

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ

УДК 621.51

Ексергетичний аналіз повітряної компресорної установки

В. М. Ярошенко

Одеська національна академія харчових технологій, вул. Дворянська, 1/3, Одеса, 65082, Україна

✉ e-mail: valeryi@ukr.net

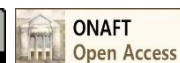
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6051-6848>

Визначення енергетичної ефективності компресорних установок за допомогою коефіцієнтів перетворення енергії, які базуються тільки на першому законі термодинаміки, не є об'єктивним показником їх енергетичної ефективності, а навіть хибним. Так як при цьому не враховуються якість енергетичних потоків та рівень їх оборотності – обмеження, які витікають із другого закону термодинаміки, відповідно до якого теплова енергія являється енергією нижчого татунку в порівнянні з енергією стиснутого газу або механічною та електричною. В результаті такого підходу автори деяких робіт стверджують, що тільки 5-15 % електричної енергії, що витрачається, трансформується в енергію стислого повітря, а 85-95 % передається тепловому потоку, який скидається до навколишнього середовища. При термодинамічному аналізі термомеханічних систем найбільш доцільним являється метод функцій (ексергетичний), який по відношенню до традиційного методу циклів є більш простим та універсальним, так як не потребує визначення та аналізу допоміжних моделей порівняння. Застосування ексергетичного методу при термодинамічному аналізі повітряних компресорних установок дозволяє враховувати не тільки кількісні показники при енергетичних перетвореннях в процесах, але і визначити якісні характеристики енергетичних потоків. Приводяться результати розрахунку ексергетичних показників суднової повітряної компресорної установки та побудована на їх основі діаграма ексергетичних потоків, що дозволяє визначити при цьому процеси з найбільшим рівнем необоротності (рівнем деградації енергії), як в абсолютних так і в відносних показниках, до яких в першу чергу відносяться проміжні та кінцеві охолоджувачі. Такий підхід дозволяє рекомендувати першочергові заходи для оптимізації процесів енергетичних перетворень в компресорних системах з метою підвищення їх загальної термодинамічної та техніко-економічної ефективності.

Ключові слова: *Повітряна компресорна установка; Енергетична ефективність; Ексергія; Утилізація теплоти; Ексергетичний аналіз; Термодинамічна досконалість*

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v57i3.2166>

© The Author(s) 2021. This article is an open access publication
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. Вступ

Повітряні компресорні станції та установки є невід'ємною частиною промислових виробництв, транспорту, будівництва, суднової енергетики та інших галузей. Частка повітряних компресорів в промисловості та на транспорті становить понад 80% від загального їх парку. Настільки широке поширення повітряних компресорів пояснюється доцільністю використання стисненого повітря як

найбільш зручного і порівняно недорогого енергоносія. Найбільш поширеними споживачами стиснутого повітря являються пневмосистеми промислових підприємств, особливо, на шахтах, металургії, будівництві, в системах пневмоавтоматизації та ін. [1,3]. Широке застосування повітряні компресорні установки набули при застосуванні в комплексі із судновими енергетичними установками для їх запуску, реверсу та автоматизації [3,5].

Головними перевагами стисненого повітря, як

універсального енергоносія, перед іншими енергоносіями (природний газ, електроенергія, водяна пара) є відносна простота і дешевизна його вироблення, і транспортування до місця застосування та споживання.

Системи виробництва та розподілу стисненого повітря є в значній мірі енерговитратними. Витрати на виробництво стисненого повітря складають 5-15% від собівартості продукції, а для деяких виробництв досягають 30% більше [3,4]. При виборі оптимальної конструкції компресорної установки або її елементів практично завжди необхідно визначати оптимальне (компромісне) співвідношення між вимогами енергетичної (термодинамічної) ефективності та техніко-економічною доцільністю, яка базується та розраховується на основі мінімальних узагальнених (приведених) витрат. Зазвичай підвищення енергетичної ефективності процесу пов'язано зі зменшенням необоротності процесу, що, в свою чергу, обумовлює додаткові економічні витрати, які впливають на собівартість енергетичного продукту установки. Але для переважної кількості повітряних компресорних систем в якості головного та визначального критерія завжди має місце їх енергетична ефективність.

2. Критика існуючих способів визначення ефективності компресорних установок

Досить часто оцінка енергетичної ефективності процесів енергетичних перетворень проводиться за допомогою кількісних енергетичних коефіцієнтів, таких як коефіцієнт перетворення енергії, COP, холодильний коефіцієнт та ін., розрахунків яких базується тільки на засадах першого принципу термодинаміки. В результаті такого підходу автори деяких робіт, обумовлюючи необхідність утилізації теплоти стиснення в компресорних системах, стверджують, що тільки 5-15% електричної енергії, що витрачається, трансформується в енергію стислого повітря, а 85-90% передається тепловому потоку, який скидається до навколишнього середовища [1,3,8,9].

Тому визначення енергетичної ефективності компресорних установок за допомогою коефіцієнтів перетворення енергії, які базуються тільки на першому законі термодинаміки, не являється об'єктивним показником, а навіть хибним. Так як при цьому не враховується якість енергетичних потоків та рівень їх оборотності – обмеження, які

витакають із другого закону термодинаміки, відповідно до якого теплова енергія не являється енергією високого гатунку в порівнянні з енергією стиснутого газу або механічною та електричною [6].

При цьому необхідно підкреслити той факт, що енергетичні цінності з якісної точки зору, теплової та механічної енергій суттєво відрізняються і тому термодинамічну ефективність компресорних систем необхідно аналізувати не тільки із врахуванням їх кількості, але і якості, визначаючи рівень оборотності процесів та їх вплив на загальну термодинамічну ефективність.

На рис. 1 показані термодинамічні процеси компресорної установки, яка застосовується при виробництві стисненого повітря, та знаходить використання в пневмосистемах.

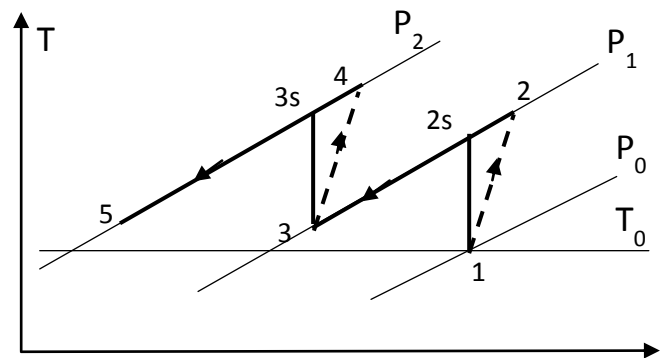


Рисунок 1 – Термодинамічні процеси стиснення в компресорній повітряній установці: 1-2 – реальний процес адиабатного стиснення в компресорі низького тиску; 2-3 – процес охолодження повітря в проміжному теплообміннику; 3-4 – реальний процес адиабатного стиснення в компресорі високого тиску; 4-5 – процес охолодження повітря в проміжному теплообміннику;

З метою зниження витрат електроенергії для приводу компресорів та підвищення їх експлуатаційних характеристик, для заданих умов (кінцевий тиск повітря 3 МПа) застосовується двоступеневе стиснення повітря з проміжним та кінцевим охолодженням. Теплота охолодження за допомогою теплообмінного обладнання часто скидається безпосередньо до навколишнього середовища (повітряне охолодження), або через системи оборотного водопостачання (водяне охолодження), або до систем утилізації, використання яких практично завжди обумовлює підвищення загальної енергетичної ефективності. Вибір схеми охолодження завжди повинен базуватись на основі техніко-економічних розрахунків та екологічних вимог [10].

3. Ексергетичне дослідження суднової компресорної установки

Енергетичні розрахунки виконувались для суднової повітряної компресорної установки при тиску повітря 3 МПа при наступних вихідних даних [5]:

Температура зовнішнього середовища $t_0=20^\circ\text{C}$; внутрішні (адіабатні) ККД компресорів $\eta_s = 75\%$; механічні ККД компресорів $\eta_m = 97\%$; електричні ККД електродвигунів $\eta_e = 95\%$; потужність насосів (вентиляторів) $N_n = 0,01 N_{\text{KM}}$; гідравлічні втрати $\Delta P = 0,02 (N_{\text{KM1}} + N_{\text{KM2}})$; необоротність процесів теплообміну 15°C .

Результати енергетичних розрахунків компре-

сорної установки приводяться в таблиці. Аналіз результатів показує, що в компресорній системі без утилізації теплоти стиснення, загальна електрична потужність компресорів приблизно дорівнюється загальній потужності теплових потоків, які скидаються до зовнішнього середовища. Але при цьому не враховується потенційна енергія стиснутого повітря і тому при визначенні енергетичної ефективності компресорних систем без утилізації теплоти їх енергетична ефективність оцінюється на досить низькому рівні. Тому об'єктивна оцінка енергетичної ефективності може бути тільки при врахуванні потенційної енергії стиснутого повітря.

Таблиця – Результати розрахунку енергетичних потоків в суднової повітряній компресорній установці

Назва розрахункового параметру	Символічне позначення	Одиниця виміру	Значення
Об'ємна продуктивність (витрата) повітря	V	$\text{м}^3/\text{хв}$	15,48
Електрична потужність компресору низького тиску	$N_{1,1}$	кВт	55,84
Теплова потужність проміжного охолоджувача	Q_1	кВт	47,83
Електрична потужність компресору високого тиску	$N_{1,2}$	кВт	58,6
Теплова потужність кінцевого охолоджувача	Q_2	кВт	53,44
Електрична потужність насосів (вентиляторів)	N_n	кВт	3,5
Гідравлічні втрати	ΔN	кВт	3,3

Реальна енергетична ефективність будь-якої термомеханічної системи повинна визначатись тільки на основі обмежень, які накладаються першим та другим законами термодинаміки, але при цьому висвітлювати рівень необоротності реальних процесів і пов'язані з цим втрати працездатності [2].

Для визначення ефективності енергетичних перетворень в розімкнених термодинамічних системах до яких відносяться і компресорні установки з адіабатним (політропним) стисненням газу та його охолодженням в проміжних та кінцевих процесах найбільш об'єктивним та простим, з точки зору його практичного застосування, являється метод функцій, в основі якого використовується універсальна термодинамічна функція – ексергія (технічна працездатність) [2,6].

Використання ексергії дозволяє об'єктивно аналізувати не тільки кількісні характеристики енергетичних потоків в процесах, але і якісні зміни, що відбуваються внаслідок енергетичних перетворень та їх необоротності, а ексергетичний ККД при цьому кількісно відображає рівень деградації енергії та відповідності реальних (дійс-

них) процесів до оборотних (термодинамічно зразкових).

Ексергія відповідає максимальній кількості корисної роботи, яка може бути отримана від робочого тіла в проточній системі при переході його в стан рівноваги з навколишнім середовищем за умови, що навколишнє середовище є єдиним джерелом-приймачем теплоти. При фіксованих значеннях T_0 і P_0 ексергія робочого тіла залежить тільки від його початкового стану, тобто ексергія є функцією стану робочого тіла при заданих температурі і тиску в навколишньому середовищі..

Величини, необхідні для проведення ексергетичного аналізу установки, визначалися з теплотехнічного розрахунку компресорної системи, результати якого приводяться в таблиці.

Ексергетичний коефіцієнт корисної дії системи без утилізації теплоти стиснення в такому разі визначається через відношення вихідної ексергії до вхідної та за розраховується формулою:

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{Ex_{\text{вих}}}{Ex_{\text{вх}}} = \frac{\Delta Ex_1}{\sum_{i=1}^{i=n} N_{\text{KM}} + \sum_{i=1}^{i=n} N_n}, \quad (1)$$

де ΔEx_1 – приріст загальної ексергії повітря в результаті його стиснення, який дорівнюється ексергії потоку повітря після охолодження в кінцевому теплообміннику, кВт;

$\sum_{i=1}^{i=n} N_{\text{км}}$ – загальна потужність приводу повітряних компресорів, кВт;

$\sum_{i=1}^{i=n} N_{\text{н}}$ – загальна потужність допоміжного обладнання (насосів, вентиляторів), кВт.

Приріст ексергії стиснутого повітря розраховується як добуток масової продуктивності повітряної компресорної установки на приріст питомої ексергії потоку повітря

$$\Delta Ex_1 = G \Delta e = G [h_1 - h_0 - T_0 (S_1 - S_0)], \quad (2)$$

де G – масова продуктивність повітряної компресорної установки, кг/с; T_0 – абсолютна температура навколишнього середовища, К;

h_1, h_0 , – питомі ентальпії стисненого повітря при заданих параметрах та в стані рівноваги з навколишнім середовищем, відповідно;

S_1, S_0 , – питомі ентропії стисненого повітря при заданих параметрах та при рівновазі з навколишнім середовищем, відповідно.

Результати ексергетичного аналізу приводяться графічно на рис. 2 в виді діаграми потоків ексергії (Сенкі – Грассмана) [2,11]. За допомогою такої діаграми можливо визначати абсолютні та відносні втрати ексергії в елементах установки та установці в цілому.

В якості вхідної ексергії розглядалась сумарна кількість електричної енергії, яка споживається компресорами та насосами компресорної установки, а в якості вихідної – ексергія стиснутого повітря після його охолодження в кінцевому теплообміннику.

Втрати ексергії в елементах установки, які обумовлені необоротністю процесів, розраховувались на основі рівняння Гюї-Стодоли з використанням відповідних середньостатистичних емпіричних коефіцієнтів, які визначають рівень необоротності реальних процесів по відношенню до оборотних (термодинамічно зразкових).

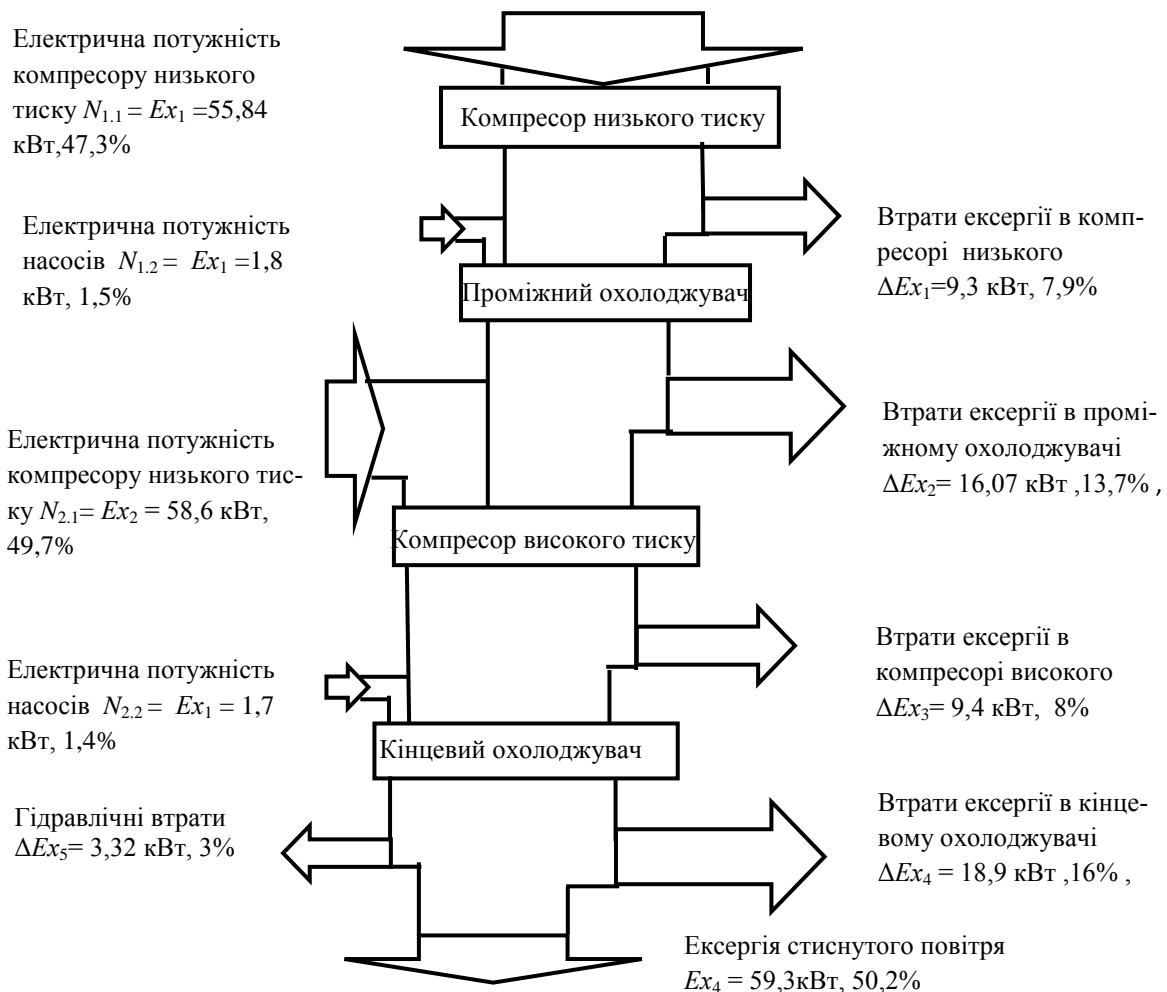


Рисунок 2 – Діаграма потоків ексергії компресорної установки

4. Висновки

Підвищення ексергетичного ККД можливо досягти внаслідок зменшення ексергетичних втрат в елементах установки. В першу чергу за рахунок утилізації скидної теплоти або підвищення коефіцієнтів корисної дії компресорів. Найбільша кількість ексергії при цьому втрачається в кінцевому теплообміннику (18,9% від електричної енергії, що витрачається) та 16,07% в проміжному теплообміннику, що обумовлює першочергове підвищення їх термодинамічної ефективності (застосування утилізаційних технологій).

Якщо, наприклад, утилізувати теплоту стиснення (її ексергетичну цінність) навіть на рівні 50 % від її загальної кількості, то ексергетичний ККД такої системи буде відповідати рівню 69 %, що обґрунтовує необхідність утилізації теплоти в будь-яких утилізаційних технологіях.

До найбільш поширених утилізаційних технологій в повітряних компресорних системах відносяться наступні [9,10]:

- Пряма утилізація тепла при безпосередньому нагріванні теплоносія для системи теплопостачання (вентиляція, гаряче водопостачання) і технологічні системи; Утилізація тепла для отримання гарячої води шляхом прямого нагріву її від стисненого повітря є найбільш простим методом, що не потребує значних капітальних витрат;

- Системи з трансформаторами теплоти. До основних елементів цієї групи відносяться енергетичні цикли з паровою турбіною, абсорбційні холодильні машини, теплонасосні установки та ін.

Доцільність будь-якої модернізації або оптимізації не завжди визначається бажанням підвищення енергетичної ефективності установки, так як такі процеси супроводжуються додатковими капітальними (економічними) витратами. Тому процеси модернізації або оптимізації компресорної системи завжди вирішуються на основі техніко-економічного аналізу, коли компромісно враховуються експлуатаційні (енергетичні) показники та пов'язані з цим капітальні витрати. Визначальним при цьому являються мінімально необхідні економічні витрати (мінімальна кількість суспільно необхідних витрат) на виробництво одиниці кінцевої продукції [6,7].

Використання ексергії для аналізу енергетичної ефективності компресорних установок дозволяє найбільш об'єктивно їх оцінювати із врахуванням кількості та якості енергетичних потоків.

Ексергетичний метод термодинамічного аналізу дозволяє не тільки визначати загальну термодинамічну ефективність установки (загальний ексергетичний ККД), але і розраховувати ексергетичні ККД її елементів з визначенням їх термодинамічної ефективності і рівня впливу на загальну енергетичну ефективність установки.

В залежності від поставленого завдання, коефіцієнт термодинамічного рівню (ексергетичний ККД) може розраховуватись для усієї установки в цілому, або для кожного її окремого елемента.

Рівень впливу окремого елемента (процесу) установки на загальний коефіцієнт корисної дії визначається відомими математичними методами на основі визначення:

$$\frac{\partial \eta}{\partial \eta_1} \dots \frac{\partial \eta}{\partial \eta_2} \dots \frac{\partial \eta}{\partial \eta_3} \dots \frac{\partial \eta}{\partial \eta_i} \quad (3)$$

При цьому необхідно встановити загальне аналітичне рівняння за допомогою якого встановлюється зв'язок між загальним та окремими ексергетичними коефіцієнтами корисної дії для кожного елемента системи (установки). Вид та форма такого рівняння залежить в першу чергу від технологічної схеми енергетичної системи та від схеми руху потоків ексергії.

$$\eta = \eta(\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \dots \eta_i) \quad (4)$$

Таким чином можна визначати складові елементи (обладнання) установки, які в першу чергу потребують оптимізації та модернізації з енергетичної точки зору, що загалом обумовлює підвищення термодинамічної ефективності процесів, які протікають в цих елементах та усієї компресорної системи в цілому.

Література

1. **Бондаренко Г.А., Кирик Г.В.** Компресорні станції. – Суми: СумДУ, 2016. – 385 с.
2. **Бродянский В., Фратшер В., Михалек К.** Эксергетический метод и его приложения. М.: Энергоатомиздат, 1988. – 286 с.
3. **Замицький О.В., Лідер М.Ю.** Дослідження шляхів підвищення енергетичної ефективності виробництва стисненого повітря в шахтних компресорних системах // Науковий вісник КрНУ. – 2016. – Вип. 43. – С. 175-180.

4. **Герман В.А.** Системы воздухообеспечения промышленных предприятий. – М.: Изд-во МЭИ, 1989. – 180 с.
5. **Голиков А.А., Занько О.И., Логишев И.В.** Технология использования газообразных рабочих тел в судовых энергетических установках и устройствах. – Одесса: ОМА, 2008. – 128 с.
6. **Мартьяновский В.С.** Циклы, схемы характеристики термотрансформаторов. – М.: Энергия, 1979. – 288с.
7. Некоторые проблемы сочетания эксергетического метода анализа холодильных машин с технико-экономическим / Под редакцией **Бродянского В.М.** // Труды всесоюзной научн. техн. конференции по термодинамике. – Л.: ЦКТИ, 1969. – С. 27-32.
8. **Мищенко В.О.** Термодинамічна оцінка та аналіз засобів утилізації тепла стиснення компресорних установок // Вісник Сум ДУ, Серія Технічні науки. – 2009. – №2. – С. 196-200.
9. **Смусев В.И., Оксень Ю.И., Радюк М. В.** Оценка эффективности теплонасосной технологии утилизации теплоты воздушных компрессоров // Науковий вісник НГУ, Геотехнічна та гірнична механіка, машинобудування. – 2010. – №6. С. 79-82.
10. **Шадрин В.С., Козлов В.В.** Рекуперация тепловой энергии на компрессорных станциях на базе компрессорных центробежных установок. В сб.: Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация // Электронный журнал МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2016. – № 2. – С. 38-50.
11. **Эксергетические расчеты технических систем: Справочное пособие / Под ред. акад. А.А. Долинского; авторы Бродянский В.М. и др.** – К.: Наукова думка, 1991. – 360 с.

Отримана в редакції 30.08.2021, прийнята до друку 11.10.2021

Exergetic analysis of an air compressor unit

Valeryi Iaroshenko✉

Odessa National Academy of Food Technologies, Dvoryanskaya str., 1/3, Odessa, 65082, Ukraine

✉ e-mail: valeryi@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6051-6848>

Determining the energy efficiency of compressor units using energy conversion factors, which are based only on the first law of thermodynamics, is not an objective indicator of their energy efficiency, and even erroneous. Since this does not take into account the quality of energy flows and the level of their turnover – the limitations arising from the second law of thermodynamics, according to which thermal energy is energy of lower grade compared to compressed gas or mechanical and electrical. As a result of this approach, the authors of some works claim that only 5-15% of the electricity consumed is transformed into compressed air energy, and 85-95% is transferred to the heat flow, which is discharged to the environment. In the thermodynamic analysis of thermomechanical systems, the most appropriate is the method of functions (exergetic), which in relation to the traditional method of cycles is simpler and more universal, as it does not require the definition and analysis of auxiliary comparison models. The application of the exergetic method in the thermodynamic analysis of air compressor units allows to take into account not only the quantitative indicators of energy transformations in the processes, but also to determine the qualitative characteristics of energy flows. The results of calculation of exergetic indicators of the ship air compressor installation and the diagram of exergetic streams constructed on their basis are resulted that allows to define thus processes with the greatest level of irreversibility (level of energy degradation), both in absolute and relative indicators to which intermediate first of all interjacent and final coolers. This approach allows us to recommend priority measures to optimize the processes of energy transformations in compressor systems in order to increase their overall thermodynamic and technical and economic efficiency.

Keywords: Air compressor unit; Energy efficiency; Exergy; Heat utilization; Exergetic analysis; Thermodynamic perfection

References

1. **Bondarenko, G.A., Kirik, G.V.** (2016) Compressor stations. *Sumy: SumDU*, 385.
2. **Brodyansky, V., Fratscher, V., Mikhalek, K.** (1988) Exergetic method and its applications. *Moscow: Energoatomizdat*, 286.
3. **Zamitsky, O.V., Leader, M.Yu.** (2016) Research of ways to increase energy efficiency of compressed air production in mine compressor systems. *Naukovyi visnyk KrNU*, 43, 175-180.
4. **German, V.A.** (1989) Air supply systems for industrial enterprises. *Moscow: Izdatelstvo MEI*, 180.
5. **Golikov, A.A., Zanko, O.I., Logishev, I.V.** (2008) Technology of using gaseous working fluids in ship power plants and devices. *Odessa: OMA*, 128.
6. **Martynovsky, V.S.** (1979) Cycles, circuits of the characteristics of thermal transformers. *Moscow: Energiya*, 288.
7. **Brodyansky, V.** (1969) Some problems of combining the energetic method of analysis of refrigerating machines with technical and economic. *Trudy vsesoyuznoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii po termodinamike, Leningrad: TsKTI*, 27-32.
8. **Mishchenko, V.O.** (2009) Thermodynamic evaluation and analysis of means of utilization of heat of compression of compressor units. *Visnyk SumDU, seriya tekhnichni nauky*, 2, 196-200.
9. **Smusev, V.I., Oksen, Yu.I., Radyuk, M.V.** (2010) Evaluation of the efficiency of the heat pump technology for utilizing the heat of air compressors. *Naukovyi visnyk NHU, heotekhnicha ta hirnycha mekhanika, mashynobuduvannia*, 6, 79-82.
10. **Shadrin, V.S., Kozlov, V.V.** (2016) Heat recovery at compressor stations based on compressor centrifugal units. In collection: Machines and installations: design, development and operation. *Elektronnyi zhurnal MGRU imeni N.E. Baumana*, 2, 38-50.
11. **Brodyansky, V.M. et al** (1991) Exergetic calculations of technical systems: Handbook. *Kyiv: Naukova Dumka*, 360.

Received 30 August 2021

Approved 11 October 2021

Available in Internet 15 October 2021