

3. Електропривод сільськогосподарських машин, агрегатів та потокових ліній / [Жулай Є.Л., Зайцев Б.В., Лавріненко Ю.М. та ін.]; за ред. Є.Л. Жулая. – К.: Вища освіта, 2001. – 288 с.

4. Механізація та автоматизація у тваринництві і птахівництві / [Марченко О.С., Дацішин О.В., Лавріненко Ю.М. та ін.]; за ред. О.С. Марченка. – К.: Урожай, 1995. – 416 с.

*Проведено дослідження впливу частоти тока на кутову швидкість, технологічні та енергетичні характеристики насосів. Встановлено залежності продуктивності, тиску, потужності насосів та удільного витрату електроенергії від частоти тока.*

**Насос, електропривод, частота тока, продуктивність, тиск, потужність насоса, удільний витрат електроенергії.**

*The effect of frequency on the current angular speed, technological and energy characteristics of pumps are carried out. The dependences of capacity, pressure, pump power and specific energy consumption from the current frequency are established.*

**Pump, electric drive, frequency, capacity, pressure, pump capacity, specific energy consumption.**

УДК 621.43.016.7

## **МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЕКСЕРГЕТИЧНИХ ВТРАТ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ У ВИПУСКНОМУ ТРАКТІ ПОРШНЕВИХ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ**

**В. Г. Горобець, доктор технічних наук  
Національний університет біоресурсів  
і природокористування України  
Ю. О. Богдан, аспірант\***

**Київська державна академія водного транспорту  
ім. гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного**

*Розроблено методику для визначення ексергетичних втрат, ексергетичної ефективності та ексергетичних критеріїв випускного тракту двигунів внутрішнього згорання, яка дозволяє оцінити ефективність проходження відпрацьованих газів газовим трактом з врахуванням всіх видів втрат.*

**Ексергетичний аналіз, ексергетичні втрати, ексергетична ефективність, ексергетичні критерії, випускний тракт, двигун внутрішнього згорання.**

---

\* Науковий керівник – доктор технічних наук В.Г. Горобець

© В. Г. Горобець, Ю. О. Богдан, 2014

Одним із шляхів енергозбереження при проектуванні когенераційних установок середньої і малої потужності є повне і раціональне використання енергії відпрацьованих газів двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ). Якщо взяти до уваги тепловий баланс двигуна [2, 4], то найбільшими серед теплових втрат є втрати з відпрацьованими газами (ВГ). На їх частку припадає близько 30 % всієї теплоти, що виділяється при згорянні палива. При цьому повна утилізація теплоти ВГ дає змогу значно підвищити ефективність двигуна.

При русі ВГ від циліндра до виходу з випускного колектора або при транспортуванні газів до входу в газову турбіну чи утилізаційний теплообмінний апарат ВГ зазнають втрати енергії, величина яких безпосередньо впливає на ступінь повного використання їх енергії. При цьому є необхідність у визначенні цих втрат. Одним із методів термодинамічного аналізу, який набуває все більшого поширення нині є ексергетичний аналіз. Завдяки такому аналізу можна виконати комплексну оцінку як для одного компонента, так і для сукупності досліджуваних компонентів двигуна з врахуванням усіх видів втрат.

**Мета досліджень** – розробка методики ексергетичного аналізу та визначення втрат енергії ВГ у випускному тракті ДВЗ.

**Матеріали та методика досліджень.** Досліджуваною ділянкою ДВЗ є його випускний тракт, в який входять такі компоненти: газовідвідні канали випускних клапанів (вікна) (компонент *a*) і колектор з патрубками (компонент *b*), які кріпляться до блока чи до кришок циліндрів. Особливості та вимоги до їх конструкції наведено в [1].

Дослідження базується на ексергетичному методі термодинамічного аналізу.

Для проведення оцінки енергетичних втрат на вказаній ділянці необхідно враховувати такі фактори та складові наявних втрат.

1. Робота ДВЗ має циклічний характер, при якому відбуваються неперервні динамічні зміни параметрів потоку на вході у випускний тракт і на виході з нього, що ускладнює здійснення ексергетичного аналізу.

2. Втрати на дроселювання потоку ВГ у випускних клапанах (вікнах).

3. Втрати, пов'язані з розширенням ВГ у випускному колекторі.

4. Втрати, пов'язані з газодинамічним опором випускного колектора.

5. Втрати теплоти у навколишнє середовище через поверхню випускного тракту.

З метою спрощення аналізу приймається, що потік газів у випускному тракті є стаціонарним.

При розрахунках слід враховувати кількість газовипускних клапанів (вікон) у циліндрі. Якщо таких клапанів є декілька, то сума ексергій на вході в компонент, що розглядається, буде дорівнювати сумі ексергій на виході з нього. Також необхідно враховувати кількість циліндрів двигуна та порядок їх роботи, що важливо для визначення витрат ВГ у газовипускному тракті.

В основі ексергетичного аналізу лежить матеріальний та енергетичний баланси. Враховуючи, що у випускному тракті корисна робота ВГ не

виконується ( $\Delta W = 0$ ), відсутні зміни кількості ВГ та немає додаткового підведення маси ВГ, можна записати:

$$m' = m'' = m''' = m = const, \quad (1)$$

де  $m'$  – маса ВГ на виході з циліндра, кг;  $m''$  – маса ВГ на виході з каналу клапана (вікна), кг;  $m'''$  – маса ВГ на виході з колектора, кг.

Для потоку ВГ рівняння першого закону термодинаміки в загальному вигляді запишеться так:

$$\Delta Q = \Delta U + \frac{\Delta g^2}{2} + mg\Delta h + \Delta p\Delta V + \Delta W \quad (2)$$

При цьому зміною зовнішньої потенціальної енергії можна знехтувати  $mg\Delta h = 0$ . Враховуючи, що  $\Delta U + \Delta p\Delta V = \Delta H$ , рівняння (2) приймає вигляд:

$$\Delta Q = \Delta H + \frac{\Delta g^2}{2} \quad (3)$$

Для нашого випадку енергетичний баланс для компонента *a* може бути представлений у вигляді співвідношення:

$$Q_a = (H'_a - H''_a) + \frac{m g_a'^2 - m g_a''^2}{2} - Q_{\text{врати.а}}, \quad (4)$$

де  $Q_a$  – теплота ВГ на виході з циліндра, Дж;  $H'_a$  – ентальпія ВГ на виході з циліндра, Дж;  $H''_a$  – ентальпія ВГ на виході з каналу випускного клапана (вікна), Дж;  $g'_a$  – швидкість ВГ на вході в канал випускного клапана (вікна), м/с;  $g''_a$  – швидкість ВГ на виході з каналу випускного клапана (вікна), м/с;  $Q_{\text{врати.а}}$  – втрати теплоти в навколишнє середовище, Дж.

Енергетичний баланс для компонента *b* може бути записаний у вигляді:

$$Q_b = (H''_b - H'''_b) + \frac{m g_b''^2 - m g_b'''^2}{2} - Q_{\text{врати.б}}, \quad (5)$$

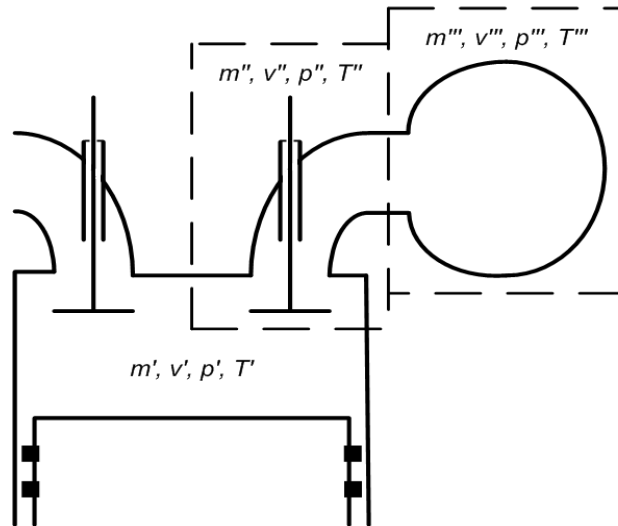
де  $Q_b$  – теплота ВГ на виході з каналу випускного клапана (вікна), Дж;  $H''_b$  – ентальпія ВГ на виході з каналу випускного клапана (вікна), Дж;  $H'''_b$  – ентальпія ВГ на виході з колектора, Дж;  $g_b''$  – швидкість ВГ на виході з каналу випускного клапана (вікна), м/с;  $g_b'''$  – швидкість ВГ на виході з колектора, м/с;  $Q_{\text{врати.б}}$  – втрати теплоти у навколишнє середовище, Дж.

Досліджувані компоненти випускного тракту умовно замикаються контрольною поверхнею (рисунок).

Ексергія потоку речовини (ВГ), яка перетинає нерухому контрольну поверхню, в загальному випадку визначається за методикою, наведеною в джерелі [4]. Для нашого випадку можна записати:

$$E = E_k + E_{ph}, \quad (6)$$

де  $E^k$  – кінетична ексергія, Дж;  $E^{ph}$  – фізична ексергія, Дж.



**Розрахункова схема випускного тракту ДВЗ**

При підрахунку ексергетичного балансу компонентів використовують такі поняття: ексергія палива  $E_F$ , ексергія продукту  $E_P$ , деструкція ексергії  $E_D$  і втрати ексергії  $E_L$  [4, 5]. Таким чином, у загальному вигляді ексергетичний баланс запишемо у формі:  $E_F = E_P + E_D + E_L$ .

З врахуванням виразів (1), (4)–(6) ексергетичний баланс для компонентів випускного тракту набуває вигляду:

- для компонента *a*

$$E'_{k,a} + E'_{ph,a} = E''_{k,a} + E''_{ph,a} + E_{D,a} + E_{L,a}, \quad (7)$$

де  $E'_{k,a} + E'_{ph,a} = E_{F,a}$  – сума кінетичної і фізичної ексергії на вході в компонент *a* (ексергія палива);  $E''_{k,a} + E''_{ph,a} = E_{P,a}$  – сума кінетичної і фізичної ексергії на виході з компонента *a* (ексергія продукту);  $E_{D,a}$  – деструкція ексергії в компоненті *a*;  $E_{L,a}$  – втрати ексергії в компоненті *a*;

- для компонента *b*

$$E''_{k,b} + E''_{ph,b} = E'''_{k,b} + E'''_{ph,b} + E_{D,b} + E_{L,b}, \quad (8)$$

де  $E''_{k,b} + E''_{ph,b} = E_{F,b} = E_{P,a}$  – сума кінетичної і фізичної ексергії на вході в компонент *b*;  $E'''_{k,b} + E'''_{ph,b} = E_{P,b}$  – сума кінетичної і фізичної ексергії на виході з компонента *b*;  $E_{D,b}$  – деструкція ексергії в компоненті *b*;  $E_{L,b}$  – втрати ексергії в компоненті *b*.

Фізична ексергія ВГ визначається за формулою:

$$E_{ph} = (H - H_0) - T_0(S - S_0) = \Delta H - T_0 \Delta S, \quad (9)$$

де  $\Delta H, \Delta S$  – ентальпія та ентропія, що відраховуються від стану, який визначається при тиску  $p_0$  і температурі  $T_0$  навколишнього середовища ( $p_0 = 101325$  Па,  $T_0 = 293$  К), до стану, який визначається параметрами  $p$  і  $T$ .

Кінетична ексергія ВГ визначається за формулою:

$$E_k = \frac{m \mathcal{G}^2}{2}, \quad (10)$$

де  $m$  – маса ВГ у газовипускному тракті, кг;  $\mathcal{G}$  – швидкість ВГ у компоненті випускного тракту, м/с.

Внаслідок необоротності процесу дроселювання в компоненті  $a$  і розширення ВГ в компоненті  $b$  у них мають місце внутрішні втрати ексергії. Як наслідок для компонентів  $a$  і  $b$  відповідно будуть виконуватись нерівності  $E_{F,a} > E_{P,a}$ ,  $E_{F,b} > E_{P,b}$ .

Деструкція ексергії визначається за формулою:

$$E_D = T_0 \Delta S_{\text{компон.}}, \quad (11)$$

де  $\Delta S_{\text{компон.}}$  – зміна ентропії ВГ в компоненті внаслідок необоротних процесів.

Для ВГ зміна ентропії у компоненті визначиться за формулою:

$$\Delta S_{\text{компон.}a} = S - S_0, \quad (12)$$

де  $S$ ,  $S_0$  – відповідно ентропії стану ВГ при параметрах  $p$  і  $T$  та стану, який визначається тиском  $p_0$  і температурою  $T_0$  навколишнього середовища ( $p_0 = 101325$  Па,  $T_0 = 293$  К).

Окрім деструкції ексергії в газовипускному тракті присутні також втрати за рахунок газодинамічного опору та втрати внаслідок теплообміну трактів з навколишнім середовищем.

Втрати від газодинамічних опорів дорівнюють:

$$E_{z.o.} = T_0 R_{\Gamma} \ln \frac{p'}{p''}, \quad (13)$$

де  $R_{\Gamma} = \frac{R}{\mu_{\Gamma}}$  – газова стала ВГ;  $p'$ ,  $p''$  – тиск ВГ на вході і на виході з компонента, Па.

Втрати від теплообміну з навколишнім середовищем дорівнюють:

$$E_{\text{навк.с.}} = Q \left( 1 - \frac{T_0}{T_{\text{комп.}}} \right), \quad (14)$$

де  $Q$  – кількість теплоти, що втрачається в навколишнє середовище, Дж;  $T_{\text{комп.}}$  – температура ВГ в компоненті, К.

Ексергетична ефективність будь-якого компонента газовипускного тракту дорівнює відношенню ексергії продукту до ексергії палива:

$$\varepsilon = \frac{E_P}{E_F} = \frac{E_F - E_D - E_{z.o.} - E_{\text{навк.с.}}}{E_F}. \quad (15)$$

Співвідношення (15) для компонента  $a$  записується у вигляді:

$$\varepsilon_a = \frac{E_{P,a}}{E_{F,a}} = \frac{E_{F,a} - E_{D,a} - E_{z.o.,a} - E_{\text{навк.с.,}a}}{E_{F,a}}. \quad (16)$$

Аналогічно для компонента  $b$  маємо:

$$\varepsilon_b = \frac{E_{P,b}}{E_{F,b}} = \frac{E_{F,b} - E_{D,b} - E_{e.o.,b} - E_{наек.с.,b}}{E_{F,b}} \quad (17)$$

Ексергетична ефективність газовипускного тракту дорівнює добутку ексергетичних ефективностей для цих компонентів  $\varepsilon_{тракту} = \varepsilon_a \cdot \varepsilon_b$ .

Наступним кроком є визначення додаткових ексергетичних критеріїв, які необхідні при аналізі газовідвідного тракту і визначенні взаємозалежності між його компонентами.

Відносна деструкція ексергії компонента визначається за формулою:

$$y_D = \frac{E_D}{E_F} \quad (18)$$

$$y_{D,a} = \frac{E_{D,a}}{E_{F,a}}, \quad y_{D,b} = \frac{E_{D,b}}{E_{F,b}}$$

Для компонентів  $a$  і  $b$  відповідно маємо:

Відносні втрати ексергії компонента газовипускного тракту знаходяться так:

$$y_L = \frac{E_L}{E_F} \quad (19)$$

$$y_{L,a} = \frac{E_{L,a}}{E_{F,a}}, \quad y_{L,b} = \frac{E_{L,b}}{E_{F,b}}$$

Для компонентів  $a$  і  $b$  відповідно отримуємо:

Параметр, який показує дольову частку деструкції ексергії в компоненті газовипускного тракту від загальної деструкції в тракті, можна знайти з виразу

$$y^*_{D,i} = \frac{E_{D,i}}{\sum_i E_{D,i}} \quad (20)$$

Для компонентів  $a$  і  $b$  вказані частки відповідно дорівнюють:

$$y^*_{D,a} = \frac{E_{D,a}}{E_{D,a} + E_{D,b}}, \quad y^*_{D,b} = \frac{E_{D,b}}{E_{D,a} + E_{D,b}}$$

**Результати досліджень.** Розрахунок ексергетичних втрат у газовипускному тракті за розробленою методикою виконаний на основі наведених у літературі [1, 2, 4] орієнтовних показників процесів, що відбуваються в ДВЗ та формул і рекомендацій, за якими ці величини розраховувалися. Результати розрахунків дослідження зведено в таблицю.

Таким чином, розроблено методику розрахунку ексергетичних втрат у газовипускних трактах ДВЗ, яка дає можливість проводити розрахунки цих втрат та виконати оптимальне проектування трактів з метою забезпечення мінімізації енергетичних втрат.

У роботі додатково наведено ексергетичні критерії, застосування яких при розрахунках дозволяє зробити висновки щодо знаходження шляхів вдосконалення тракту в цілому.

## Результати розрахунків дослідження ексергетичних втрат

Назва	Умовне позначення	Значення
Питома фізична і кінетична ексергії ВГ на вході в компонент <i>a</i> , кДж/кг	$e'_{ph,a}; e'_{k,a}$	3525; 2450
Питома фізична і кінетична ексергії ВГ на виході з компонента <i>a</i> , кДж/кг	$e''_{ph,a}; e''_{k,a}$	2025; 1800
Питома фізична і кінетична ексергії ВГ на вході в компонент <i>b</i> , кДж/кг	$e''_{ph,b}; e''_{k,b}$	2025; 1800
Питома фізична і кінетична ексергії ВГ на виході з компонента <i>b</i> , кДж/кг	$e'''_{ph,b}; e'''_{k,b}$	1520; 800
Деструкції ексергій компонентів <i>a</i> і <i>b</i> , кДж/кг	$e_{D,a}; e_{D,b}$	1749; 1233
Втрати ексергій компонентів <i>a</i> і <i>b</i> , кДж/кг	$e_{L,a}; e_{L,b}$	450; 500
Коефіцієнт ексергетичної ефективності компонентів <i>a</i> і <i>b</i>	$\varepsilon_a; \varepsilon_b$	0,64; 0,6
Відносні деструкції ексергій компонентів <i>a</i> і <i>b</i>	$y_{D,a}; y_{D,b}$	0,293; 0,322
Відносні втрати ексергій компонентів <i>a</i> і <i>b</i>	$y_{L,a}; y_{L,b}$	0,075; 0,130
Дольові частки деструкцій ексергій в компонентах <i>a</i> і <i>b</i>	$y^*_{D,a}; y^*_{D,b}$	0,586; 0,414

### Висновки

Розроблено методику ексергетичного аналізу газовипускного тракту ДВЗ з врахуванням всіх видів енергетичних втрат на вказаній ділянці, яка дає змогу визначити ступінь необоротності дійсного процесу в компоненті газовипускного тракту без розглядання циклу двигуна в цілому.

Визначено ексергетичні критерії, які вказують на значні втрати, пов'язані з газодинамічним опором і теплопередачею з навколишнім середовищем. Також значними є деструкції ексергій внаслідок необоротності процесу дроселювання в компоненті *a* та розширення газів у компоненті *b*.

Подальше вдосконалення газовипускного тракту можливе за рахунок зменшення ексергетичних втрат шляхом розробки оптимальної конструкції тракту (з мінімальним газодинамічним опором) і вдосконаленням його теплової ізоляції.

### Список літератури

1. Ваншейдт В. А. Конструирование и расчет прочности судовых дизелей / В. А. Ваншейдт. – Л.: Судостроение, 1969. – 640 с.
2. Возницкий И. В. Судовые двигатели внутреннего сгорания: [в 2 т.] / И. В. Возницкий, А. С. Пунда. – М.: МОРКНИГА, 2010. – Т. 1. – 260 с.; Т. 2. – 382 с.
3. Горобец В. Г. Оценка эксергетической эффективности утилизаторов теплоты отработанных газов в когенерационных установках на базе двигателей внутреннего сгорания / В. Г. Горобец, Ю. А. Богдан // Науковий вісник Херсонської держ. морської академії. – Херсон, 2013. – №1(8). – С. 112 – 118.
4. Лебедев О. Н. Двигатели внутреннего сгорания речных судов: учеб. для вузов. / Лебедев О. Н., Сомов В. А., Калашников С. А. – М.: Транспорт, 1990. – 328 с.

5. Тсатсаронис Дж. Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергопреобразующей системы / Джордж Тсатсаронис; науч. ред. и пер. с англ. Т.В. Морозюк. – Одесса: Студия «Негоциант», 2002. – 152 с.

*Разработана методика для определения эксергетических потерь, эксергетической эффективности и эксергетических критериев выпускного тракта двигателей внутреннего сгорания, которая позволяет оценить эффективность протекания отработанных газов по газовому тракту с учетом всех видов потерь.*

**Эксергетический анализ, эксергетические потери, эксергетическая эффективность, эксергетические критерии, выпускной тракт, двигатель внутреннего сгорания.**

*In this article the method by definition of exergy losses, exergy efficiency and exergy criteria of an exhaust manifold of the internal combustion engines is given. This method allows to estimate the efficiency of exhaust gases in the exhaust manifold with taking into account all types of losses.*

**Exergy analysis, exergy losses, exergy efficiency, exergy criteria, exhaust manifold, internal combustion engine.**

УДК 621.31:62.5

## **НЕЙРОНЕЧИТКА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ВЕНТИЛЮВАННЯМ БІОСИРОВИНИ**

**В. С. Федорейко, доктор технічних наук  
І. Б. Луцик, І. С. Іскерський, кандидати технічних наук  
Тернопільський національний педагогічний  
університет імені В.Гнатюка**

*Запропоновано спосіб реалізації системи керування процесом вентилювання біосировини на основі нейронечітких технологій. Наведено послідовність визначення режимних параметрів технологічної установки із врахуванням факторів, що впливають на її енергоощадність.*

**Вентилювання, біосировина, система керування, енергозатрати, нейронечіткі технології.**

Комплексність вирішення завдань підвищення якості продукції та зменшення усіх видів затрат на її виробництво потребують перегляду усіх задач вже на етапі проектування систем керування технологічними процесами [2].

Ця проблема є актуальною і для електротехнологічних комплексів