

## **ЕКСЕРГЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ УТИЛІЗАТОРА ТЕПЛОТИ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ КОГЕНЕРАЦІЙНИХ УСТАНОВОК**

***В. Г. Горобець, доктор технічних наук, доцент  
Національний університет біоресурсів і природокористування України  
Ю. О. Богдан, кандидат технічних наук  
Херсонська державна морська академія  
e-mail: gorobetsv@ukr.net***

***Анотація.** Розроблено методику розрахунку, проведено аналіз ексергетичних втрат та визначено ексергетичну ефективність нової конструкції утилізатора теплоти відпрацьованих газів двигуна внутрішнього згоряння когенераційних установок, яка дозволяє оцінити ефективність використання енергетичного потенціалу продуктів згоряння з врахуванням всіх видів втрат. Показано шляхи підвищення ексергетичної ефективності утилізаторів теплоти та покращення екологічних характеристик когенераційних установок.*

***Ключові слова:** ексергетичний аналіз, ексергетичні втрати, ексергетична ефективність, двигун внутрішнього згоряння, утилізатор теплоти, когенераційна установка*

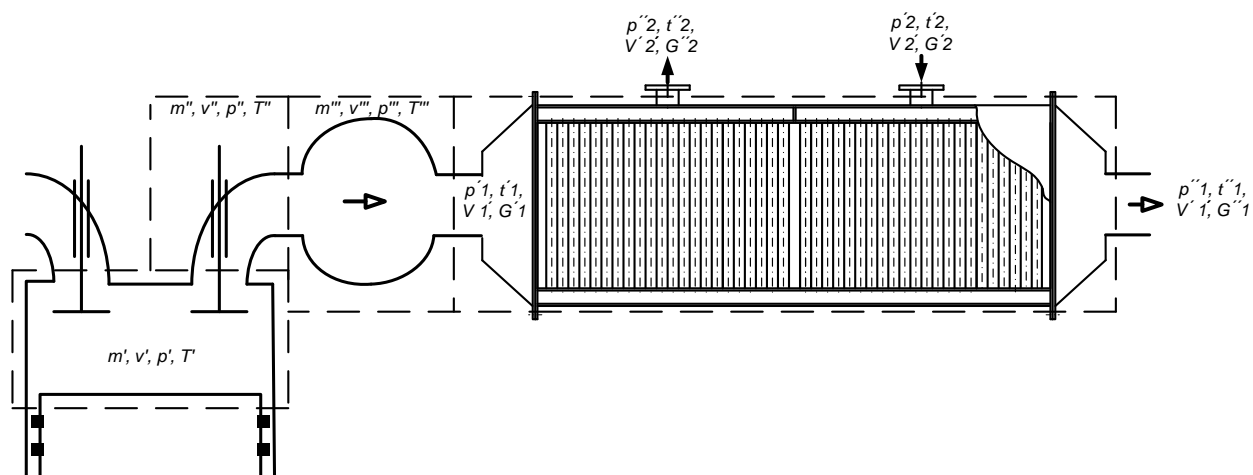
***Актуальність.** Когенераційні установки (КГУ) мають широку область застосування в різних галузях промисловості, в комунальній енергетиці, в агропромисловому комплексі. Наприклад, в сільському господарстві КГУ використовуються як складова біогазових установок для забезпечення електричною і тепловою енергією фермерських господарств, для енергозабезпечення тепличних господарств, пташників, свиноферм та ферм великої рогатої худоби, тощо. Перевагами КГУ є їх високий ККД, який складає 90–95 %, відсутність необхідності прокладання електричних і теплових мереж, широкий діапазон варіювання необхідної електричної та теплової потужності, невеликий термін окупності та інші фактори.*

***Аналіз останніх досліджень та публікацій.** При розробці КГУ одним з найбільш важливих показників ефективності при їх експлуатації є оцінка енергетичних втрат при перетворенні теплоти, що утворюється при спалюванні палив у двигунах внутрішнього згоряння (ДВЗ) і газотурбінних установках*

(ГТУ), у механічну (електричну) і теплову енергію, яка в подальшому використовується для функціонування різних об'єктів – побутових і промислових будівель, ферм, теплиць тощо. Одним із найбільш інформативних методів оцінки цих втрат є ексергетичний аналіз, який дає змогу визначити теплові, механічні, електричні, гідравлічні та інші втрати порівняно з класичним термодинамічним аналізом теплових потоків, який не враховує деякі види втрат, наприклад, гідравлічні втрати [1–4]. У роботі розроблена методика розрахунку, проведений аналіз та розрахунок ексергетичних втрат в теплообміннику утилізаторі відхідних газів (ВГ) ДВЗ КГУ.

**Мета дослідження** – розробка методики розрахунку, проведення ексергетичного аналізу і оцінка ексергетичних втрат в теплообмінному обладнанні когенераційних установок.

**Матеріали та методи дослідження.** Розглянемо складові частини випускного тракту КГУ на базі ДВЗ, схема якого представлена на рис. 1.



**Рис. 1. Схема випускного тракту КГУ на базі ДВЗ**

Випускний тракт ДВЗ складається з таких компонентів: газовідвідні канали випускних клапанів (компонент *b*) і колектора з патрубками (компонент *c*), які кріпляться до блоку або до кришок циліндрів, а також утилізатора теплоти відпрацьованих газів (компонент *d*).

Окремим модулем газовипускного тракту КГУ являється компонент  $d$  – утилізатор теплоти ВГ, який представляє собою кожухотрубний теплообмінний апарат (ТА), охолоджуючим середовищем в якому являється вода. В якості об'єкту дослідження для розрахунків вибрано теплообмінний апарат нової конструкції, запропонований в [5,6], який відрізняється від відомих конструкцій теплообмінників з шаховим або коридорним розташуванням трубок тим, що використовується пучок труб малого діаметра з компактним їх розташуванням. Вказаний теплообмінний апарат має ряд переваг порівняно з відомими аналогами – невеликі габарити, малу масу, менші гідравлічні втрати. Основні характеристики утилізатора і фізичні параметри теплоносіїв наведені в табл. 1.

### 1. Основні характеристики утилізатора теплоти ВГ ДВЗ і фізичні параметри теплоносіїв

Найменування	Позначення	Значення
Потужність, $kW$	$Q_{HE}$	49,139
Площа теплообмінної поверхні, $m^2$	$F_S$	6,86
Кількість газів, що проходять через утилізатор, $kg/s$	$G_{exhaust}$	0,1833
Кількість води, що проходить трубками утилізатора, $kg/s$	$G_{water}$	2,19
Тиск ВГ на вході в утилізатор і на виході з нього, $MPa$	$P'_{exhaust}; P''_{exhaust}$	0,5; 0,49939
Температура ВГ на вході в утилізатор і на виході з нього, $K$	$T'_{exhaust}; T''_{exhaust}$	673; 433
Тиск води на вході в утилізатор і на виході з нього, $MPa$	$P'_{water}; P''_{water}$	0,2; 0,199181
Температура води на вході в утилізатор і на виході з нього, $K$	$T'_{water}; T''_{water}$	293; 363

При розрахунку ексергетичної ефективності утилізаторів теплоти ВГ необхідно приймати до уваги такі фактори:

1. При значному охолодженні ВГ зменшується температурний напір, що призводить до збільшення поверхні нагрівання утилізаційного пристрою, що, в свою чергу, збільшує газодинамічний опір випускного тракту.

2. Рівень зниження температури охолодження ВГ обмежений порогом, при якому відбувається конденсація водяної пари, що містять компоненти сірчаної кислоти, які викликають корозію випускного трубопроводу.
3. Втрати, зумовлені необоротністю процесу теплопередачі.
4. Гідрравлічні та газодинамічні втрати.
5. Втрати при теплообміні з навколишнім середовищем.
6. Втрати за рахунок теплопровідності вздовж утилізатора (врахування неізотермічності поверхонь).

Матеріальний баланс для утилізатора теплоти ВГ ДВС виглядає так:

$$m_{exhaust}''' + m_{water}' = m_{exhaust}'' + m_{water}'' \quad (1)$$

де  $m_{exhaust}'''$ ,  $m_{exhaust}''$  – маса відпрацьованих газів на вході і виході з ТА відповідно;  $m_{water}'$ ,  $m_{water}''$  – маса води на вході і виході з ТА відповідно.

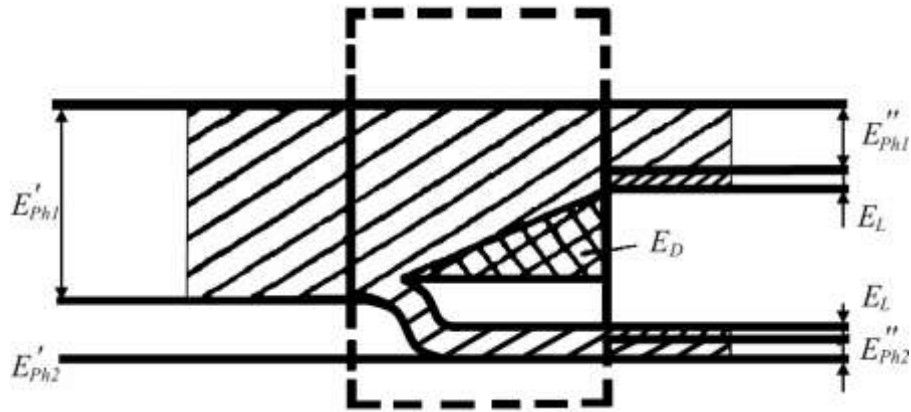
Рівняння теплового балансу для двох теплообмінних середовищ можна записати у вигляді рівності

$$Q = G_{exhaust} c_{p,exhaust} (t_{exhaust}''' - t_{exhaust}'') \eta = G_{water} c_{p,water} (t_{water}' - t_{water}''), \quad (2)$$

де  $G_{exhaust}$  і  $G_{water}$  – вагові кількості ВГ і води, що проходять через апарат відповідно;  $c_{p,exhaust}$  і  $c_{p,water}$  – середня теплоємність ВГ і води;  $t_{exhaust}''' - t_{exhaust}''$  і  $t_{water}' - t_{water}''$  – зміна температур ВГ і води;  $\eta$  – коефіцієнт, що враховує втрати теплоти в навколишнє середовище.

Теплообмін між ВГ та охолоджувальною рідиною відбувається за умови, що їх хімічний склад в процесі теплообміну залишається без змін, тобто  $E_{ch} = 0$ . Крім того, можна знехтувати зміною кінетичної енергії потоків теплоносіїв (ВГ і води), оскільки падіння тиску, що виникає в утилізаторі, не призводить до помітної зміни руху теплоносіїв. З урахуванням вищесказаного ексергія потоку речовини (теплоносія) характеризується тільки фізичною складовою  $E = E_{ph}$ .

Ексергетичний баланс компонента  $d$  можна представити у вигляді діаграми Грассмана–Шаргута (рис. 2). На цій діаграмі сума фізичних ексергій



**Рис. 2. Діаграма Грассмана–Шаргута для утилізатора теплоти ВГ ДВЗ**

теплоносіїв  $E''_{ph,exhaust}$  і  $E'_{ph,water}$  на вході в утилізатор дорівнює ексергії палива  $E_{F,d} = E''_{ph,exhaust} + E'_{ph,water}$  і зображена вигляді заштрихованої області на вході. Зменшення ексергії пов'язане з деструкцією  $E_{D,d}$  (необоротністю процесу теплопередачі) зображено областю з подвійним штрихуванням. На виході з утилізатора ширина заштрихованої частини відповідає ексергії продукту  $E_{P,d} = E''_{ph,exhaust} + E'_{ph,water}$ , а ширина виділеної частини діаграми з штрихуванням меншого кроку відповідає втратам ексергії  $E_{L,d}$ .

Фізична ексергія теплоносія визначається за формулою

$$e_{ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) = \Delta h - T_0 \Delta s, \quad (3)$$

де  $\Delta h, \Delta s$  – ентальпія і ентропія, які відраховуються від стану, що визначається тиском  $p_0$  і температурою  $T_0$  навколишнього середовища, до існуючого стану.

Внаслідок незворотності процесу теплопередачі мають місце внутрішні втрати ексергії в ТА, тому  $E_{F,d} > E_{P,d}$ .

Різниця ексергії палива  $E_{F,d}$  і ексергії продукту  $E_{P,d}$  дорівнює сумі деструкції ексергії  $E_{D,d}$  (внутрішні втрати ексергії) і зовнішніх втрат ексергії  $E_{L,d}$  в ТА

$$E_{F,d} - E_{P,d} = E_{D,d} + E_{L,d} \quad (4)$$

Розрахунок деструкції ексергії здійснюється за формулою

$$E_D = T_0 \Delta S_{gen}, \quad (5)$$

де  $\Delta S_{gen}$  – зміна ентропії системи внаслідок незворотних процесів.

Повна зміна ентропії системи при теплообміні в утилізаторі

$$\Delta S_{gen} = \Delta S_2 - \Delta S_1, \quad (6)$$

де  $\Delta S_1$  – зміна ентропії теплоносія 1 (гарячого теплоносія);  $\Delta S_2$  – зміна ентропії теплоносія 2 (холодного теплоносія).

Для будь-якого теплоносія зміна ентропії визначиться у вигляді

$$\Delta S = S'' - S', \quad (7)$$

де  $S'$ ,  $S''$  – ентропії, відлічувані від стану, що визначається тиском  $p_0$  і температурою  $T_0$  навколишнього середовища ( $p_0 = 101325 \text{ Па}$ ,  $T_0 = 298,15 \text{ К}$ ), до стану, що визначається параметрами  $p$  і  $T$ .

Крім деструкції ексергії в утилізаторі теплоти мають місце втрати від газодинамічного і гідравлічного опору, втрати від теплообміну з навколишнім середовищем і втрати викликані теплопровідністю уздовж утилізатора [7]. Останні втрати мінімальні, тому ними можна знехтувати.

Втрати від газодинамічних опорів рівні

$$E_{g.r..d} = T_0 R_{exhaust} \ln \frac{p_{exhaust}'''}{p_{exhaust}'}, \quad (8)$$

де  $R_{exhaust} = \frac{R}{\mu_{exhaust}}$  – газова постійна ВГ;  $p_{exhaust}''', p_{exhaust}'$  – тиск ВГ на вході і на виході з утилізатора.

Втрати від гідравлічних опорів рівні

$$E_{h.r..d} = \frac{G_{water}}{\gamma_{water}} \frac{\Delta p_{water}}{\eta_p} + T_0 G_{water} \frac{\beta \Delta p_{water}}{\gamma_{water}}, \quad (9)$$

де  $G_{water}$  – масова витрата води;  $\Delta p_{water}$  – перепад тиску води в утилізаторі;  $\eta_p$  – коефіцієнт корисної дії водяного насоса;  $\gamma_{water}$  – питома маса води;  $\beta$  – коефіцієнт об'ємного (термічного) розширення води.

Втрати від теплообміну з навколишнім середовищем розраховуються за формулою

$$E_{env,d} = Q \left( 1 - \frac{T_0}{T_{exhaust}} \right), \quad (10)$$

де  $Q$  – кількість теплоти, що втрачається в навколишнє середовище;  $T_{exhaust}$  – температура гарячого теплоносія. Якщо врахувати, що  $1 - \frac{T_0}{T_{exhaust}} = \tau_e$  ( $\tau_e$  – ексергетична температурна функція), то вираз (10) набуває вигляду

$$E_{env,d} = Q \tau_e \quad (11)$$

Цей вид втрат пов'язаний з потоком ексергії, спрямованим від апарату в навколишнє середовище через теплову ізоляцію.

Також до втрат відноситься та частина ексергії, яка виходить з теплообмінного апарату з відхідними газами.

Ексергетична ефективність утилізатора ОГ ДВС дорівнює відношенню ексергії продукту до ексергії палива

$$\varepsilon_d = \frac{E_{P,d}}{E_{F,d}} = \frac{E_{F,d} - E_{D,d} - E_{g.r.,d} - E_{h.r.,d} - E_{env,d}}{E_{F,d}} \quad (12)$$

Відносна деструкція ексергії і відносні втрати ексергії утилізатора розраховуються за формулами

$$y_{D,k} = \frac{E_{D,k}}{E_{F,tot}} \quad (13)$$

Для компонента  $d$  знаходимо відносну деструкцію ексергії

$$y_D = \frac{E_D}{E_F} \quad (14)$$

Відносні втрати ексергії утилізатора визначаються як

$$y_L = \frac{E_L}{E_F} \quad (15)$$

**Результати дослідження їх обговорення** Базуючись на приведеній вище методиці розрахунків ексергетичних втрат та ефективності утилізатора теплоти ВГ ДВЗ когенераційної установки, були проведені розрахунки втрат ексергії у всіх трактах теплообмінника. Результати розрахунків ексергетичної ефективності утилізатора теплоти ВГ наведені в табл. 2.

## 2. Результати ексергетичних розрахунків утилізатора теплоти ВГ

Найменування	Позначення	Значення
Питома ексергія ВГ на вході в утилізатор, кДж/кг	$e'_{ph1}$	1577
Питома ексергія води на вході в утилізатор, кДж/кг	$e'_{ph2}$	0,1
Питома ексергія ВГ на виході з утилізатора, кДж/кг	$e''_{ph1}$	1021
Питома ексергія води на виході з утилізатора, кДж/кг	$e''_{ph2}$	70
Деструкція ексергії, кДж/кг	$e_D$	466
Втрати ексергії, кДж/кг	$e_L$	20
Коефіцієнт ексергетичної ефективності утилізатора, %	$\varepsilon$	0,69
Відносна деструкція ексергії утилізатора, %	$y_D$	0,29
Відносні втрати ексергії утилізатора, %	$y_L$	0,0127

У результаті розрахунків отримано величину ексергетичних втрат та коефіцієнт ексергетичної ефективності утилізатора теплоти відпрацьованих газів ДВЗ КУ, який складає 0,69. Як показує аналіз проведених розрахунків основні напрямки зниження ексергетичних втрат пов'язані із зменшенням втрат в навколишнє середовище. Перспективним напрямком покращення ексергетичної ефективності утилізатора теплоти відпрацьованих газів являється розробка ТА конденсаційного типу. У таких ТА температура ВГ, які викидаються в навколишнє середовище, суттєво знижується за рахунок використання теплоти конденсації водяних парів, що міститься у ВГ. При цьому покращуються екологічні характеристики КУ внаслідок зменшення викидів шкідливих компонент продуктів згорання в навколишнє середовище.

### Висновки і перспективи подальших досліджень.

1. Розроблена методика та проведені розрахунки ексергетичних втрат для теплообмінників утилізаторів відхідних газів двигунів внутрішнього згорання когенераційних установок.



2. Знайдено ексергетичну ефективність теплообмінного апарату нової конструкції та визначено основні шляхи підвищення цієї ефективності.

### Список використаних джерел

1. Шаргут Я. Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела / Пер. с польск. под ред. В.М. Бродянского. – М.: Энергия, 1968. – 280 с.
2. Бродянский В.М. Эксергетический метод и его приложения / В.М. Бродянский, В. Фратшнер, К. Михалек. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
3. Тсатсаронис Дж. Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергопреобразующей системы / Под ред. и пер. с англ. Т.В. Морозюк. – Одесса: Студия «Негоциант», 2002. – 152 с.
4. Bejan A. Advanced engineering thermodynamics / A. Bejan. – New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2006. – 880 p.
5. Горобець В.Г. Експериментальне дослідження теплообмінного апарату нової конструкції / В.Г. Горобець, В.І. Троханяк, Ю.О. Богдан // Науковий журнал «Енергетика і автоматика». – К.: ВЦ НУБіП України, 2015, №4 (26). – С. 191–196.
6. Пат. 104559 Україна, МПК F 28 D 7/00. Теплообмінний апарат / Горобець В.Г., Богдан Ю.О.; винахідники і власники Горобець В. Г., Богдан Ю. О. – № а 201303816; дата подання заявки 27.03.2013; дата публ. 10.02.2014, Бюл. № 3.
7. Gorobets V.G. Heat transfer in a non–isothermal extended surfaces / V.G. Gorobets – К.: Компринт, 2014. – 377 с.

### References

1. Shargut, Ja. (1968). Eksergija [Exergy]. Per. s polskogo V.M. Brodjanskogo. Moscow. Energija, 280.
2. Brodjanskiy, V.M. (1988). Eksergeticheskiy metod i jego prilozhenija [Exergy method and its attachments]. Moscow. Energoatomizdat, 288.
3. Tsatsaronis, J. Vzaimodeistviye termodinamiki i ekonomiki dlja minimizitsii stoimisti energopreobrazujuchey sistemi [Interaction of thermodynamics and economics to minimize the cost of an energy-transforming system]. Pod red. i per. s angl. T.V. Morozjuk. Odessa. Studija “Negotsiant”, 152.
4. Bejan, A. (2006). Advanced engineering thermodynamics. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 880.
5. Gorobets, V.G. , Trohanjak, V.I., Bogdan, Ju.O. (2015). Eksperimentalne doslidzhennja teploobminnogo aparata novoi konstruktsii [Experimental research of heat apparatus of new construction]. Naukoviy zhurnal “Energetika i avtomatika”, 4 (26), 191–196.
6. Patent 104559 Ukraine, MPK F 28 D 7/00. Teploobminniy aparat [Heat apparatus] Gorobets V.G., Bogdan Ju.O. № а 201303816; data podannja zajavki 27.03.2013; data publ. 10.02.2014, Bul. № 3.

7. Gorobets, V.G. (2014). Heat transfer in a non–isothermal extended surfaces. Kiev: Comprint, 377.

## **ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УТИЛИЗАТОРОВ ТЕПЛОТЫ ОТРАБОТАННЫХ ГАЗОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ КОГЕНЕРАЦИОННЫХ УСТАНОВОК**

***В. Г. Горобец, Ю. А. Богдан***

**Аннотация.** *Разработана методика расчета, проведен анализ эксергетических потерь и определена эксергетическая эффективность новой конструкции утилизатора теплоты отработанных газов двигателя внутреннего сгорания когенерационных установок, которая позволяет оценить эффективность использования энергетического потенциала продуктов сгорания с учетом всех видов потерь. Показаны пути повышения эксергетической эффективности утилизаторов теплоты и улучшения экологических характеристик когенерационных установок.*

**Ключевые слова:** *эксергетический анализ, эксергетические потери, эксергетическая эффективность, двигатель внутреннего сгорания, утилизатор теплоты, когенерационная установка*

## **EXERGETIC ANALYSIS OF HEAT UTILIZERS OF WORKED GASES OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES OF COGENERATION PLANTS**

***V. Gorobets, Yu. Bogdan***

**Abstract.** *A calculation procedure has been developed, an analysis of exergic losses has been carried out and the exergic efficiency of the new design of the heat recovery engine for the exhaust gases of the internal combustion engine of cogeneration units has been determined. This allows to estimate the efficiency of the use of the energy potential of combustion products taking into account all types of losses. The ways of increasing the exergy efficiency of heat recovery heaters and improving the ecological characteristics of cogeneration plants are shown.*

**Key words:** *exergic analysis, exergy losses, exergy efficiency, internal combustion engine, heat recovery boiler, cogeneration unit*