

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ГАЗОВИХ КОТЛІВ ЕКСПРЕС-МЕТОДОМ БАГАТОКРИТЕРІЙНОЇ ОЦІНКИ

Демченко В. Г., Трубачев А. С., Гронь С. С.

### 1. Вступ

Системам теплозабезпечення притаманний значний потенціал енергозбереження. Загальний потенціал енергоощадливості в Україні становить близько 45 % від обсягу спожитих паливно-енергетичних ресурсів. А щоденні енергетичні втрати в Україні сягають близько 3,5 мільйонів доларів США. Усе це негативно впливає на національну економіку країни. Розумне й ефективне енерговикористання є ключовим чинником створення нових робочих місць та економічного зростання країни.

Найбільш критичним залишається енергозбереження у сфері споживання природного газу. В Україні споживається близько 40,0 млрд. м<sup>3</sup> природного газу на рік, з них:

- 13,0 млрд. м<sup>3</sup> споживає промисловість;
- 4,0 млрд. м<sup>3</sup> складають технічні потреби і втрати при транспортуванні;
- 5,0 млрд. м<sup>3</sup> витрачається на приготування їжі та виробництво електроенергії;
- 17,8 млрд. м<sup>3</sup> для опалення багатоквартирних та приватних будинків.

При цьому рівень непродуктивних втрат споживання газу складає від 30 до 40 %. Скоротивши їх до європейського рівня можна заощадити до 9,0 млрд. м<sup>3</sup> природного газу на рік.

Для опалення приватних будинків витрачається близько 11,0 млрд. м<sup>3</sup> газу на рік, потенціал енергозбереження при цьому сягає 6,3 млрд. м<sup>3</sup>, з яких побутовими газовими котлами на опалення та нагрів гарячої води припадає 1,7 млрд. м<sup>3</sup> природного газу. До 60 % опалювальних котлів, що продаються в Україні, займають котли імпортного виробництва. На теперішній час 40 % потреб ринку покривається котлами вітчизняного виробництва. Одними з моделей, що масово виготовляються та масово продаються довгі роки є підлогові котли типу АОГВ (апарат опалювальний газовий водонагрівний), що працюють на газу. Тому доцільним рішенням енергоефективності є забезпечення якості котлоагрегатів на етапі проектування, виготовлення та експлуатації, а також розробка рекомендацій щодо їх модернізації.

При виборі котельного устаткування бажано керуватися об'єктивними методами системного аналізу і багатокритерійною оцінкою показників ефективності. Наявні методи порівняльного аналізу не дають системних оцінок. Тому актуальним є вдосконалення методів багатокритерійної оцінки ефективності опалювальних котлів, в першу чергу – технологічними, економічними та екологічними критеріями.

### 2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження є метод експрес-аналізу багатокритерійної оцінки, на прикладі порівняння ефективності побутових газових водогрійних котлів

типу АОГВ, який довгі роки використовуються для опалювання та постачання гарячої води приватних будинків та об'єктів комунальної сфери.

На першому етапі в цій роботі проаналізовані та порівнянні технічні, екологічні та економічні показники моделей побутових котлів типу АОГВ, розрахованих на опалення будинків із загальною площею близько 100 м<sup>2</sup>, їх характерними особливостями, які декларують заводи-виробники це:

- атмосферні пальники;
- можливість використання в гравітаційних системах опалення, без підключення до електромережі;
- зменшена циркуляція води в системі опалення;
- коефіцієнт корисної дії – близько 90 %, який досягається шляхом розширення площі теплообміну та невеликої кількості води в котлі;
- фарбування антикорозійними емалями;
- безшумна робота та низька вартість.

До негативних особливостей даних моделей котлів слід віднести:

- моральнозастаріле технологічне рішення побудови котла;
- обмежений термін служби;
- короткі терміни гарантії;
- чуйне реагування і вплив на роботу котла зміни розрядження в димарі;
- зниження продуктивності до повної зупинки роботи котла при зниженому тиску газу тощо.

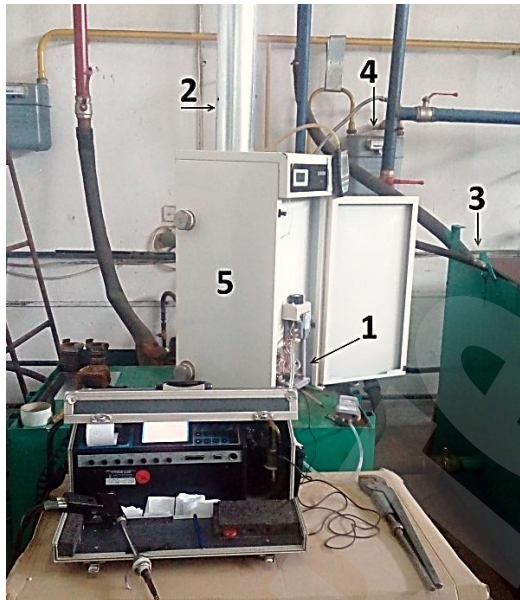
Для проведення досліджень були надані водогрійні котли тепловою потужністю близько 12,0 кВт [1]:

- українського виробництва, торгових марок – АТОН АОГВМ-12 ЕМ; АТЕМ «Житомир 3» КСГ 012 СН; Danko Данко-12СР; Термобар КС-Г-12,5;
- російського виробництва – ДС ЛЕМАКС Преміум 12,5; Siberia 2210-012 исп. 3 Siberia 11 та МІМАКС КСГ-12,5.

Досліджувані котли сертифіковані в Україні і декларують коефіцієнт корисної дії 81÷93 % при повному згорянні палива. Котли оснащені системами автоматичного розпалу та захисту, що забезпечує їх експлуатацію без постійного обслуговуючого персоналу.

Згідно з програмою досліджень було проведено ознайомлення з технічною документацією на кожний котел. Режимно-налагоджувальні дослідження та комплексні – тепलोкологічні випробування проводились на двох основних режимах роботи котлів при мінімальному та максимальному тепловому навантаженні при значеннях розрідження в димоході 3,5; 7,0 та 15,0 Па, відповідно. На всіх котлах було проведено по три основних балансових досліди після визначення оптимальних коефіцієнтів надлишку повітря при найменших викидах токсичних компонентів.

Режимні випробування проводились при оптимальних значеннях коефіцієнта надлишку повітря, при цьому фіксувалися витрати газу та інші необхідні параметри. При проведенні режимних і балансових іспитів газовий аналіз і заміри температури продуктів горіння проводились в газоході за котлом (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема вимірів параметрів роботи котлів:

1 – температура та тиск повітря; 2 – температура, розрідження та хімічний склад димових газів; 3 – розхід та температура теплоносія в прямому та зворотному трубопроводах; 4 – розхід, температура та тиск природного газу; 5 – температура корпусу котла

При проведенні робіт виявлені умови надійної та економної роботи котлів були визначені коефіцієнти корисної дії та інші техніко-економічні показники роботи обладнання. Проведені дослідження по визначенню вмісту оксидів азоту та вуглецю в продуктах горіння, вплив режимних факторів на ККД і величину викидів. При визначенні ККД бруто котла використовувався метод зворотного балансу [2]. Заміри складу вихідних газів, їх температури та температури повітря перед пальником проводились комп'ютерним газоаналізатором без зупинок на протязі усього часу випробування. Запис показань газового лічильника та інших приладів проводився кожні 10 хв. Виміри та розрахунки CO, NO<sub>x</sub> та інших забруднюючих речовин проводились згідно [3–5]. Теплові характеристики теплоізоляції елементів котла визначалися шляхом аналізу отриманих результатів по термограмах (заміри тепловізором) та у важкодоступних місцях пірометром.

Максимально досягнута теплопродуктивність, кожного з водогрійних котлів, склала близько 12 кВт. Значення ККД на максимально досягнутому навантаженні склало від 81 до 93,4 %, що в першу чергу обумовлено одноходовою схемою руху теплоносія, використанням тільки конвективного виду теплообміну та іншими режимними характеристиками обладнання. Встановлені в котлах атмосферні пальники низького тиску працювали надійно в дослідних діапазонах навантажень й коефіцієнтів надлишку повітря. На основі проведених випробувань розроблені розрахунки роботи котлоагрегатів, визначені економічні, екологічні та енергетичні показники роботи, запропоновані заходи, направлені на підвищення ефективності та надійності роботи котлів. Отримані данні ілюстровані зведеною табл. 1, в якій кольором виділено значення балів по кожному критерію для кожного котла.

Таблиця 1

## Звідна відомість основних показників котлів

№	Найменування параметру та одиниця виміру	Найменування апарату						
		АТОН АОГВМ-12 ЕМ	ЛЕМАКС Преміум 12,5	АТЕМ Житомир 3 КСГ012СН	Siberia 2210012 исп. 3	Danko Данко-12 СР	Термобар КС-Г-12,5 ДС	МІМАКС КСГ-12,5
1	ККД, %	88,31–81,33	81,2–75,5	92,18–90,82	86,7–74,0	86,3–73,81	88,2–84,0	84,6–72,05
		3	5	1	4	4	2	6
2	КВП, м <sup>3</sup> /Гкал	162,36	161,28	147,60	159,69	154,80	164,88	163,08
		5	4	1	3	2	7	6
3	Металомісткість, кг/кВт	3,6	4,4	3,92	4,4	4,3	3,64	3,7
		1	6	4	6	5	2	3
4	Приведена вартість, дол./кВт	6,24	5,67	5,15	6,33	4,22	4,66	3,27
		6	5	4	7	2	3	1
5	<b>Сума</b>	15	20	10	20	15	14	16
	<b>Оціночний бал</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>4</b>

З табл. 1 наочно видно, що всі досліджувані моделі мають практично однакові показники. Всі виробники паспортних даних котла декларують ККД не менше 90 %. Однак, проведені розрахунки показують, що тільки котли торгової марки АТЕМ мають цей показник на рівні 90–92 %, в залежності від режиму та умов експлуатації.

Найбільшу теплопродуктивність при натурних випробуваннях показав котел виробництва фірми АТЕМ, найгірші показники у котла МІМАКС.

Тепловізійні дослідження теплових втрат через корпус котла, показали, що у усіх котлів відзначається локальне перегрівання корпусу, який перевищує допустимі нормативи. Найбільше перегрівання відмічене у котлів ТЕРМОБАР і МІМАКС до 120 °С у інших даних котлів температура корпусу, в окремих зонах коливається від 50 до 70 °С.

Важливо зазначити, що усі котли, за винятком котла торгової марки МІМАКС, обладнані однаковими атмосферними пальниками з блоком автоматики управління і безпеки італійської фірми SIT. Таким чином витрати та умови згорання природного газу в них різняться тільки внаслідок конструктивних особливостей камери спалювання, аеродинаміки котла та конвективного теплообмінника.

Аеродинамічні показники порівнюваних котлів показали загальну тенденцію до зниження ККД від збільшення аеродинамічного опору димаря. Проведені натурні випробування показали, що найменш схильний до цих змін на різних режимах експлуатації котел торгової марки АТОН, що пояснюється його конструктивним рішенням. Найгірші показники при зміні аеродинамічного режиму роботи у котлів Siberia, Danko та МІМАКС.

Всі котли мають однакову технологічну схему, конструкцію і габаритні розміри, у зв'язку з чим металомісткість котлів складає близько 4 кг/кВт, хоча у котла АОГВМ-12 ЕМ фірми АТОН вона краща за цей показник – 3,6 кг/кВт.

Важливим екологічним показником є температура вихідних газів, викиди СО і оксидів азоту, а також редукція вуглецю (СО<sub>2</sub>).

За цими показниками найменша емісія шкідливих речовин, на різних режимах, виявлена у котла АТОН, а найгірші показники у котлів ЛЕМАКС, Siberia і МІМАКС.

Приведена вартість котлів в дол./кВт коливається в інтервалі від 3 до 6 доларів США за кіловат. Найбільшу вартість мають котли торгової марки Siberia, а найменша вартість у котла торгової марки МІМАКС, що очевидно пояснюється застосуванням примітивного пальника, без електронного запалення, та блоку управління й безпеки власного виробництва.

Отримані данні дають змогу провести експертну оцінку досліджуваних котлів по якісним показникам. При проведенні аналізу роботи котлів необхідно також враховувати втрати теплоти, які не підлягають точному аналітичному вирішенню, однак впливають на загальні показники ефективності системи генерації теплоти. До них відносяться:

- зміна температури живильної води на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  приводить до збільшення або зменшення загальної витрати теплоти, яка виробляється котлом, на  $1\text{ }\%$ ;

- при збільшенні теплопродуктивності котла питомі втрати у навколишнє середовище  $q_5$  зменшуються, а питомі втрати з викидними газами  $q_2$ , хімічним  $q_3$  і механічним  $q_4$  недопалом збільшуються. Спочатку зниження втрат  $q_5$  більше за збільшення втрат  $q_2+q_3+q_4$  і ККД котла зростає, але потім втрати  $q_2+q_3+q_4$  зростають скоріше, ніж зниження  $q_5$  і ККД починає знижуватись;

- якщо знати залежність ККД котла від теплового навантаження, можна встановити втрату палива при недозавантаженні котла в режимі зниженого тиску газу й раціональний режим його роботи;

- втрати теплоти нагрітими поверхнями в навколишнє середовище можуть бути значними. Наприклад, стінкою з температурою  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  при температурі навколишнього середовища  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  з  $1\text{ м}^2$  втрачається  $1920\text{ ккал/год}$ . В результаті теплових втрат знижуються параметри теплоносія;

- наднормативне підвищення коефіцієнту надлишку повітря на  $0,2\text{ }\%$  підвищує втрату теплоти з відхідними газами на  $1\text{--}2\text{ }\%$ , ККД котлоагрегату знижується на  $2\text{ }\%$ , втрата палива підвищується на  $2,5\text{--}3\text{ }\%$ ;

- порушення теплової ізоляції котла на  $30\text{ }\%$  і більше призводить до наднормативної втрати теплоти на  $1\text{--}2\text{ }\%$ ;

- збільшення об'єму продуктів згоряння палива на  $80\text{--}90\text{ }\%$  внаслідок розбавлення їх повітрям, збільшує втрату теплоти від хімічної неповноти згоряння палива у  $2$  рази;

- відхилення вмісту  $\text{CO}_2$  у відхідних газах від оптимального значення на  $1\text{ }\%$  збільшує перевитрату палива котлоагрегатом на  $0,6\text{ }\%$ ;

- наявність накипу на внутрішній поверхні котла товщиною  $1,0\text{ мм}$  збільшує витрату палива на  $2\text{ }\%$ ;

- відхилення навантаження котла від оптимального на  $10\text{ }\%$  в бік зменшення приводить до перевитрати палива на  $0,2\text{ }\%$ , а в бік збільшення – на  $0,5\text{ }\%$ .

Наочно видно, що оцінка ефективності – багатокритеріальне завдання.

Наведене в табл. 1 підсумовування балів показує, що найкращі показники має котел АТЕМ, найгірші характеристики у котлів Siberia і ЛЕМАКС, що набрали по  $20$  балів.

Для визначення напрямку подальшого пошуку оптимальних рішень порівняння досліджуваних котлів можна скористатися методами оцінки, які ґрунтуються на основі апарату математичної статистики.

### **3. Мета та задачі дослідження**

*Метою дослідження є розробка та апробація експрес-методу системного аналізу багатокритерійної оцінки, на конкретному прикладі визначення ефективності газових водогрійних котлів від семи заводів-виробників.*

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Провести детальний аналіз семи газових котлів, що представлені на ринку України та на основі проведених замірів розрахувати значення ККД, питомої витрати палива і викидів шкідливих речовин в атмосферу.
2. Порівняти технологічні, екологічні та економічні показники котлів, з використанням відомих методів математичної статистики та методів математичного моделювання та провести верифікацію експрес-методу аналізу багатокритерійної оцінки.

### **4. Дослідження існуючих рішень проблеми**

Поняття ефективності відіграє важливу роль при оцінці практично будь-якого проекту. Теорія і методи оптимізації знайшли широке застосування для вирішення багатьох завдань в найрізноманітніших галузях людської діяльності. Властивості і методи відшукування оптимальних рішень таких завдань добре вивчені як з теоретичної, так і прикладної точок зору [6, 7], але в них не розглянуто можливість проведення багатокритеріальної оцінки графоаналітичним методом. Робота [8] присвячена аналізу та плануванню рішень в економіці, проте залишається невирішеним питання об'єднання та порівняння економічних показників з технологічними та екологічними. В роботі [9] пропонується багатокритеріальна оцінка заходів з оптимізації споживання теплової енергії, однак ігноруються проблеми екології. При всій важливості в повсякденній практиці поняття ефективності стає досить важким і слабо формалізованим завданням.

Одним з таких методів є Аналіз Середовища Функціонування (АСФ) [10, 11]. Технологія АСФ розглядає складний об'єкт, що характеризується багатьма вхідними та вихідними параметрами. Дана технологія базується на фундаментальних положеннях математичної економіки і активно використовує сучасні досягнення в області системного аналізу та дослідження операцій [12].

Технологія АСФ є математичною моделлю, яка не вимагає завдання констант, вибір функцій розподілу і інших характеристик. Однак інтерпретація і аналіз результатів моделювання за технологією АСФ представляє певну складність, оскільки уявити поведінку об'єкта в багатовимірному просторі вхідних і вихідних параметрів практично неможливо [13]. Крім того, стандартний аналіз за технологією АСФ, як правило, дає два способи підвищення ефективності.

Метод багатокритерійного аналізу (МАІ) – це математичний інструмент системного підходу до складних проблем ухвалення рішень [14]. Формування структури моделі ухвалення рішення в МАІ досить трудомісткий процес. Проте у результаті вдається отримати детальне уявлення про те, як саме взаємодіють чинники, що впливають на прийняті рішення і рейтинги, що відбивають важливість чинників [15]. У МАІ немає засобів для перевірки достовірності даних. Це важливий недолік, що обмежує частково можливість застосування методу. МАІ може бути надмірно трудомістким для ухвалення простих рішень через те, що

для збору даних вимагається провести велику кількість порівнянь [16]. Для комп'ютерної підтримки МАІ існують спеціалізовані програмні продукти.

Таким чином, результати аналізу літературних джерел дозволяють зробити висновок про те, що всі наявні існуючі методи мають певні недоліки та потребують розробки нових експрес-методів для швидкого аналізу та оцінки критеріїв для прийняття стратегічних рішень.

## **5. Методи досліджень**

Процес ухвалення рішень в різних сферах діяльності багато в чому аналогічний. Застосування методології системного аналізу при проведенні порівняння основних показників котельного устаткування дозволяє розробити заходи по підвищенню ефективності показників його використання. Основними напрямками застосування системної методології є оцінка теплотехнічних (технологічних), економічних і екологічних показників роботи устаткування та виробітки рішень по подальшій модернізації і оптимізації конструкції котлів. Для цього використовується метод порівняння – найпоширеніший метод системного аналізу.

Як можна бачити з таблиці 1 спочатку використовувався метод сум, який ґрунтується на підсумовуванні значень певних показників по кожному котлу. За результатами порівняльної комплексної оцінки можна прийняти рішення про те, який з котлів слід вважати кращим по ряду певних ознак. Ранжуючи показники в порядку зменшення, був встановлений рейтинг котлів типу АОГВ. До недоліків цього методу слід віднести те, що підсумовуючи усі показники, низькі результати окремих показників покриваються високими результатами інших показників. З метою отримання об'єктивної оцінки необхідно виключити ті показники, які найбільшою мірою можуть вплинути на кінцевий результат.

З метою отримання об'єктивної оцінки на другому етапі дослідження використано метод бальних оцінок, який заснований на присвоєнні котлам порядкових значень відповідно до заданих числових категорій. Метод бальної оцінки полягає в підсумовуванні балів, які привласнюються кожному показнику. Чим вище показник, тим нижче бал. Чим нижче сума балів, тим вище рейтинг досліджуваного об'єкта. До недоліків цього методу відноситься те, що насправді відмінність показників може бути дуже значною, або, навпаки, чисто номінальною, що може істотно розрізнятися і спотворювати оцінку. Необхідність застосування методу бальних оцінок виникла внаслідок того, що потрібно зіставити ефективність семи котлів за чотирма показниками.

Вказаний недолік усувається застосуванням методу інтерполяції в інтервалі 1–7 балів.

На третьому етапі дослідження був використаний графоаналітичний метод «3Е» багатокритерійної оцінки ефективності ухвалення рішень [17, 18]. У його основі лежить багатокритерійний метод системного аналізу, який включає широкий спектр математичних і статистичних методів і може бути використаний для будь-яких розрахунків по ухваленню рішень у будь-якій сфері діяльності. Багатокритерійний аналіз вимагає з'єднання трьох різних типів інформації в одному методі, який можна застосовувати на практиці. Даний метод практично не має аналогів і ґрунтується на проведенні парних порівнянь. Застосування методу «3Е» абсолютно не залежить від сфери діяльності, в якій приймається стра-

тегічне рішення. Тому метод «3Е» є універсальним, а його застосування дозволяє організувати систему підтримки ухвалення рішень.

Запропонований метод дозволяє отримати графічне зображення результату порівняльного аналізу ефективності котлів типу АОГВ та з великою долею вірогідності визначити рейтинг продукції заводів-виробників.

Аналіз базується на трьох основних критеріях, а саме енергетичному, екологічному та економічному. Результати експрес-аналізу наочно представляються у вигляді площі допустимих значень на трикутній діаграмі «3Е трикутник» від початкових літер слів.

Важливим чинником проведення розрахунків за новим методом «3Е» експрес-аналізу є виявлення довірчого інтервалу. На основі проведення експертної оцінки пропонуються призначити межі довірчих інтервалів, із заданою надійністю, для кожного критерійного вагового коефіцієнта  $KE$ , що являють собою безрозмірні величини, виражені у відсотках. Перетин меж мінімальних значень вагових коефіцієнтів утворює довірче поле (заштрихована область) 3Е діаграми, в якому визначають ранги котлів типу АОГВ, що розглядаються в наступному розділі цієї роботи.

Для знаходження взаємозв'язку між ваговими показниками ефективності устаткування використовується рівносторонній трикутник, діагоналі в якому рівні. З вершин трикутника відкладають значення, отримані розрахунком або натурним виміром. Отримані точки відліку показників кожного котла сполучають, і на перетині діагоналей отриманого малого трикутника отримують базове значення рейтингу котла за трьома ваговими показниками.

Формули для розрахунку вагових коефіцієнтів наведені в табл. 2.

**Таблиця 2**

Розрахунок значення вагових коефіцієнтів для побудови «3Е трикутника»

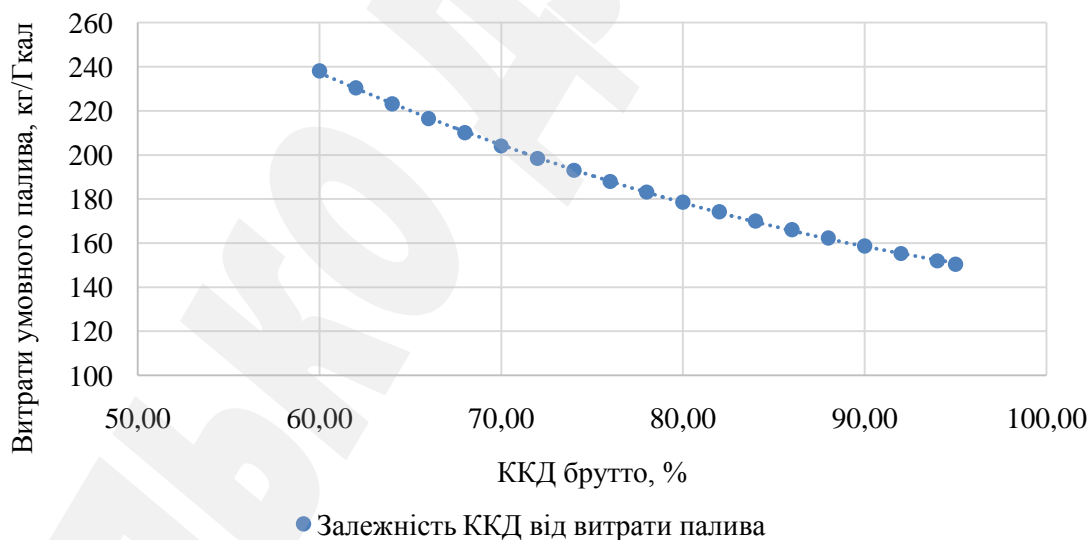
Найменування	Формула для розрахунку	Довірчий інтервал
Ваговий енергетичний коефіцієнт $KE_1$	$KE_1 = 100 - \sum q_i$ %, де $q_i$ – втрати теплоти, %	70–100 %
Ваговий екологічний коефіцієнт $KE_2$	$KE_2 = \frac{(CO_2 + CO + CH_4 + \sum n \cdot C_n H_m) \cdot 100}{(CO_2 + CO + CH_4 + \sum n \cdot C_n H_m + N_2 + 79 \cdot V^0)}$ %, де $C_n H_m$ – вуглеводні, що входять до складу газу, наприклад, метан $CH_4$ ( $n=1, m=4$ ), етан $C_2H_6$ ( $n=2, m=6$ ) і т. д.; $V^0$ – теоретичний об'єм сухого повітря, необхідного для повного згоряння палива, м <sup>3</sup> /кг	5–10 %
Ваговий економічний коефіцієнт $KE_3$	$KE_3 = \left(1 - \frac{B}{Q_i}\right)$ %, де $B$ – повна витрата палива на котельний агрегат, кг/ч; $Q_i$ – питома теплота згоряння, Гкал/кг	60–100 %
Індекс привабливості $I^p$	$I^p = KE_1 + KE_2 + KE_3$	Інтегрований показник кількісної якості
Індекс пропорційності $I^a$	$I^a = KE_1 \cdot KE_2 \cdot KE_3$	Інтегрований показник темпу відхилення від еталону



Довірчий інтервал енергетичного коефіцієнта  $KE_1$  приймається від 70 % до 100 % і для його обчислення використовуються відомі формули підрахунку коефіцієнту корисної дії (ККД) котлоагрегату [2].

В якості вагового екологічного коефіцієнта  $KE_2$  приймаються реальні значення вмісту діоксиду вуглецю  $CO_2$ , який розраховується для кожного з розгляданих котлів згідно з чинними методиками [3–5].  $CO_2$  вибрано основним компонентом, тому що він відображує якість згорання природного газу. Це обґрунтовано тим, що максимальний вміст  $CO_2$  по результатам аналізу палива прямо пропорційний паливній складовій і обернено пропорційний до об'єму шкідливих викидів і баластних газів в продуктах згорання. На цій підставі значення  $CO_2$  якнайповніше відбиває екологічні показники горіння палива. Довірчий інтервал екологічного коефіцієнта  $KE_2$  пропонується прийняти в значенні від 5 % до 10 %.

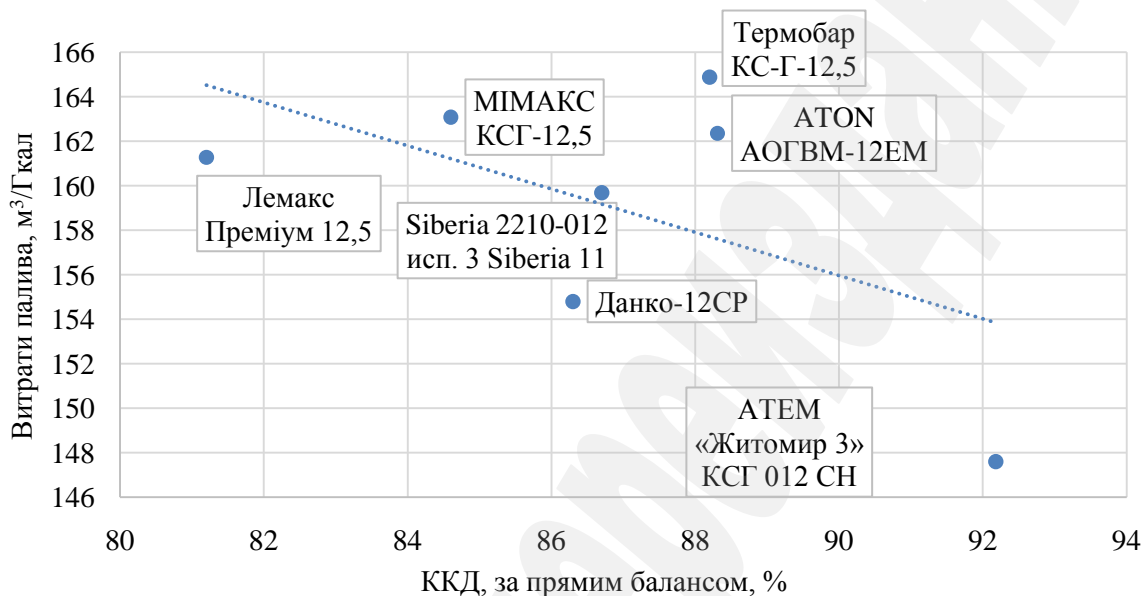
Довірчий інтервал економічного коефіцієнта  $KE_3$  приймає значення від 60 до 100 % і для його обчислення використовуються відомі формули розрахунку коефіцієнту використання палива (КВП) [2]. Отримані розрахунком дані розходу природного газу для виробництва 1,0 Гкал теплоти переводилися в умовне паливо. Потім з використанням методики [19] та інструкції [20] методом інтерполяції (рис. 2) було проведено перерахунок значень визначення виробництва теплоенергії за відповідною витратою палива в діапазоні від 60 до 100 % можливих значень відповідно до ККД генерації теплоти. Після чого визначався КВП у відсотках з використанням результатів, отриманих по розрахунках. Для побудови довірчого поля «3Е трикутника» отримані значення КВП потрібно відкладати у зворотному порядку.



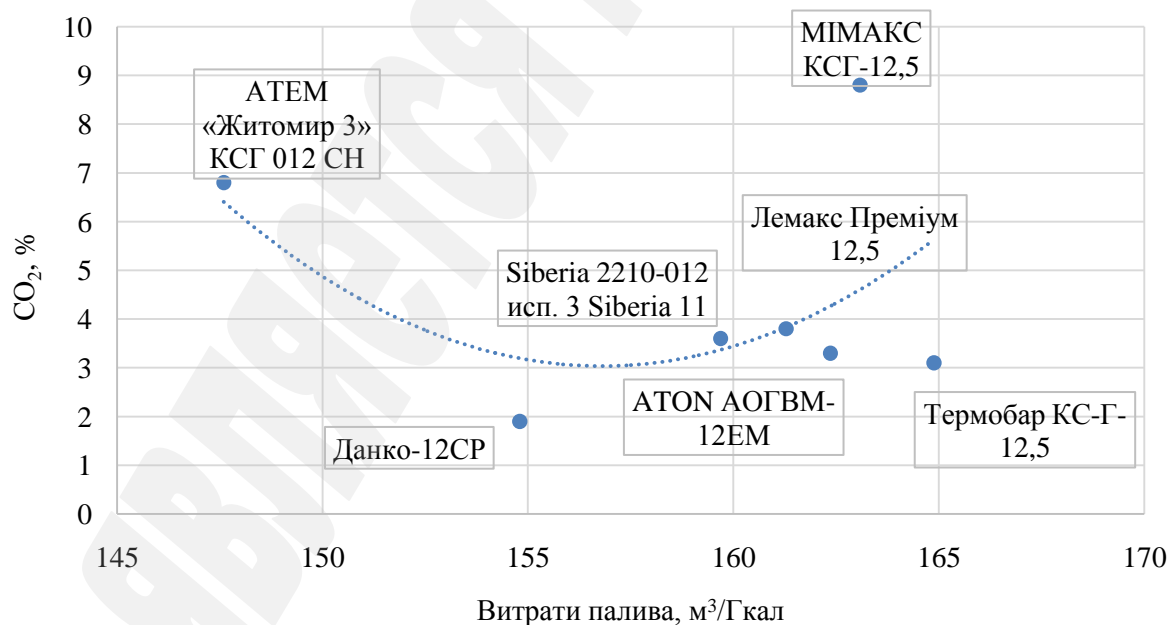
**Рис. 2.** Кореляційне поле теоретичних пар даних згідно Інструкції [20]

Вибір оптимального варіанта котла можна провести, використовуючи індекс привабливості, який обчислюється шляхом підсумовування вагових коефіцієнтів  $KE$ . Порівняння та визначення відхилень для кожного котла від цільового значення еталону отримують шляхом перемножування значень вагових коефіцієнтів, внаслідок чого отримують Індекс пропорційності.

Таким чином, запропонована система оцінки ефективності дозволяє визначити узагальнені інтегральні показники кожного котла, на підставі яких можна з достатньою мірою об'єктивності судити про їх ефективність. Результати інтегральної оцінки, а також графічна ілюстрація ефективності дають можливість виявити недоліки функціонування і розробити заходи, що дозволяють направити зусилля на усунення недоліків (рис. 3, 4).



**Рис. 3.** Кореляційне поле згідно розрахунків ККД та коефіцієнта витрати палива



**Рис. 4.** Кореляційне поле пар даних: коефіцієнт використання палива, м³/Гкал та CO₂, % при розрідженні за котлом  $\Delta P=3,5$  Па на номінальній потужності

Як видно з рис. 3, 4, котлам торгових марок Лемакс та МІМАКС притаманні найвищі витрати палива та найнижчий ККД, найкращі показники має котел фірми АТЕМ. Найкращі екологічні показники при розрідженні за котлом

$\Delta P=3,5$  Па на номінальній потужності у котлах торгової марки АТЕМ і МІ-МАКС, найгірші у котлах Данко, АТОН і Термобар.

## 6. Результати досліджень

Дослідження проводилося за традиційною методикою та наступною апробацією метода «ЗЕ». В результаті рішення  $N=7$  оптимізаційних завдань нелінійного математичного програмування методом АСФ зроблено висновок, що усі дані сім котлів є ефективними ( $h=1$ ).

Для ранжирування даної безлічі критеріїв по мірі важливості для визначення рейтингу котлів застосовувався МАІ.

Для порівняння ефективності котлів, що були досліджені та визначення оптимальних показників було проведено кореляційно-регресійний аналіз опорної таблиці згідно з Інструкцією [20], представленої на рис. 2 та даних отриманих шляхом проведення замірів (рис. 3).

Маючи 19 пар даних з Інструкції [20], встановлюємо форму зв'язку між даними та будуємо кореляційне поле (точковий графік, з'єднаний у порядку спадання прямими лініями) і отримуємо регресійну лінію, що може бути описана поліномом.

У даному випадку бачимо просту залежність, що може бути легко описана функцією. При цьому коефіцієнт кореляції для поля значень згідно Інструкції:  $r_l = -0,99$ . Таким чином, теоретичний показник ККД бруто котлів залежить від кількісної зміни витрат умовного палива на 99 %.

Будуємо кореляційне поле згідно проведених замірів та розрахунків на діючих котлах (табл. 3).

**Таблиця 3**

Основні розрахункові показники для проведення оцінки досліджуваних котлів

Котельний агрегат	ККД, за прямим балансом, %	Коефіцієнт використання палива, м <sup>3</sup> /Гкал	CO <sub>2</sub> , % при розрідженні за котлом $\Delta P=3,5$ Па на номінальній потужності
АТОН АОГВМ-12 ЕМ	88,31	162,36	3,3
ДС ЛЕМАКС Преміум 12,5	81,2	161,28	3,8
АТЕМ «Житомир 3» КСГ 012 СН	92,18	147,6	6,8
Siberia 2210-012 исп. 3 Siberia 11	86,7	159,69	3,6
Danko Данко-12СР	86,3	154,8	1,9
Термобар КС-Г-12,5	88,2	164,88	3,1
МІМАКС КСГ-12,5	84,6	163,08	8,8

Коефіцієнт кореляції для поля значень згідно вимірів і розрахунків ККД котла та коефіцієнта витрати палива:  $r_l = -0,55$ . При цьому зберігається зворотна

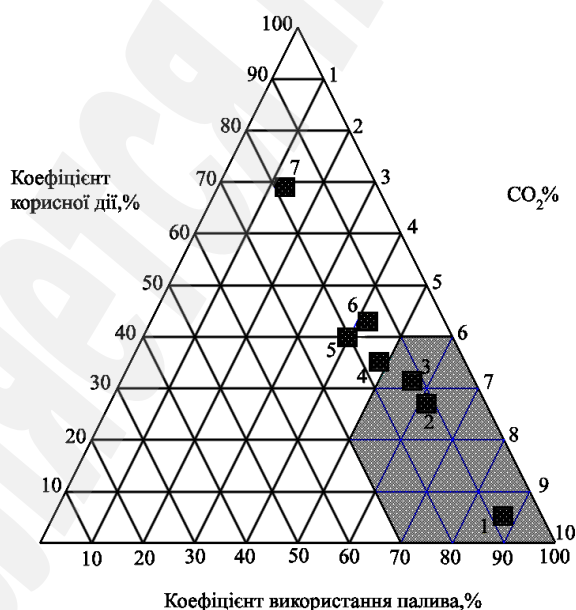
пропорційність, але залежність лише 55 %. Це значно відрізняється від даних, що приведені на рис. 2. Таким чином 45 % має вплив інших факторів на ККД.

Проведемо кореляційно-регресійний аналіз показників витрати палива та вмісту  $\text{CO}_2$  (рис. 4). Як видно з рис. 4, найбільш наближені до еталону залежності витрат палива від ККД котли ЛЕМАКС, МІМАКС та SIBERIA. Котли торговельних марок АТОН, ДАНКО, Термобар та АТЕМ випадають з кореляційного поля.

Коефіцієнт кореляції для поля значень коефіцієнта витрати палива та вмісту  $\text{CO}_2$ :  $r = -0,14$ . Таким чином, залежність між даними показниками майже відсутня, при цьому викликає складність підбір такої апроксимуючої функції, щоб значення її знаходились достатньо близько від значень згідно замірів та розрахунків.

Для отримання узагальненої комплексної оцінки ефективності в проведеній роботі використовується непараметричний метод багатовимірної аналізу, який поєднує в собі метод бальних оцінок і метод багатовимірних порівнянь. Цей метод є досить простим у використанні, але водночас, оцінки, отримані в результаті його застосування, адекватно відображають систему, що вивчається, і дають корисну і важливу інформацію про досліджувані об'єкти. Суть пропонованої методики комплексної оцінки ефективності котлів полягає в порівнянні фактичних показників з показниками еталону, і показниками котлів, що мають гірші значення.

Апробація за методом «3Е» дозволяє отримати більш реальну картину, яка ґрунтується на трьох якірних показниках ефективності. Отже, на основі прийнятих довірчих інтервалів та побудові довірчого поля з'являється можливість графічного відображення рейтингу котлів (рис. 5).



**Рис. 5.** «3Е» діаграма багатокритеріальної оцінки котлів по коефіцієнту корисної дії, коефіцієнту використання палива та диоксиду вуглецю: 1 – АТЕМ; 2 – Термобар; 3 – АТОН; 4 – Siberia; 5 – Лемакс; 6 – Данко; 7 – МІМАКС

Проведемо аналіз даних за допомогою авторського багатокритеріального методу «3Е» для визначення, які з проаналізованих котлів відповідають заданим критеріям. Для цього в межах трикутної діаграми побудуємо поле довірчих значень, яке визначається за допомогою алгоритму, описаного у розділі 5 та

табл. 2. На рис. 5 приведено результат використання експрес-аналізу «3Е», згідно з яким у полі довірчих інтервалів знаходяться три котлоагрегати виробників АТЕМ, Термобар та АТОН. Таким чином, використовуючи багатокритеріальний аналіз визначено оптимальні значення показників кожного з котлів та за короткий час проведено ранжування афектів котлоагрегатів.

Наочно видно, що тільки три з котлів, а саме котли 1 – АТЕМ, 2 – Термобар, 3 – АТОН відповідають стандартам якості та ефективності, найгірші показники у котла 7 – Мімакс, інші три котли також не відповідають сучасним вимогам.

## **7. SWOT-аналіз результатів досліджень**

*Strengths.* «3Е» метод дозволяє з високою точністю та у короткий час проводити багатокритеріальний аналіз складних систем та обладнання, що зазвичай є неможливим, використовуючи стандартні статистичні підходи та методи математичного моделювання. Таким чином, даний метод є важливим інструментом енергоменеджменту підприємств для прийняття стратегічних рішень.

*Weaknesses.* На результат експрес-аналізу впливає точна побудова меж довірчого інтервалу.

*Opportunities.* Запропонований експрес-аналіз може бути застосований в інших галузях виробництва. Застосування методу «3Е» абсолютно не залежить від сфери діяльності, в якій приймається рішення. Результати апробації методу «3Е» свідчать про доцільність його подальшого застосування.

Варіативність та гнучкість даного методу досягається можливістю змінювати основні критеріальні показники, а також поле оптимальних значень. При багатокритеріальному аналізі кожен з критеріїв ефективності набуває конкретного кількісного значення, що дозволяє використати результати розрахунків в процесі ухвалення рішень. Подальший розвиток методу «3Е» потребує проведення апробації на підприємствах середнього та великого бізнесу, державних установах, в оборонній галузі для вдосконалення та уніфікації алгоритмів створення поля оптимальних значень для прийняття правильного рішення. Даний підхід може бути використаний як інструмент маркетингових досліджень при вирішенні задачі просування нового продукту або послуги на ринку та визначенні його конкурентоспроможності.

*Threats.* В окремих випадках при обмеженні доступу до вірогідної інформації щодо продукту виробництва або послуги можливе виникнення похибки при визначенні меж поля оптимальних значень.

## **8. Висновки**

1. При проведенні технологічного аудиту, на основі натурних дослідів та подальших розрахунків, з використанням методу зворотного та прямого балансу були виявлені кількісні показники семи водогрійних котлів типу АОГВ. Згідно з них найвищий енергетичний показник, а саме ККД за прямим балансом у котла фірми АТЕМ складає 92,18 %, найнижчий ККД=81,2 % у котла фірми ЛЕМАКС, та інші п'ять котлів також не відповідають нормативним вимогам. За економічним критерієм, а саме коефіцієнтом використання палива, найкращий показник отримав котел фірми АТЕМ, КВП=147,6 м<sup>3</sup>/Гкал, найгірший показ-

ник, за цим ж критерієм, у котла фірми Термобар, КВП=164,88 м<sup>3</sup>/Гкал. За екологічним критерієм найкращий показник у котла фірми МІМАКС (СО<sub>2</sub>=8,8 %), найгірший у котла фірми Danko (СО<sub>2</sub>=1,9%). На основі цього зроблено висновок, що проведення порівняльного аналізу ефективності потребує додаткових досліджень і розробки нових методів багатокритеріальної оцінки.

2. Аналіз ефективності котлів методом сум та ранжування афектів показують, що котел фірми АТЕМ знаходиться на першому місці, котли фірм ЛЕМАКС і Siberia ділять п'яте місце. Кореляційно-регресивний метод порівняння показників ККД, витрат палива та вмісту СО<sub>2</sub> в димових газах показує, що котлам торгових марок Лемакс та МІМАКС притаманні найвищі витрати палива та найнижчий ККД. Найкращі показники має котел фірми АТЕМ. Найкращі екологічні показники на номінальній потужності у котлах торгової марки АТЕМ і МІМАКС, найгірші у котлах Данко, АТОН і Термобар. Результати отримані за цими двома методами не збігаються з результатами технологічного аудиту, тому складна залежність між показниками ефективності не може бути повною мірою коректно визначена за допомогою відомих методів аналізу. Результати отримані при апробації методу «3Е» дозволяють одержати більш реальну та коректну оцінку ефективності. Експрес-метод «3Е» продемонстрував, що тільки котли торгових марок АТЕМ, ТЕРМОБАР та АТОН відповідають усім сучасним вимогам за всіма критеріями ефективності.

## Література

1. Демченко В. Г. Проведення експериментальних тепло-екологічних випробувань та порівняльних розрахунків водогрійних котлів, що працюють на газовому паливі: технічний звіт. URL: <https://atem.ua/files/Reklama/%D0%9E%D1%82%D1%87%D0%B5%D1%82%20%D0%9D%D0%90%D0%9D%20%D1%83%D0%BA%D1%80%D0%B0%D0%B8%D0%BD%D1%8B%20%D0%BE%20%D0%BA%D0%BE%D1%82%D0%BB%D0%B0%D1%85%200002.pdf> (дата звернення: 15.04.2018).
2. Кузнецов Н. В. и др. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод). 2-е изд., перераб. М.: Энергия, 1973. 296 с.
3. Методическое пособие по проведению комплексных эколого-теплотехнических испытаний котлов, работающих на газе и мазуте / под ред. Сигала И. Я. Киев: ВНИПИТрансгаз, ротاپринт, 1992. 213 с.
4. Требования по эффективному использованию природного газа и охране окружающей среды при проведении наладочных работ топливоиспользующего оборудования. Киев: Госкомнефтегазпром, 1995.
5. ГДК 34.02.305-2002. Викиди забруднюючих речовин в атмосферу від енергетичних установок. Методика визначення. Чинний від 01.07.2002. Київ, 2002.
6. Saaty T. L. Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process. Rws Publications, 2001. 370 p.
7. Беляев И. П. Основы теории принятия решений. М.: МГСУ, 2005. 275 с.
8. Андрейчиков А. В., Андрейчикова О. Н. Анализ, синтез, планирование решений в экономике. М.: Финансы и статистика, 2004. 464 с.

9. Демченко В. Г. Багатокритеріальна оцінка заходів по оптимізації споживання теплової енергії // Сборник трудов XXVI международной конференции «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики», 20–24 сентября 2017, г. Одесса. С. 53–56.

10. Saaty T. L. Relative measurement and its generalization in decision making why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors the analytic hierarchy/network process // Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Fisicas y Naturales. Serie A. Matematicas. 2008. Vol. 102, Issue 2. P. 251–318. doi: <https://doi.org/10.1007/bf03191825>

11. Banker R. D., Charnes A., Cooper W. W. Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis // Management Science. 1984. Vol. 30, Issue 9. P. 1078–1092. doi: <https://doi.org/10.1287/mnsc.30.9.1078>

12. Cooper W. W., Seiford L. M., Tone K. Data Envelopment Analysis. A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software. 2nd ed. Springer-Verlag, 2007. doi: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-45283-8>

13. Drake P. R. Using the Analytic Hierarchy Process in Engineering Education // International Journal of Engineering Education. 1998. Vol. 14, Issue 3. P. 191–196.

14. Hallowell D. L. Analytical Hierarchy Process (AHP) – Getting Oriented. URL: <https://www.isixsigma.com/tools-templates/analytic-hierarchy-process-ahp/analytical-hierarchy-process-ahp-%E2%90%93-getting-oriented/>

15. Саати Т. Л. Об измерении неосязаемого. Подход к относительным измерениям на основе главного собственного вектора матрицы парных сравнений // Cloud Of Science. 2015. Т. 2, № 1.

16. Саати Т. Л. Относительное измерение и его обобщение в принятии решений. Почему парные сравнения являются ключевыми в математике для измерения неосязаемых факторов // Cloud Of Science. 2016. Т. 3, № 2. С. 171–262.

17. Демченко В. Г., Трубачев А. С. Експрес-аналіз доцільності проведення енергозберігаючих заходів // The scientific method. 2018. № 20. С. 74–77.

18. Демченко В. Г., Трубачев А. С., Фалько В. Ю., Гронь С. С. Мобільні акумулятори для дискретних систем теплохолодопостачання. Частина 2 // Промислова теплотехніка. 2018. Т. 40, № 3. С. 56–68.

19. Межотраслевые нормы расходов топлива для отопительных котлов, которые эксплуатируются в Украине: Приказ Госкомэнергосбережения № 46 от 07.05.2001 г.

20. Звіт про постачання теплоенергії: Інструкція щодо заповнення форми державного статистичного спостереження N 1-теп. Затверджено наказом Державного комітету статистики України від 17.08.2004 р. N 482. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 31.08. 2004 р. за N 1079/9678.