

Методики расчета TEWI автотранспортных холодильных систем

Канд. техн. наук **Н.Г.КИРИЛЛОВ**
Военный инженерно-космический
университет

Автотранспортные холодильные системы. В настоящее время в автотранспортных средствах широко используются холодильные системы различного функционального назначения: рефрижераторные установки для хранения и перевозки продуктов питания, климатические установки (автомобильные кондиционеры) для термостатирования салонов транспортных средств, небольшие салонные холодильники для охлаждения напитков и т.д.

Различные цели применения, температурные уровни охлаждения, требуемая холодопроизводительность, режимы эксплуатации и внешние климатические условия определяют широкий диапазон применяемых принципов производства холода и принципиальных схем для их реализации [2]. В авторефрижераторной технике широко распространены не только машинные системы охлаждения на основе парокомпрессионных холодильных агрегатов, но и расходные (безмашинные), в которых в качестве хладагента используют сжиженный природный газ, жидкий азот, сжиженную пропан-бутановую смесь и т.д.

В настоящее время в условиях ужесточения экологических требований к холодильной технике и создания новых озонобезопасных хладагентов становится актуальной работа по совершенствованию методик оценки экологической безопасности холодильной техники, и в частности автотранспортных холодильных систем.

Методика расчета TEWI для авторефрижераторной техники. Тенденции развития транспортной холодильной техники ведущих зарубежных фирм, таких, как THERMO KING, CARRIER и др., после запрета на производство R12 в соответствии с Монреальским протоколом* показывают их стремление к применению в своих холодильных агрегатах новых озонобезопасных хладагентов, например R134a, R404A и т.д. [1, 3]. В то же время ни один из созданных альтернативных хладагентов по эффективности нельзя считать идеальной заменой R12. Более того, значительная часть вновь созданных альтернативных хладагентов решением Киотского протокола (Япония, 1997) была отнесена к категории «парниковых газов», оказывающих значительное влияние на процесс глобального потепления.

В этих условиях для более полного учета энергетических и экологических факторов помимо потенциала глобального потепления (GWP) был введен критерий полного эквивалента глобального потепления — TEWI (Total Equivalent Warming Impact) [6, 7]. Международным институтом холода была предложена методика его расчета, согласно которой при оценке влияния какого-либо рабочего вещества на парниковый эффект необходимо учитывать не только его прямое воздействие на атмосферу Земли (GWP), но и побочный эффект, отражаю-

A technique for the calculation of TEWI for refrigerated transport equipment and for car air conditioning is presented. Principles of improvement of the methods of evaluation of ecological safety of road transport refrigeration systems are stated.

щий энергетическую эффективность холодильного оборудования:

$$TEWI = GWP \cdot M + \alpha \cdot BL, \quad (1)$$

где GWP — потенциал глобального потепления применяемого хладагента;

M — масса утечек хладагента, кг;

α — количество CO_2 , выделяющееся при производстве 1 кВт·ч электроэнергии, кг/(кВт·ч);

B — затраты электроэнергии в течение времени эксплуатации оборудования, кВт;

L — продолжительность эксплуатации оборудования, ч.

Вклад этих составляющих (прямого и косвенного влияния) в TEWI существенно различен. Так, для герметичных систем косвенный вклад в TEWI, который, по существу, определяет энергетическую эффективность холодильной машины, значительно превышает вклад в парниковый эффект от эмиссии хладагентов в атмосферу.

Расчет суммарного эквивалентного воздействия на глобальное потепление достаточно сложен, и в настоящее время методика определения TEWI, представленная в виде вышеуказанной зависимости (1), разработана в основном для стационарных холодильных установок. Как показала практика, использование данной методики для транспортных холодильных систем не учитывает всей совокупности факторов, влияющих на парниковый эффект, и не позволяет в полной мере реально оценить вклад каждой из этих составляющих в TEWI.

На основе результатов исследований, проводимых в Военном инженерно-космическом университете (ВИКУ) по созданию энергохолодильных систем специального назначения, автором была разработана новая методика определения TEWI для авторефрижераторной техники. При создании методики учитывали, что в отличие от стационарных холодильных установок авторефрижераторная техника имеет ряд принципиальных особенностей, влияющих на расчет TEWI. К ним относятся следующие:

- авторефрижераторную технику необходимо рассматривать как целостную систему, состоящую из двигателя автомашины и двигателя компрессорного холодильного агрегата;

- для расчета TEWI авторефрижераторной техники существенное значение имеют вид топлива и тип двигателей, используемых в транспортной холодильной системе, определяющих в итоге состав и концентрацию веществ в отработанных газах двигателей и их влияние на парниковый эффект;

- использование для выработки энергии моторного топлива обуславливает необходимость учета эмиссии в атмосферу паров топлива из баков авторефрижераторной техники при ее заправке и во время эксплуатации;

- при расчете TEWI авторефрижераторной техники необходимо принимать во внимание влияние на экологию испарений широких фракций легких углеводородов (ШФЛУ) при хранении моторного топлива на автозаправочных станциях (АЗС) в резервуарах, эквивалентных по объему бакам авторефрижератора, опорожняемым за определенный срок эксплуатации;

- при эксплуатации авторефрижераторной техники в окружающую атмосферу выделяются также картерные газы, состав которых зависит от вида используемого топлива и типа двигателей;

- для авторефрижераторной техники, в которой хладагентом служат вещества с высоким потенциалом глобального потепления, надежность удержания такого хладагента внутри системы также имеет значение (однако оно носит вторичный характер по отношению к энергопотреблению) и т.д.

Необходимость учета вышеуказанных особенностей при расчете TEWI определяется тем, что на современных авторефрижераторах (в первую очередь на крупнотоннажных) в настоящее время наиболее широко распространены компрессоры, работающие во время движения от собственных двигателей (как правило, дизелей), а во время стоянки — от электродвигателей, питающихся от внешней электросети. Это обеспечивает полную автономность, т.е. отсутствие связи с двигателем автомашины, что позволяет стабильно поддерживать в грузовом объеме требуемый температурный режим. Традиционные холодильные агрегаты авторефрижераторных установок комплектуют, как правило, компрессорами открытого типа с ременным приводом. Потери хладагента обычно достаточно высоки из-за тяжелых условий эксплуатации, использования открытого компрессора с уплотнением вала и гибких соединительных шлангов. Как показывает практика, даже при высоком качестве обслуживания холодильного агрегата потери хладагента в год составляют более 35% заправленной массы.

Отработанные газы двигателей авторефрижераторов содержат значительное количество «парниковых» газов, среди которых CO , CO_2 , C_xH_y и др.

Загрязнение воздушного пространства испарениями моторного топлива происходит при выделении ШФЛУ из резервуаров АЗС, вентиляции газового пространства, неправильной установке дыхательной и предохранительной аппаратуры и по другим причинам. Практика показывает, что среднегодовой объем испарившегося топлива из резервуара объемом 20 м^3 составляет не менее 6000 кг, что приводит не только к потере ценного продукта, но и значительному загрязнению окружающей среды.

Испарение моторного топлива происходит также и в самом авторефрижераторе при работе двигателя и в нерабочем состоянии. Внутренняя полость топливных баков авторефрижераторов всегда сообщается с атмосферой для поддержания давления внутри баков на уровне атмосферного. Это необходимо для нормальной работы

всей системы питания двигателей, но в то же время создает условия для испарения ШФЛУ и загрязнения воздуха парниковыми газами.

В общем виде, исходя из принятого понимания суммарного эквивалентного воздействия на глобальное потепление, уравнение для расчета TEWI авторефрижераторной техники можно представить как сумму выбросов парниковых газов всех видов (рассчитанных в эквиваленте к CO_2), образующихся при эксплуатации этой техники:

$$\text{TEWI} = W_{\text{дв}} + W_{\text{дв.п}} + W_{\text{хл}} + W_{\text{т}} + W_{\text{крт.г}}$$

где $W_{\text{дв}}$ — количество парниковых газов, образующихся при работе двигателя, рассчитанное в эквиваленте к CO_2 ;

$W_{\text{дв.п}}$ — количество парниковых газов, образующихся при работе двигателя привода компрессора и рассчитанных в эквиваленте к CO_2 ;

$W_{\text{хл}}$ — количество упущенного хладагента, рассчитанного в эквиваленте к CO_2 ;

$W_{\text{т}}$ — общее количество парниковых газов, образующихся при хранении моторного топлива и заправке им рефрижератора, рассчитанных в эквиваленте к CO_2 ;

$W_{\text{крт.г}}$ — количество парниковых газов, образующихся в картерах двигателей рефрижератора, рассчитанных в эквиваленте к CO_2 .

Для расчета каждой из составляющих TEWI можно использовать нижеприведенные аналитические выражения.

$$W_{\text{дв}} = B L \sum_{i=1}^n \alpha_i \text{GWP}_i$$

где B — объемный расход топлива, л/ч;

L — продолжительность работы, ч;

α_i — масса i -го парникового газа в выхлопе двигателя, выделившегося при сжигании 1 л топлива, кг/л;

GWP_i — потенциал глобального потепления i -го парникового газа в выхлопе двигателя.

В среднем при сжигании 1 л нефтепродуктов (например, бензина) из окружающей атмосферы извлекается 2,9 кг кислорода, что соответствует 13,7 кг воздуха, а обратно выбрасывается до 140 г диоксида углерода, до 60 г углеводородов (C_xH_y), до 10 г оксидов азота (NO_x), огромное количество полиароматических углеводородов (ПАУ) и других веществ, оказывающих негативное влияние на окружающую среду.

В случае, если компрессор работает не за счет отбора мощности от двигателя рефрижератора, а имеет свой двигатель, необходимо учитывать и его влияние на TEWI.

$$W_{\text{дв.п}} = \beta W_{\text{дв}}$$

где β — коэффициент мощности двигателя привода компрессора холодильного агрегата (для авторефрижераторной техники $\beta = 0,1 \dots 0,2$).

$$W_{\text{хл}} = \text{GWP}_{\text{хл}} \cdot m_{\text{хл}}$$

где $\text{GWP}_{\text{хл}}$ — потенциал глобального потепления хладагента холодильного агрегата; $m_{\text{хл}}$ — масса утечки хладагента при эксплуатации авторефрижераторной установки, кг.

Один из самых трудных моментов в расчете TEWI — определение доли вклада испарений топлива, образу-

шихся при хранении топлива и заправке им двигателей:

$$W_T = W_{\text{хр. АЗС}} + W_{\text{хр. бк}} + W_3,$$

где $W_{\text{хр. АЗС}}$ — количество парниковых газов, образующихся при хранении топлива на автозаправочной станции (АЗС), рассчитанное в эквиваленте к CO_2 ;

$W_{\text{хр. бк}}$ — количество парниковых газов, образующихся при хранении топлива в баках рефрижератора, рассчитанное в эквиваленте к CO_2 ;

W_3 — количество парниковых газов, образующихся при заправке топливом авторефрижератора, рассчитанное в эквиваленте к CO_2 ;

$$W_{\text{хр. АЗС}} = \Pi \sum_{j=1}^n \text{GWP}_j \zeta_j m_{\text{мд}} + \sum_{j=1}^n \text{GWP}_j \zeta_j m_{\text{бд}},$$

где Π — время хранения топлива в резервуарах, ч;

GWP_j — потенциал глобального потепления j -го парникового газа в испарениях топлива при его хранении на АЗС;

ζ_j — доля j -го парникового газа в общей массе испарившегося топлива при его хранении на АЗС;

$m_{\text{мд}}$ — масса испарившегося моторного топлива при «малом» дыхании резервуаров АЗС, кг/ч;

$m_{\text{бд}}$ — масса испарившегося моторного топлива при «больших» дыханиях резервуаров АЗС, кг;

$$m_{\text{мд}} = K_1 V^{2/3} \frac{K_2 \exp(0,039T)}{100} \frac{M}{22,4T},$$

где K_1 и K_2 — коэффициенты, зависящие от свойств моторного топлива;

V — объем резервуара, м^3 ;

M — средняя молекулярная масса паров моторного топлива (нефтепродуктов);

T — температура в газовом пространстве, К.

$$m_{\text{бд}} = 4,3511 \cdot 10^6 \rho p V k_p k_s,$$

где ρ — плотность моторного топлива, $\text{кг}/\text{м}^3$;

p — давление паров топлива, Па;

V — объем резервуара, м^3 ;

k_p — коэффициент оборачиваемости резервуаров;

k_s — поправочный коэффициент, характеризующий свойства хранимого продукта.

Для определения $W_{\text{хр. бк}}$ с учетом постоянного расхода топлива при эксплуатации авторефрижераторной техники можно использовать выражение

$$W_{\text{хр. бк}} = \gamma W_{\text{хр. АЗС}},$$

где γ — коэффициент, учитывающий опорожняемость баков в процессе эксплуатации автомобиля ($\gamma = 0,5$).

Один из источников попадания парниковых газов в атмосферу при эксплуатации авторефрижераторной техники — процесс ее заправки топливом. Для ориентировочных расчетов влияния на TEWI этой составляющей вследствие ее небольшой величины предлагается пользоваться формулой

$$W_{\text{зп}} = m_{\text{зп}} \frac{\sum_{k=1}^n \text{GWP}_k}{N},$$

где $m_{\text{зп}}$ — масса испарившегося топлива в процессе заправки, кг;

GWP_k — потенциал глобального потепления k -го пар-

никового газа в испарениях топлива, образующихся при заправке авторефрижератора;

N — количество компонентов топлива, относящихся к парниковым газам.

$$m_{\text{зп}} = k V_n (p_s/p_r) \rho,$$

где k — коэффициент, учитывающий степень насыщения газового пространства и увеличение объема вытесняемой паровоздушной смеси вследствие ее донасыщения во время наполнения бака;

V_n — объем налитого топлива, м^3 ;

p_s — давление насыщенных паров бензина при температуре, равной температуре окружающего воздуха, Па;

p_r — давление в газовом пространстве при наливке, принимаемое равным атмосферному, Па;

ρ — плотность паров моторного топлива, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Значение $W_{\text{кр. г}}$ при расчете TEWI определяется для каждого конкретного случая и зависит от типа двигателя, типа смазки (мокрая или сухая) и ряда других параметров. В некоторых случаях его вкладом в TEWI можно пренебречь из-за малой величины.

Методика расчета TEWI для автомобильных кондиционеров. В настоящее время за рубежом ежегодно производится до 30 млн автомобильных кондиционеров, входящих в стандартную комплектацию более чем 50 % новых машин. Несмотря на постоянное совершенствование этих систем, автомобильные кондиционеры являются одними из главных источников утечек хладагента в атмосферу. Так, в 1996 г. из произведенных 84 тыс. т R134a основная его часть пошла на покрытие именно этого сектора холодильной техники.

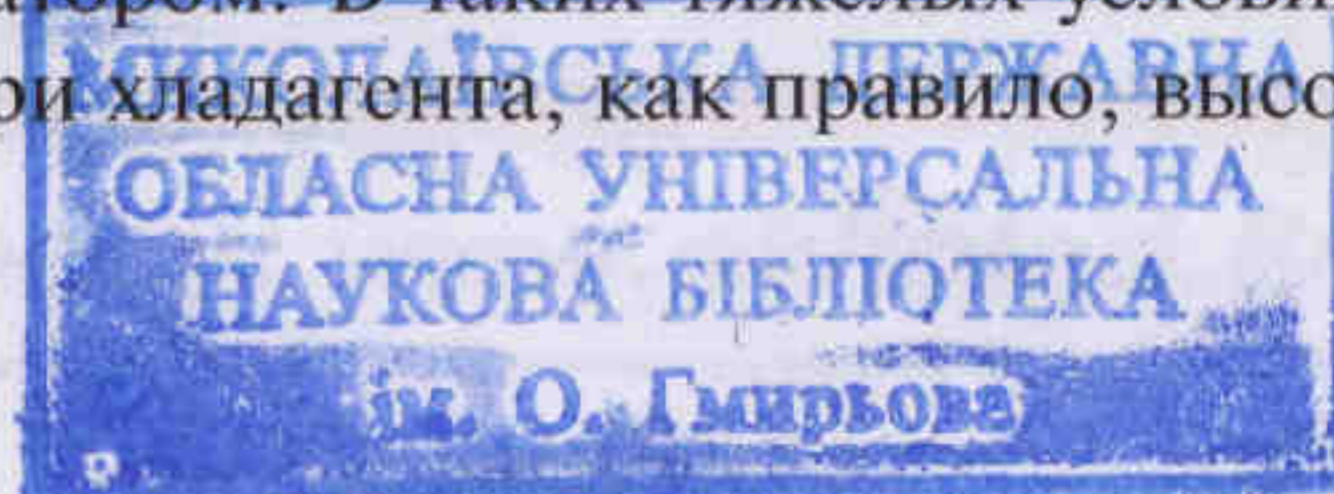
Автомобильные кондиционеры в российских автомобилях даже в настоящее время вещь достаточно экзотическая. Однако с 1995 г. некоторые серийно производимые отечественные автомобили также стали оборудовать кондиционерами. Так, автомобиль «Волга» с 406-м двигателем снабжается кондиционером, поддерживающим температуру в салоне в диапазоне 17...23 °С при температуре наружного воздуха -40...+40 °С. В кондиционер входят: коробка реле управления, электровакуумный клапан, испаритель-отопитель, вакуумный стабилизатор оборотов, фильтр-осушитель, мотор-вентилятор конденсатора, конденсатор, компрессор. Отбор мощности на кондиционер производится от вала двигателя автомобиля.

Основные технические характеристики кондиционера автомобиля «Волга»

Холодопроизводительность, Вт	4500
Хладагент	R134A
Расход охлаждаемого воздуха в салоне, $\text{м}^3/\text{ч}$	500
Потребляемая электрическая мощность постоянного тока напряжением 12 В, Вт, не более	300

Применение автомобильных кондиционеров в отечественном транспорте требует более внимательного изучения их эффективности и экологической безопасности.

В автомобильных кондиционерах с компрессором открытого типа испаритель размещается в одном блоке с нагревателем и вентилятором отопителя, а конденсатор — перед радиатором. В таких тяжелых условиях эксплуатации потери хладагента, как правило, высоки.



Первые оценки TEWI автомобильных кондиционеров базировались исключительно на теоретическом расчете степени энергетической эффективности холодильного агрегата [4, 5].

Однако в последние годы с развитием производства альтернативных видов моторных топлив и их широким применением в автотранспорте в значительной степени изменились подходы к расчету TEWI для автомобильных кондиционеров. При традиционно сохраняемой прямой составляющей, определяемой типом хладагента и массой его эмиссии при эксплуатации кондиционера, особую значимость в косвенной составляющей приобретают вид применяемого топлива, а также характеристики системы хранения и заправки автомобиля топливом.

В общем виде зависимость для определения TEWI автомобильного кондиционера можно представить в следующем виде:

$$TEWI = W_{\text{хл}} + \beta(W_{\text{дв}} + W_{\text{т}}),$$

где $W_{\text{хл}}$ — количество утечек хладагента, рассчитанного в эквиваленте к CO_2 ;

β — коэффициент отбираемой от двигателя автомобиля мощности для привода компрессора кондиционера;

$W_{\text{дв}}$ — количество парниковых газов, образовавшихся при работе двигателя автомобиля, рассчитанное в эквиваленте к CO_2 ;

$W_{\text{т}}$ — общее количество парниковых газов, образующихся при хранении моторного топлива и заправке им автомобиля с кондиционером, рассчитанное в эквиваленте к CO_2 .

Значение β зависит от класса автомобиля, холодопроизводительности кондиционера, климатических условий эксплуатации автомобиля и других факторов. Вследствие этого оно изменяется в широких пределах (от 2 до 10 % мощности двигателя) и составляет соответственно $\beta=0,02\dots0,1$.

$$W_{\text{хл}} = GWP_{\text{хл}} \cdot m_{\text{хл}},$$

где $GWP_{\text{хл}}$ — потенциал глобального потепления хладагента автомобильного кондиционера;

$m_{\text{хл}}$ — масса утечки хладагента при эксплуатации авторефрижераторной установки, кг;

Значения $W_{\text{дв}}$ и $W_{\text{т}}$ вычисляются по уравнениям, аналогичным приведенным выше для авторефрижераторных установок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Как работают гиганты ?//Холодильное дело. 1997. № 3.
2. Кириллов Н.Г. Из опыта создания авторефрижераторной установки с холодильным агрегатом Стирлинга//Вестник Международной академии холода. №1. 2001.
3. Морли Дж. Р. Хладагенты для рефрижераторного транспорта//Холодильная техника. 1999. № 8.
4. Fisher S.K., Fairchild P.P., Hughes P.S. Global warming implications of replacing CFC // ASHRAE J. April 1992.
5. Fisher S.K. Energy and Global Warming Impacts of CFC Alternative Technologies. AFEAS/US DoE. 1991.
6. Lucas L. A new challenge: from the ozone layer to the greenhouse effect //International Congress «Energy efficiency in refrigeration and global warming impact». — Belgium, 1993.
7. 9-th informatory note on CFCs, refrigeration and HCFCs. Int. Inst. of Refrigeration. — Paris, France, 1993.

Министерство образования Российской Федерации
Научный совет РАН по проблеме «Теплофизика и теплоэнергетика»
Санкт-Петербургский государственный университет
низкотемпературных и пищевых технологий
Международная академия холода
Международная академия наук высшей школы
Рабочая группа «Свойства хладагентов и теплоносителей»

Техническая и информационная поддержка:
Издательство «Холодильная техника»

Международная научно-техническая конференция

«ПРИРОДНЫЕ ХОЛОДИЛЬНЫЕ АГЕНТЫ – альтернатива ГЛОБАЛЬНОМУ ПОТЕПЛЕНИЮ»

4 февраля 2003 г.

Предлагаемая тематика докладов и сообщений:

- | | | |
|--|--|--|
| > Протокол Киото – взгляд из России; | пропане, аммиаке и воде; | хладагентов, смеси, процессы теплообмена; |
| > Синтетические холодильные агенты; | > Углекислотные холодильные машины и транспортные системы; | > Компрессоры, смазочные масла; |
| > Хладагент R22 в России и СНГ; | > Воздушные холодильные машины, цикл Стирлинга; | > Экологически безопасные хладоносители, айс-сларри; |
| > Аммиак – стратегический лидер; | > Теплофизические и термодинамические свойства | > Техника безопасности, пожароопасность, токсичность и системы контроля. |
| > Углеводороды в бытовых холодильных приборах; | | |
| > Тепловые насосы на диоксиде углерода, | | |

МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ:

Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, СПбГУНИПТ. Проезд до ст. метро «Владимирская», «Достоевская»

Желающим участвовать в работе конференции необходимо прислать до **20 декабря 2002 г.** заявку по адресу: 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, СПбГУНИПТ, учебно-информационный отдел, Жарикова Н.Б. или кафедра «Теоретические основы тепло-хладотехники», Лаптеву Ю.А.

Организационный взнос не взимается

Регистрация участников – 4 февраля 2002 г. с 9 часов. Начало работы в 10 часов

ЗАЯВКА НА УЧАСТИЕ В КОНФЕРЕНЦИИ

Ф.И.О. _____
Адрес _____
Телефон _____ Факс _____ E-mail _____
Организация, должность _____
Название доклада или сообщения (если планируется) _____

Контактные телефоны: (812) 314-78-61 (Жарикова Н.Б.), (812) 164-30-35 (Лаптев Ю.А.),
Факс: (812) 315-37-78, (812) 315-36-17 (с пометкой «Природа»). **E-mail:** refr@sarft.spb.ru