. Необратимость действия редукционного вентиля можно снизить, применив двухступенчатый цикл

Применяют двухступенчатое сжатие и двухступенчатое расширение в редукционных вентилях. В первой ступени газ сжимается до промежуточного давления p_2 (для воздуха это 100 ат). К этому газу присоединяется некоторое количество газа из внутреннего теплообменника, так что во второй ступени уже сжимается количество Z_2 . Затем этот газ, пройдя через внутренний теплообменник, расширяется до давления p_2 в первом редукционном венти́ле. Часть этого газа $Z_2 - 1$ через внутренний теплообменник возвращается к выходу во второй

компрессор, а остаток во втором редукционном вентиле расширяется до нормального давления. Образуется Z_0 жидкости, а $1 - Z_0$ пара возвращается через внешний теплообменник к первому компрессору.

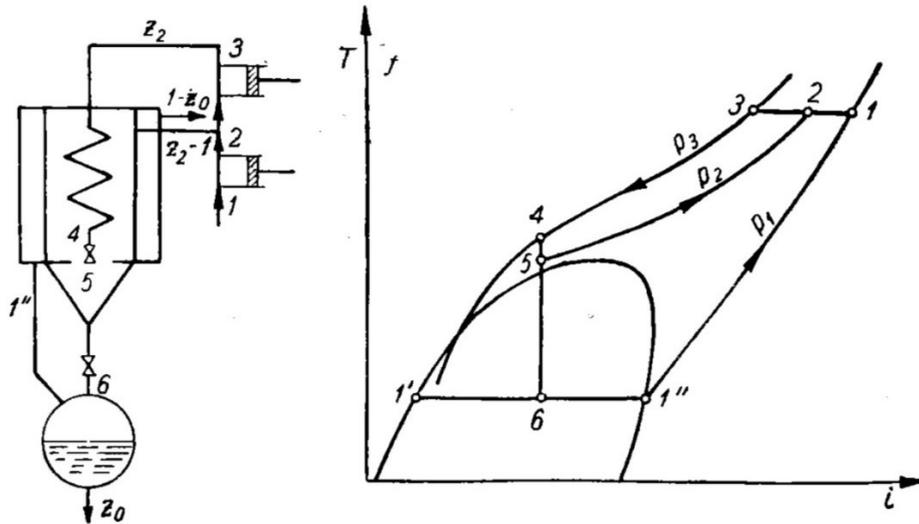


Рисунок 2 – Цикл Линде с двухступенчатым сжатием

В первом редукционном вентиле расширяется Z_2 , а окончательному расширению до нормального давления во втором редукционном вентиле, являющимся источником гораздо большей необратимости, подвергается только часть этого газа. Общая необратимость в этом цикле меньше, чем в одноступенчатом, это означает, что затрата работы в двухступенчатом цикле меньше, чем в одноступенчатом, приблизительно на 30 %.

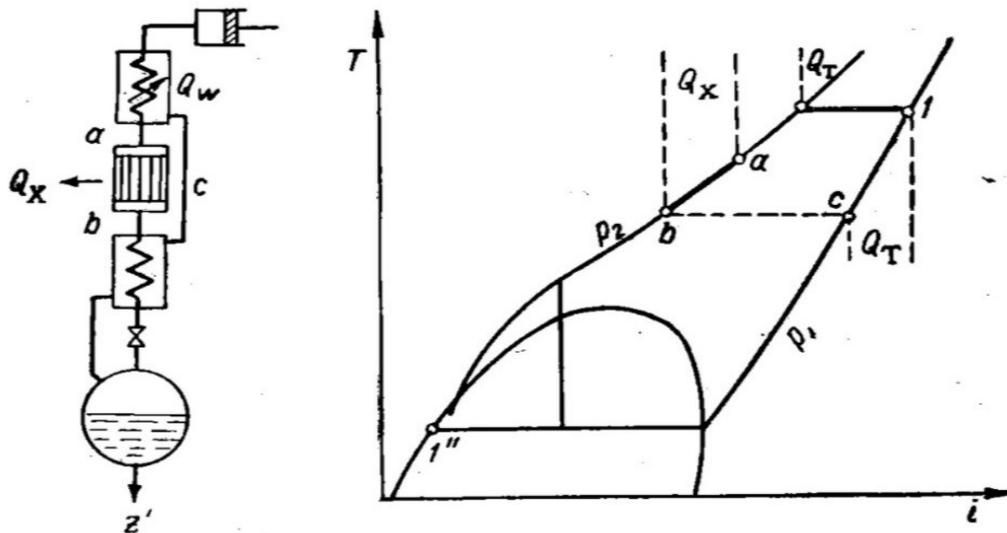


Рисунок 3 – Цикл Линде с переохлаждением сжатого воздуха

По другому способу улучшения цикла Линде применяется переохлаждение сжатого газа с помощью холодильной машины (рис. 3). Охлаждение непосредственно за компрессором было бы неправильно, так как весь запас холода

уходящего газа, покидающего холодильник, не был бы использован. Следовательно, теплообменник здесь должен быть разделен на две части и между ними установлен холодильник, отводящий теплоту Q_x в холодильную машину.

Баланс теплообменника вместе с холодильником можно представить следующим уравнением:

$$i_2 = Q_x + (1 + Z')i_1 + i'_1 Z', \quad (2)$$

где i_1 – начальная энтальпия сжатого воздуха, Дж/кг;

i_2 – конечная энтальпия сжатого воздуха, Дж/кг;

Q_x – количество теплоты, отводимое в холодильную машину, Дж;

Z' – степень конденсации.

Из уравнения 2 видно, что степень конденсации цикла равна

$$Z' = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i'_1} + \frac{Q_x}{i_2 - i'_1}, \quad (3)$$

В выражении 3 первая дробь является степенью конденсации Z в обычном цикле. Следовательно, отсюда получаем

$$Z' = Z + \frac{Q_x}{i_2 - i'_1}, \quad (4)$$

Таким образом, производительность в цикле с переохлаждением выше, чем в обычном.

Расход работы в цикле с доохлаждением складывается из работы компрессора машины Линде L_k и холодильной машины L_x . В расчетах на 1 кг полученной жидкости имеем:

$$L = \frac{L_k}{Z'} + \frac{Q_x}{Z'\epsilon}, \quad (5)$$

Здесь L_k относится к 1 кг сжатого газа, а ϵ – холодильный коэффициент машины переохлаждения.

Заключение

Подставляя значение Z' по формуле 3 в последнее уравнение, можно доказать, что расход работы здесь приблизительно на 30 % меньше, чем в обычной машине.

Процесс Линде используют в тех случаях, когда расход энергии играет второстепенную роль, а решающими являются простота установки и надежность ее работы. В крупных кислородных установках применяют более совершенные и экономичные процессы, частично включающие в себя элементы процесса Линде.

Литература

1. Снижение газов по методу Линде [Электронный ресурс]/ – Режим доступа: <https://www.chem21.info/page/05211011604400907523109004917206309692240065101/>. – Дата доступа: 10.04.2021.
2. Усовершенствование цикла Линде [Электронный ресурс]/ – Режим доступа: <https://www.chem21.info/page/012253253113125094185039198147165097185052118158/>. – Дата доступа: 10.04.2021.