

## О ПРИМЕНЕНИИ КРИТЕРИЕВ TEWI, LCCP И LCC ДЛЯ СРАВНЕНИЯ ЭНЕРГОПРЕОБРАЗУЮЩИХ ХОЛОДИЛЬНЫХ СИСТЕМ

Карнаух В.В.<sup>1,2</sup>, Байда Б.Ю.<sup>1</sup>, Приймак А.С.<sup>1</sup>

ДОННУЭТ, г. Донецк, ДНР, <sup>2</sup> СамГТУ, г. Самара

### Аннотация

В работе рассматриваются критерии, оценивающие техногенное воздействие энергопреобразующих холодильных систем на окружающую среду. Приводятся результаты сравнительного анализа по TEWI и LCCP, полученные для среднетемпературной парокомпрессионной теплонасосной установки (ПТНУ), работающей на хладагентах R1234ze, R1336mzz (E), R600a и R744. Из рассматриваемых альтернативных рабочих тел наихудшие экологические показатели у R1336mzz (E), т.к. суммарная эмиссия эквивалентного CO<sub>2</sub> за весь период жизненного цикла превышает аналогичный показатель для R600a в 4,2 раза. Результаты LCCP показывают, что производительность системы и выбросы при производстве оборудования являются доминирующими факторами выбросов CO<sub>2</sub> в течение всего срока службы ПТНУ. Результаты сравнения хладагентов на основе TEWI и LCCP прямо пропорционально и зависят от величины потребляемой энергии со стороны ПТНУ, что также отражается на показателях энергоэффективности системы. Критерии TEWI, LCCP и LCC целесообразно учитывать при сравнении и подборе энергопреобразующих холодильных систем, применяя метод многокритериальной оптимизации, что поможет пользователю получить более информативное представление о ПТНУ.

**Ключевые слова:** энергопреобразующая система, холодильная техника, тепловой насос, LCCP, TEWI, LCC.

## TEWI, LCCP AND LCC METRICS FOR COMPARING THE REFRIGERATION SYSTEMS

Viktoriia Karnaukh<sup>1,2</sup>, Boris Bayda<sup>1</sup>, Alexey Priymak<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky, Donetsk  
<sup>2</sup>Samara State Technical University, Samara

### Abstract

The paper considers environmental metrics that assess the man-made impact of energy-converting refrigeration systems on the environment. The results of a comparative analysis of TEWI and LCCP obtained for a medium-temperature vapor-compression heat pump unit (VCHP) operating on refrigerants R1234ze, R1336mzz (E), R600a and R744 are presented. R1336mzz (E) has the worst environmental indicators, because the total emission of equivalent CO<sub>2</sub> for the entire period of the life cycle exceeds the same indicator for R600a by 4.2 times. The LCCP results show that system performance and equipment manufacturing emissions are the dominant drivers of CO<sub>2</sub> emissions over the life of the SHP unit. The results of comparing refrigerants based on TEWI and LCCP are directly proportional and depend on the amount of energy consumed by the VCHP, which is also reflected in the energy efficiency indicators of the system. It is advisable to take into account the TEWI, LCCP and LCC criteria when comparing and selecting energy-converting refrigeration systems using the multi-criteria optimization method, which will help the user get a more informative understanding of the VCHP.

**Keywords:** energy conversion system, refrigeration, heat pump, LCCP, TEWI, LCC.



## Введение

В последние годы для количественной оценки техногенного воздействия на окружающую среду энергопреобразующих холодильных систем используют ряд критериев: потенциал глобального потепления ПГП (англ. *Global Warming Potential – GWP*), потенциал разрушения озонового слоя (англ. *Ozone Depletion Potential – ODP*), полный эквивалентный вклад в парниковый эффект (англ. *Total Equivalent Warming Impact – TEWI*) и показатель «влияние на климат за жизненный цикл» (англ. *Life Cycle Climate Performance – LCCP*) [1-4].

Несмотря на непрекращающиеся дебаты по их целесообразности и достоверности, большинство специалистов рассматривает их в качестве важного инструмента для подбора, разработки и внедрения холодильного оборудования. Хотя каждый из показателей служит одной и той же цели – количественной оценки воздействия хладагентов на глобальное потепление, их использование может привести к разным выводам. Поэтому для корректного проектирования, эксплуатации и прогнозирования работы парокомпрессионных систем неотъемлемым этапом должна быть оценка ее влияния на климат за весь срок эксплуатации.

Цель данной работы – краткий обзор экологических критериев и их сравнительная оценка на примере энергопреобразующей системы – среднетемпературной парокомпрессионной теплонасосной установки, работающей на хладагентах R1234ze, R1336mzz (E), R600a и R744.

## Материалы и методы

Потенциал глобального потепления ПГП – это теплота, поглощаемая любым парниковым газом в атмосфере, кратная количеству теплоты, которое может быть поглощено той же массой диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ). Для  $\text{CO}_2$  *GWP* равен 1. Для других газов это зависит от газа и временных рамок. Имеются справочные значения *GWP*, которые оцениваются и обновляются для каждого временного интервала по мере улучшения методов их расчета и прогнозирования.

Для количественной оценки всех негативных факторов, определяющих комплексный вклад хладагентов в глобальное потепление, был введен расчетный показатель экологической чистоты холодильной установки – фактор суммарного эквивалентного воздействия хладагента на глобальное потепление *TEWI*.

*TEWI* является показателем для оценки парникового эффекта путем сочетания прямого вклада от выбросов хладагентов в атмосферу и косвенного вклада от выбросов углекислого газа и других газов, образующихся при выработке энергии, необходимой для работы холодильной системы в течение всего срока ее эксплуатации [4]:

$$TEWI = GWP \times m_{\text{х.а.}} \times L_{\text{год}} \times n + GWP \times m_{\text{х.а.}} \times (1 - \alpha_{\text{ут}}) + E_{\text{год}} \times \beta \times n, \quad (1)$$

где *GWP* – потенциал глобального потепления хладагента по отношению к  $\text{CO}_2$  ( $GWP_{\text{CO}_2}=1$ ),  $\text{кгCO}_2/\text{кг}$ ;  $m_{\text{х.а.}}$  – масса хладагента в установке,  $\text{кг}$  (из термодинамического расчета);  $\alpha_{\text{ут}}$  – величина утилизации хладагента (эмиссия) из установки, от 0 до 1;  $L_{\text{год}}$  – величина утечек хладагента в течение года, % (2-5% от заправки);  $n$  – средний срок работы установки, лет (мин 15 лет);  $\beta$  – коэффициент косвенных выбросов – масса выделяющегося при производстве 1 кВт·ч электроэнергии диоксида углерода,  $\text{кг}\cdot\text{CO}_2/\text{кВт}\cdot\text{ч}$  (0,165  $\text{кг}\cdot\text{CO}_2/\text{кВт}\cdot\text{ч}$ );  $E_{\text{год}}$  – годовое энергопотребление,  $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{год}$ .

Показатель *TEWI* предназначен для расчета полного влияния процессов искусственного охлаждения на парниковый эффект. Этот показатель учитывает как прямое влияние на парниковый эффект хладагента, если имеет место его утечка, так и кос-



венное воздействие холодильной системы вследствие потребления ею энергии, используемой для энергоснабжения установки при ее нормальной работе в течение всего срока ее эксплуатации.

Прямые выбросы включают ежегодную утечку хладагента и утечки, вызванные катастрофами; косвенные выбросы связаны с жизненным циклом хладагента, с производством и транспортировкой системы и хладагента. Показатель *TEWI* более показателен, чем *GWP*, но он не принимает во внимание все сопутствующие косвенные выбросы. На практике расчет показателя *LCCP* («влияние на климат за жизненный цикл») сложнее, чем *TEWI*. Он предназначен для предоставления целостной картины воздействия установки на окружающую среду. *LCCP* рассчитывается как сумма прямых и косвенных эмиссий системы за весь период существования системы «от колыбели до могилы» [1].

Критерий *LCCP* определяется по следующим формулам:

$$LCCP = \text{прямое воздействие (DE)} + \text{косвенное воздействие (IE)}. \quad (2)$$

$$DE = m_{\text{х.а.}} (n \cdot L_{\text{год}} + EOL)(GWP + \text{adp.GWP}), \quad (3)$$

где  $L_{\text{год}}$  – величина утечек хладагента в течение года, % от заправки (2-5 %); *EOL* – остаток хладагента на конец срока службы, % от заправки (принимается 15% от заправки); *adp.GWP* – адаптационный потенциал глобального потепления хладагента, кгCO<sub>2экв</sub>/кг (по табл. для R1234yz =3,3; R600a=1,7; R=1336mzz=3,1).

$$IE = n \cdot E_{\text{год}} \cdot EM + \sum(m \cdot MM) + \sum(m_{\text{пм}} \cdot RM) + m_{\text{х.а.}} (1 + n \cdot L_{\text{год}}) \cdot RFM + m_{\text{х.а.}} \cdot (1 - EOL) \cdot RFD, \quad (4)$$

где *EM* – эмиссия CO<sub>2</sub>, приходящаяся на 1 кВт·ч энергии, кгCO<sub>2экв</sub>/кВт·ч; (0,54...0,86 кг CO<sub>2экв</sub>/кВт·ч); *m* – масса установки, кг; *MM* – эмиссии CO<sub>2</sub> при производстве материалов, кг CO<sub>2экв</sub>/кг; *m<sub>пм</sub>* – масса переработанного материала (вторсырья), кг; *RM* – эмиссии CO<sub>2</sub> при производстве вторсырья, кгCO<sub>2экв</sub> /кг; *RFM* – эмиссии при производстве хладагента, кгCO<sub>2экв</sub> /кг; *RFD* – эмиссии при уничтожении хладагента, кг CO<sub>2 экв</sub>/кг.

Методика определения *LCCP* – очень гибкий инструмент, применяемый к любому типу энергопреобразующих систем (стационарных холодильных систем, систем кондиционирования и тепловых насосов, использующих парокомпрессионный цикл и потребляющих электроэнергию из электросетей).

Один из важных потребительских критериев сложного наукоемкого изделия, к которому можно отнести и ПТНУ, – стоимость жизненного цикла – СЖЦ (англ. *Life Cycle Cost, LCC*) [5-7].

Важнейший принцип концепции СЖЦ определен как «прогноз и управление расходами на производство и эксплуатацию изделия на стадии его проектирования».

Расчет СЖЦ изделия позволяет определить затраты на:

- предварительное и концептуальное проектирование;
- разработку и проектирование системы;
- изготовление (себестоимость изделия);
- обслуживание и утилизацию.

Процессы жизненного цикла теплового насоса, которые учитывает методика СЖЦ, приведены на рис. 1. При таких расчетах часто используют параметры, полученные при анализе надежности технической системы и составляющих узлов и агрегатов: интенсивность отказов, стоимость запасных частей, продолжительность ремонта, стоимость комплектующих и т.д.



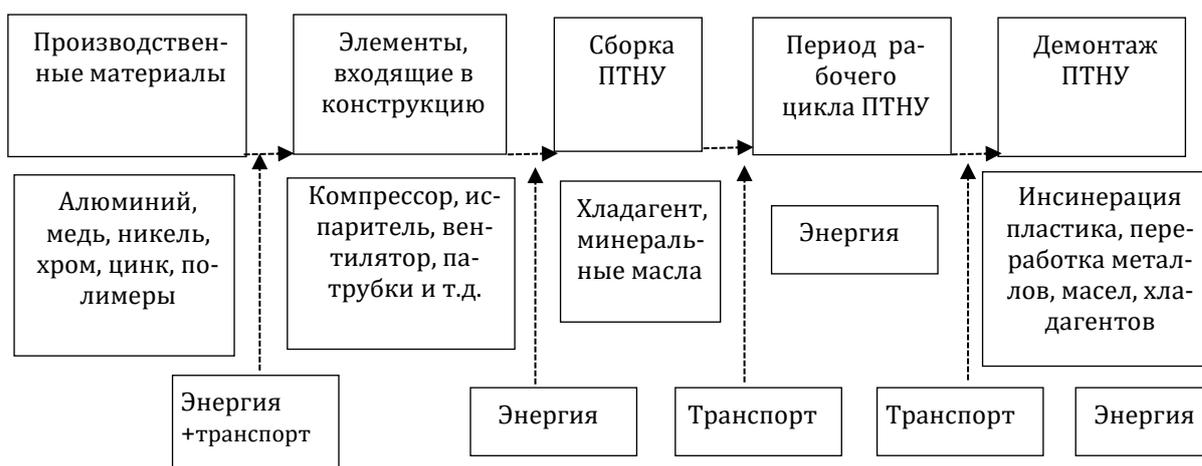


Рис. 1. Процессы жизненного цикла теплового насоса

В соответствие с методикой, предложенной в [8], СЖЦ для тепловых насосов определяется по формуле:

$$\text{СЖД} = C_{ic} + C_{in} + C_e + C_o + C_m + C_s + C_{env} + C_d, \quad (5)$$

где  $C_{ic}$  – первоначальные затраты, цена покупки (насос, система, труба, вспомогательные услуги);  $C_{in}$  – стоимость установки и ввода в эксплуатацию (включая обучение);  $C_e$  – затраты на электроэнергию (прогнозируемые затраты на эксплуатацию системы, включая привод насоса, элементы управления и любые вспомогательные услуги);  $C_o$  – эксплуатационные расходы (трудоzатраты на обычный надзор за системой);  $C_m$  – затраты на техническое обслуживание и ремонт (плановые и прогнозируемые ремонты);  $C_s$  – затраты на время простоя (потери производства);  $C_{env}$  – затраты на охрану окружающей среды (загрязнение перекачиваемой жидкостью и вспомогательным оборудованием);  $C_d$  – затраты на вывод из эксплуатации/утилизацию (включая восстановление местной окружающей среды и предоставление вспомогательных услуг).

Стоимость жизненного цикла ПТНУ, включающая все затраты потребителя при ее использовании, во многом предопределяет выбор потребителя. При этом следует отметить, что рост уровня качества технической системы сопровождается снижением эксплуатационных расходов и ростом затрат на ее изготовление. Поэтому новые (инновационные) технические системы, имеют более высокую первоначальную стоимость по сравнению с существующими аналогами и обеспечивают на протяжении срока эксплуатации более низкие эксплуатационные расходы.

Результатом осуществления расчета стоимости жизненного цикла является выявление варианта с самой низкой СЖЦ. Мы рекомендуем этот параметр учитывать при подборе ПТНУ методом многокритериальной оптимизации, куда также введены  $TEWI$  и  $LCCP$  [2].

## Результаты

В данной работе приведены результаты по  $TEWI$  и  $LCCP$ , полученные авторами для среднетемпературной ПТНУ, работающей на R1234ze, R1336mzz (E), R600a и R744 (табл.). В качестве эталонного хладагента был принят R410A, как один из наиболее применяемых на данный момент хладагентов в парокомпрессионных системах.

Расчеты выполнены при  $t_{и} = 20^{\circ}\text{C}$  и  $t_{кд} = 60^{\circ}\text{C}$  по методике, указанной в [2], с использованием программы REFPROF 9.0.

Исходя из полученных результатов, наиболее экологически чистым хладагентом с наименьшим  $GWP$  является R600a со значением суммарной эмиссии эквивалентного  $\text{CO}_2$  за весь период жизненного цикла (15 лет) в 8,64 кг $\text{CO}_2$ .



Таблица

**Расчетные значения экологических показателей ПТНУ типа «вода-вода»  
при  $t_{и} = 20^{\circ}\text{C}$  и  $t_{кд} = 60^{\circ}\text{C}$**

Хладагент	R1234ze	R1336mzz (E)	R600a	R744	R410a
<i>GWP</i> [3]	7	18	3	1	2000
% от R410a	0,35	0,9	0,15	0,05	100%
<i>TEWI</i> , кгCO <sub>2экв</sub>	16,33	36,33	8,58	10,43	43,3
% от R410a	37,7	83,9	20,0	24,09	100%
<i>LCCP</i> , кгCO <sub>2экв</sub>	16,58	36,52	8,64	10,68	45,4
% от R410a	36,2	80,4	19,0	23,52	100%
% от <i>TEWI</i>	+1,51	+0,52	+0,7	+2,4	+4,84

Непосредственный вклад в *TEWI* вносит величина коэффициента преобразования ПТНУ  $\mu_{тн}$ . Так, при использовании хладагента, требующего на 3% больше электроэнергии на привод оборудования ТНУ или ХМ, показатель *TEWI* будет почти в 3 раза выше. Так, несмотря на то, что  $GWP_{R600a} > GWP_{R744}$  в 3 раза, энергопотребление ПТНУ на R744 на 45,26% больше, чем для ПТНУ на R600a, а значит и удельные косвенные выбросы больше, что подтверждается расчетами. Из рассматриваемых альтернативных рабочих тел наихудшие экологические показатели у R1336mzz (E), т.к. суммарная эмиссия эквивалентного CO<sub>2</sub> за весь период жизненного цикла превышает аналогичный показатель для R600a в 4,2 раза.

Результаты *LCCP* показывают, что производительность системы и выбросы при производстве оборудования являются доминирующими факторами выбросов CO<sub>2</sub> в течение всего срока службы ПТНУ. Результаты сравнения хладагентов на основе *TEWI* и *LCCP* прямо пропорционально и зависят от величины потребляемой энергии со стороны ПКТУ, что также отражается на показателях энергоэффективности системы.

Критерии *TEWI*, *LCCP* и *LCC* целесообразно учитывать при сравнении и подборе энергопреобразующих холодильных систем, применяя метод многокритериальной оптимизации, что поможет пользователю получить более информативное представление о ПТНУ.

### Библиографический список

1. Гармонизация методологии определения влияния на климат на протяжении жизненного цикла оборудования (LCCP). 32я информационная записка по холодильным технологиям (октябрь 2016 г.) // Холодильная техника. – 2016. – № 12. – С. 6-11. EDN: [YJYLDN](https://iifir.org/en/fridoc/harmonization-of-life-cycle-climate-performance-methodology-139940) (перевод инф. записки: <https://iifir.org/en/fridoc/harmonization-of-life-cycle-climate-performance-methodology-139940>)
2. Карнаух В.В. Особенности расчета и прогнозирования работы теплонасосных установок на хладагентах четвертого поколения // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2022. – Т. 15, № 2. – С. 202-215. DOI [10.17516/1999-494X-0383](https://doi.org/10.17516/1999-494X-0383). EDN: [DROFQE](https://doi.org/10.17516/1999-494X-0383)
3. ISO 817:2014. Refrigerants. Designation and safety classification. – Geneva: ISO, 2016. – 73 p.
4. Maykot R., Weber G.C., Maciel R.A. Using the TEWI methodology to evaluate alternative refrigeration technologies // *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*. – West Lafayette (USA): Purdue University, 2004. – P. 709.  
URL: <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1708&context=iracc>.
5. Р ИСО 14040-2010. Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Принципы и структура. – М.: Стандартинформ, 2010. – 19 с.
6. ГОСТ Р 27.202-2012 Надежность в технике. Управление надежностью. Стоимость жизненного цикла. – М.: Стандартинформ, 2014 – 16 с.



7. Бром А.Е., Белова О.В., Сиссиньо А. Базовая модель стоимости жизненного цикла энергетического оборудования // Гуманитарный Вестник. – 2013. – № 10(13). – С. 115. DOI: [10.18698/2306-8477-2013-10-115](https://doi.org/10.18698/2306-8477-2013-10-115). EDN: [RGTWOV](https://www.edn.ru/10.18698/2306-8477-2013-10-115)
8. Pump Life Cycle Costs: A Guide to LCC Analysis for Pumping Systems / 2nd Ed. – Parsippany (USA): Hydraulic Institute, 2021. – 212 p.

### References

1. IIR, & Hwang, Y. (October 2016) *Harmonization of Life Cycle Climate Performance Methodology: 32nd Informatory Note on Refrigeration Technologies*. International Institute of Refrigeration (IRR). <https://iifiir.org/en/fridoc/harmonization-of-life-cycle-climate-performance-methodology-139940>
2. Karnaukh, V.V. (2022). Specifics of calculation and prediction of the operation of heat pumps working on fourth generation refrigerants. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and technologies*, 2 (15), 202-215. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0383> [In Russian]
3. ISO (2016). *817:2014. Refrigerants. Designation and safety classification*. International Organization for Standardization.
4. Maykot, R., Weber, G. C. & Maciel, R. A. (2004). Using the TEWI methodology to evaluate alternative refrigeration technologies. In *Proc. International Refrigeration and Air Conditioning Conf.* (paper 709). Purdue University. <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1708&context=iracc>
5. Rosstandart (2010). *R ISO 14040-2010 Ekologicheskij menedzhment. Ocenka zhiznennogo cikla. Principy i struktura* [State Standard R ISO 14040-2010 Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework]. Standartinform [In Russian]
6. Rosstandart (2012). *GOST P 27.202-2012 Nadezhnost' v tekhnike. Upravlenie nadezhnost'yu. Stoimost' zhiznennogo cikla*. [Dependability in technique. Dependability management. Life cycle costing]. Standartinform [In Russian]
7. Brom, A. E., Belova, O. V. & Sissinyo, A. (2013). Basic model of life cycle costing of the power equipment. *Humanities bulletin of BMSTU*, 2, 115. <https://doi.org/10.18698/2306-8477-2013-10-115> [In Russian]
8. HI. (2021). *Pump Life Cycle Costs: A Guide to LCC Analysis for Pumping Systems* (2<sup>nd</sup> ed.). Hydraulic Institute.

### Сведения об авторах

**Карнаух Виктория Викторовна**, д-р. техн. наук, доцент, профессор кафедры холодильной и торговой техники имени Осокина В.В., Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского» (ФГБОУ ВО «ДОННУЭТ»), г. Донецк, e-mail: [karnaukh.vita0629@gmail.com](mailto:karnaukh.vita0629@gmail.com).

**Байда Борис Юрьевич**, ст. преп. кафедры ХТТ ФГБОУ ВО «ДОННУЭТ».

**Приймак Алексей Сергеевич**, ассистент кафедры ХТТ ФГБОУ ВО «ДОННУЭТ».

### Authors about

**Viktoriia Viktorovna Karnaukh**, Dr. of Tech. Sciences, Professor of the Refrigerating and Trade Equipment Department, Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky, e-mail: [karnaukh.vita0629@gmail.com](mailto:karnaukh.vita0629@gmail.com).

**Boris Yuryevich Bayda**, Senior lecturer of the Refrigerating and Trade Equipment Department, Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky.

**Alexey Sergeevich Priymak**, Assistant of the Refrigerating and Trade Equipment Department, Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky.

