



ОЦЕНКА ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УТИЛИЗАТОРОВ ТЕПЛОТЫ ОТРАБОТАННЫХ ГАЗОВ В КОГЕНЕРАЦИОННЫХ УСТАНОВКАХ НА БАЗЕ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Горобец В.Г.

Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, г. Киев

Богдан Ю.А.

*Киевская государственная академия водного транспорта
имени гетмана Петра Конашевича-Сагайдачного*

В данной статье рассматривается проблема утилизации теплоты отработанных газов двигателей внутреннего сгорания в когенерационных установках. Приведен эксергетический расчет утилизатора теплоты отработанных газов для двигателя внутреннего сгорания марки 6ЧСП18/22. На основе приведенного расчета определены эксергетические потери и эксергетическая эффективность утилизатора, которые позволяют выполнить комплексную оценку устройства с учетом всех видов потерь.

Ключевые слова: эксергетический анализ, когенерационные установки, двигатели внутреннего сгорания, утилизация теплоты отработанных газов.

Введение. Когенерационные технологии нашли широкое применение в энергетических установках на базе двигателей внутреннего сгорания (ДВС), применение которых позволяет повысить эффективность работы таких установок. Когенерация представляет собой способ синхронной выработки механической (или электрической) и тепловой энергии от первичного источника энергии с одной энергетической установки. При этом для получения тепловой энергии используются вторичные энергоресурсы (ВЭР) ДВС, а именно, теплота отработанных газов, теплота воды системы охлаждения, теплота масла системы смазки, теплота нагретого воздуха системы тербонадува двигателей. Конструктивные схемы исполнения когенерационных установок (КГУ) могут быть различными [1] от которых зависит экономичность и экологичность КГУ в целом. В данной работе рассматривается КГУ на базе ДВС с утилизатором теплоты отработанных газов (ОГ).

Актуальность проблемы. Среди всех ВЭР ДВС отработанные газы имеют наибольший энергетический потенциал, на их долю приходится около 20-40 % от всего количества теплоты выделяемого при сгорании топлива [2, 3]. Использование этого тепла существенно позволяет повысить эффективность КГУ, а также уменьшить негативное влияние ОГ на окружающую среду, связанное с уменьшением выбросов вредных веществ.

Постановка задачи. При традиционном подходе эффективность утилизатора теплоты оценивается с использованием энергетического (первый закон термодинамики) и энтропийного (второй закон термодинамики) методов термодинамического анализа [4]. В указанных подходах не учитываются потери неэнтропийного характера (например, потери на гидравлическое и газодинамическое сопротивление) и применение традиционных методов не позволяет выполнить комплексную оценку устройства в целом, которая учитывает эти факторы.

С учетом вышесказанного целесообразно проводить оценку эффективности утилизатора теплоты с помощью эксергетического метода [5, 7], который базируется на двух законах термодинамики и позволяет оценить степень обратимости термодинамических процессов в утилизаторе теплоты с учетом всех видов энергетических потерь, которые зависят от температурных уровней теплоносителей и параметров состояния окружающей среды.

При расчете эксергетической эффективности утилизаторов теплоты ОГ необходимо принимать во внимание следующие факторы:



1. При значительном охлаждении ОГ уменьшается температурный напор, что приводит к увеличению поверхности нагрева утилизационного устройства, что, в свою очередь, увеличивает газодинамическое сопротивление выпускного тракта.
2. Уровень снижения температуры охлаждения ОГ ограничен порогом, при котором происходит конденсация водяных паров, содержащих компоненты серной кислоты, которые вызывают коррозию выпускного трубопровода.
3. Потери, обусловленные необратимостью процесса теплопередачи.
4. Гидравлические и газодинамические потери.
5. Потери при теплообмене с окружающей средой.
6. Потери за счет теплопроводности вдоль утилизатора (учет неизотермичности поверхности).

Цель работы. Выполнить эксергетический анализ утилизатора теплоты ОГ, определить эксергетическую эффективность утилизатора тепла с последующей его оценкой. На основе проведенного анализа определить основные направления по улучшению эффективности утилизатора тепла ОГ.

Изложение материала исследования. Объектом исследования является утилизатор теплоты ОГ ДВС, который совместно с ДВС марки 6ЧСП18/22 образует КГУ и является отдельным ее модулем. Утилизатор представляет собой кожухотрубный теплообменный аппарат (ТА), охлаждающей средой в котором является пресная вода. Основные характеристики утилизатора и физические параметры теплоносителей приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Основные характеристики утилизатора теплоты ОГ ДВС и физические параметры теплоносителей

Наименование	Обозначение	Значение
Мощность, кВт	Q	49,139
Площадь теплообменной поверхности, м ²	$F_{\text{ПОВ}}$	6,86
Количество газов проходящих через утилизатор, кг/с	G_1	0,1833
Количество пресной воды проходящей по трубкам утилизатора, кг/с	G_2	2,19
Давление ОГ на входе в утилизатор и на выходе из него, МПа	$p'_1; p''_1$	0,5; 0,49939
Температура ОГ на входе в утилизатор и на выход из него, К	$T'_1; T''_1$	673; 433
Давление пресной воды на входе в утилизатор и на выходе из него, МПа	$p'_2; p''_2$	0,2; 0,199181
Температура пресной воды на входе в утилизатор и на выход из него, К	$T'_2; T''_2$	293; 363

Основанием для осуществления эксергетического анализа утилизатора являются материальный и энергетический балансы.

Материальный баланс для утилизатора теплоты ОГ ДВС выглядит следующим образом:

$$m'_1 + m'_2 = m''_1 + m''_2, \quad (1)$$

где m'_1, m''_1 – масса теплоносителя 1 (отработанных газов) на входе и на выходе из ТА соответственно; m'_2, m''_2 – масса теплоносителя 2 (пресная вода) на входе и на выходе из ТА соответственно.

Уравнение теплового баланса для двух теплообменивающихся сред можно записать в виде равенства

$$Q = G_1 c_{p1} (t'_1 - t''_1) \eta = G_2 c_{p2} (t'_2 - t''_2), \quad (2)$$



где G_1 и G_2 – весовые количества ОГ и, соответственно, пресной воды, проходящих через аппарат; c_{p1} и c_{p2} – средняя теплоемкость ОГ и пресной воды; $t'_1 - t''_1$ и $t'_2 - t''_2$ – изменение температур ОГ и пресной воды; η – коэффициент, учитывающий потери тепла в окружающую среду.

Для выполнения эксергетического анализа когенерационной установки на базе ДВС с утилизатором теплоты ОГ ее необходимо разбить на компоненты, условно очерченные контрольной поверхностью, в пределах которой происходят какие-либо изменения с энергией потока [5].

Эксергию потока вещества (теплоносителя), который пересекает неподвижную контрольную поверхность, в общем случае определяют по формуле 3:

$$E = E_k + E_p + E_{ph} + E_{ch} + E_j + \dots, \quad (3)$$

где E_k – кинетическая эксергия; E_p – потенциальная эксергия; E_{ph} – физическая эксергия; E_{ch} – химическая эксергия; E_j – ядерная эксергия.

В данной работе выполняется эксергетический анализ только одного компонента когенерационной установки – утилизатора теплоты ОГ, в котором происходит теплообмен между ОГ и охлаждающей жидкостью при условии, что их химический состав в процессе теплообмена остается без изменений, то есть $E_{ch} = 0$. Кроме того можно пренебречь изменением кинетической энергии потоков теплоносителей (ОГ и пресной воды), так как возникающее в утилизаторе падение давления не приводит к заметному изменению движения теплоносителей. С учетом выше сказанного эксергия потока вещества (теплоносителя) характеризуется только физической составляющей $E = E_{ph}$.

Для составления эксергетического баланса используются следующие понятия: эксергия топлива E_F , эксергия продукта E_p , деструкция эксергии E_D и потери эксергии E_L [1, 6]. Таким образом, эксергетический баланс утилизатора теплоты ОГ ДВС будет иметь следующий вид

$$E_F = E_p + E_D + E_L. \quad (4)$$

Эксергетический баланс исследуемого утилизатора теплоты ОГ ДВС можно представить в виде диаграммы Грассмана-Шаргута рис. 1. На ней сумма физических эксергий теплоносителей E'_{ph1} и E'_{ph2} на входе в утилизатор равна эксергии топлива E_F и изображена в виде заштрихованной области на входе. Уменьшение эксергии связанное с деструкцией E_D (необратимостью процесса теплопередачи) изображено двойной штриховкой. На выходе из утилизатора ширина заштрихованной части соответствует эксергии продукта $E_p = E''_{ph1} + E''_{ph2}$, а ширина выделенной части диаграммы с штриховкой меньшего шага соответствует потерям эксергии E_L .

Согласно материальному балансу в утилизатор входят два теплоносителя (ОГ и пресная вода), сумма физических эксергий которых представляет собой эксергию топлива E_F .

$$E_F = E'_{ph1} + E'_{ph2}, \quad (5)$$

где E'_{ph1} – физическая эксергия ОГ на входе в утилизатор; E'_{ph2} – физическая эксергия пресной воды на входе в утилизатор.

Рассматриваемые теплоносители на выходе из утилизатора теплоты за пределами контрольной поверхности имеют эксергию, которая отличается от эксергии на входе. Сумма эксергий ОГ и пресной воды на выходе из утилизатора представляет собой эксергию продукта E_p :



$$E_p = E''_{ph1} + E''_{ph2}, \quad (6)$$

где E''_{ph1} – физическая эксергия ОГ на выходе из утилизатора; E''_{ph2} – физическая эксергия пресной воды на выходе из утилизатора.

Физическая эксергия теплоносителя определяется по формуле

$$E_{ph} = (H - H_0) - T_0(S - S_0) = \Delta H - T_0\Delta S, \quad (7)$$

где $\Delta H, \Delta S$ – энтальпия и энтропия, отсчитываемые от состояния, определяемого давлением p_0 и температурой T_0 окружающей среды ($p_0 = 101325 \text{ Па}$, $T_0 = 293 \text{ К}$), до состояния, определяемого параметрами p и T .

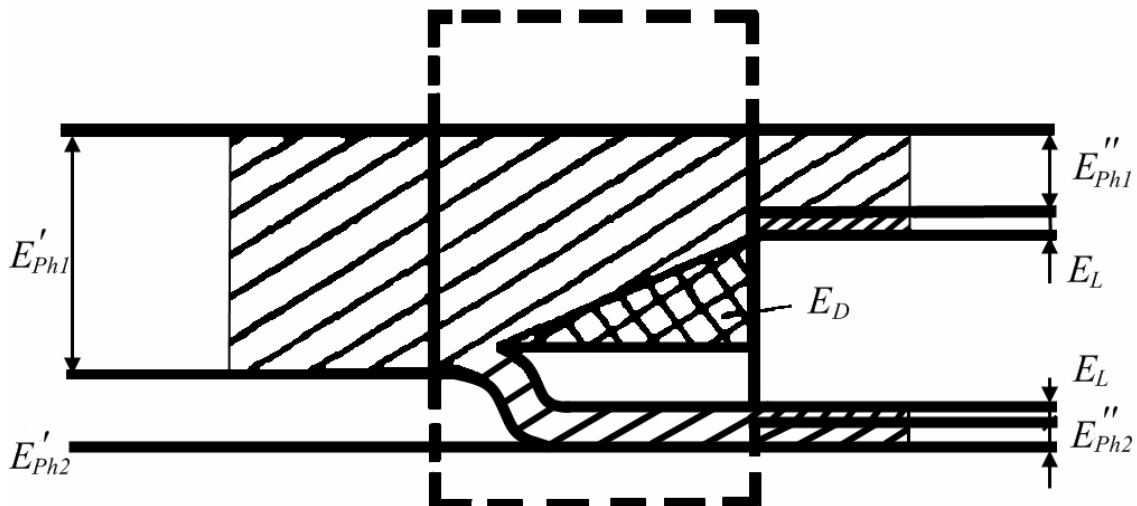


Рисунок 1 – Диаграмма Грассмана-Шарбута для утилизатора теплоты ОГ ДВС

Вследствии необратимости процесса теплопередачи имеют место внутренние потери эксергии в ТА, поэтому $E_F > E_p$.

Разница эксергии топлива E_F и эксергии продукта E_p равна сумме деструкции эксергии E_D (внутренние потери эксергии) и внешних потерь эксергии E_L в ТА.

$$E_F - E_p = E_D + E_L. \quad (8)$$

Расчет деструкции эксергии производится по формуле:

$$E_D = T_0\Delta S_{gen}, \quad (9)$$

где ΔS_{gen} – изменение энтропии системы вследствие необратимых процессов.

Полное изменение энтропии системы при теплообмене в утилизаторе

$$\Delta S_{gen} = \Delta S_2 - \Delta S_1, \quad (10)$$

где ΔS_1 – изменение энтропии теплоносителя 1 (горячего теплоносителя); ΔS_2 – изменение энтропии теплоносителя 2 (холодного теплоносителя).

Для любого теплоносителя изменение энтропии определится в виде:

$$\Delta S = S'' - S', \quad (11)$$

где S' , S'' – энтропии отсчитываемые от состояния, определяемого давлением p_0 и температурой T_0 окружающей среды ($p_0 = 101325 \text{ Па}$, $T_0 = 298,15 \text{ К}$), до состояния, определяемого параметрами p и T .



Помимо деструкции эксергии в утилизаторе теплоты имеют место потери от газодинамического и гидравлического сопротивлений, потери от теплообмена с окружающей средой и потери вызванные теплопроводностью вдоль утилизатора [1, 7]. Последние потери минимальны, поэтому ими можно пренебречь.

Потери от газодинамических сопротивлений равны:

$$E_{z.c.} = T_0 R_{\Gamma} \ln \frac{p_1'}{p_1''}, \quad (12)$$

где $R_{\Gamma} = \frac{R}{\mu_{\Gamma}}$ – газовая постоянная ОГ; p_1', p_1'' – давление ОГ на входе и на выходе из утилизатора.

Потери от гидравлических сопротивлений равны:

$$E_{гид.с.} = \frac{G_2}{\gamma_2} \frac{\Delta p_2}{\eta_H} + T_0 G_2 \frac{\beta \Delta p_2}{\gamma_2}, \quad (13)$$

где G_2 – массовый расход пресной воды; Δp_2 – перепад давления пресной воды в утилизаторе; η_H – коэффициент полезного действия насоса пресной воды; γ_2 – удельная масса пресной воды; β – коэффициент объемного (термического) расширения пресной воды.

Потери от теплообмена с окружающей средой рассчитываются по формуле:

$$E_{окр.с.} = Q \left(1 - \frac{T_0}{T_1} \right), \quad (14)$$

где Q – количество теплоты теряемое в окружающую среду; T_1 – температура теплоносителя 1 (горячего теплоносителя).

Если учесть, что $1 - \frac{T_0}{T_1} = \tau_e$ (τ_e – эксергетическая температурная функция), то выражение 14 приобретает следующий вид:

$$E_{окр.с.} = Q \tau_e, \quad (15)$$

Этот вид потерь связан с потоком эксергии, направленным от аппарата в окружающую среду через тепловую изоляцию.

Эксергетическая эффективность утилизатора ОГ ДВС равна отношению эксергии продукта к эксергии топлива:

$$\eta_{ex} = \frac{E_P}{E_F} = \frac{E_F - E_D - E_{z.c.} - E_{гид.с.} - E_{окр.с.}}{E_F}. \quad (16)$$

Относительная деструкция эксергии утилизатора равна:

$$y_D = \frac{E_D}{E_F}. \quad (17)$$

Относительные потери эксергии утилизатора определяются как:

$$y_L = \frac{E_L}{E_F}. \quad (18)$$

Результаты расчетов приведены в табл. 2.



Таблица 2 – Результаты расчетов исследования

Наименование	Обозначение	Значение
Удельная эксергия ОГ на входе в утилизатор, кДж/кг	e'_{ph1}	1577
Удельная эксергия воды на входе в утилизатор, кДж/кг	e'_{ph2}	0,1
Удельная эксергия ОГ на выходе из утилизатора, кДж/кг	e''_{ph1}	1021
Удельная эксергия воды на выходе из утилизатора, кДж/кг	e''_{ph2}	70
Деструкция эксергии, кДж/кг	e_D	466
Потери эксергии, кДж/кг	e_L	20
Коэф. эксергетической эффективности утилизатора, %	ε	0,69
Относительная деструкция эксергии утилизатора, %	y_D	0,29
Относительные потери эксергии утилизатора, %	y_L	0,0127

Выводы. В работе проведен эксергетический расчет утилизатора теплоты ОГ ДВС (марки 6ЧСП18/22), выполненного в виде кожухотрубного теплообменного аппарата, в котором охлаждающей средой является пресная вода. В результате определены эксергетические потери и эффективность утилизатора теплоты ОГ. Существенное уменьшение эксергии связано с необратимостью процесса теплопередачи (деструкция эксергии). Помимо деструкции имеют место потери эксергии, наибольшей из которых есть потеря, обусловленная несовершенством тепловой изоляции, что приводит к снижению эксергии потоков на выходе из утилизатора. Основным условием необходимым для повышения эффективности утилизатора является обеспечение минимальных потерь в окружающую среду, что можно осуществить с помощью усовершенствования тепловой изоляции и интенсификацией процесса теплопередачи между теплоносителями.

Как видно из табл. 2, где приведены результаты расчета коэффициента эксергетической эффективности утилизатора, получены довольно высокие значения коэффициента, обусловленные тем фактом, что на выходе из утилизатора физическая эксергия ОГ (составляющая продукта) имеет довольно большие значения. Без учета физической эксергии ОГ на выходе из утилизатора коэффициент эксергетической эффективности ε будет очень малым, что указывает на неэффективное использования эксергии ОГ как энергоресурса.

Следовательно, из вышеизложенного необходимо определить пути более эффективного использования эксергии ОГ с минимально возможной деструкцией в осуществляемых при этом процессах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горобець В. Г. Визначення ефективності енергетичних систем для виробництва електричної та теплової енергії методами эксергетичного аналізу / В. Г. Горобець, Б. Х. Драганов // Відновлювальна енергетика. – 2010. – № 3 (22). – С. 5-12.
2. Возницкий И. В. Судовые двигатели внутреннего сгорания : учебник в 2 т. / И. В. Возницкий, А. С. Пунда. – М. : Моркнига, 2008. – Т. 2. – 2008. – 470 с.
3. Самсонов В. И. Двигатели внутреннего сгорания морских судов : учебник для высш. учеб. заведений / В. И. Самсонов, Н. И. Худов. – М. : Транспорт, 1990. – 368 с.
4. Селиверстов В. М. Термодинамика теплопередача и теплообменные аппараты : учебник для институтов водн. трансп. / В. М. Селиверстов, П. И. Бажан. – М. : Транспорт, 1988. – 287 с.
5. Шаргут Я. Эксергия / Ян Шаргут, Ричард Петела; перев. с польск. под ред. В. М. Бородянского. – М. : Энергия, 1968. – 280 с.



6. Тсатсаронис Дж. Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергопреобразующей системы / Джордж Тсатсаронис ; [научн. ред. и перев. с англ. Т. В. Морозюк]. – Одесса : Студия «Негоциант», 2002. – 152 с.

7. Бродянский В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа / Виктор Михайлович Бродянский. – М. : Энергия, 1973. – 296 с.

Горобець В.Г., Богдан Ю.О. ОЦІНКА ЕКСЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ УТИЛІЗАТОРІВ ТЕПЛОТИ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ В КОГЕНЕРАЦІЙНИХ УСТАНОВКАХ НА БАЗІ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

У статті розглядається проблема утилізації теплоти відпрацьованих газів двигунів внутрішнього згоряння в когенераційних установках. Наведено ексергетичний розрахунок утилізатора теплоти відпрацьованих газів двигуна внутрішнього згоряння марки 6ЧСП18/22. На основі наведеного розрахунку визначені ексергетичні втрати й ексергетична ефективність утилізатора, які дозволяють виконати комплексну оцінку устрою з урахуванням всіх видів втрат.

Ключові слова: ексергетичний аналіз, когенераційні установки, двигуни внутрішнього згоряння, утилізація теплоти відпрацьованих газів.

Gorobets V.G., Bogdan Y.A. EVALUATION OF EXERGY EFFICIENCY FOR HEAT UTILIZERS OF EXHAUST GASES IN THE SYSTEM OF CO-GENERATION PLANT BASED ON INTERNAL COMBUSTION ENGINES

The article deals with the problem of utilization of exhaust gases heat of internal combustion engines in the co-generation plants. Exergy calculation for heat utilizers of exhaust gases for internal combustion engine (type 6ЧСП18/22) is presented. On the basis of the given calculation exergy losses and exergy efficiency of the utilizer are defined. These allow executing a complex evaluation of the device taking into account all types of losses.

Keywords: exergy analysis, co-generation plants, internal combustion engines, heat recovery of exhaust gases.