

© В.Є. Колесник¹, А.В. Павличенко¹, І.В. Монюк¹

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

**ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРАХУНКОВОГО МЕТОДУ ОПЕРАТИВНОГО
ВИЗНАЧЕННЯ ПОТОЧНИХ ВИКИДІВ МІСЬКИХ КОТЕЛЕНЬ,
ПОКАЗНИКІВ ЇХ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА СТУПЕНЯ
ЕКОЛОГІЧНОЇ НЕБЕЗПЕКИ**

© V. Kolesnyk¹, A. Pavlychenko¹, I. Moniuk¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

**RATIONALE OF THE CALCULATED METHOD OF OPERATING
DETERMINATION OF CURRENT EMISSIONS OF DISTRICT BOILERS,
THEIR INDICATORS OF THEIR ENERGY EFFICIENCY AND THE
DEGREE OF ENVIRONMENTAL HAZARD**

Мета. Обґрунтування розрахункового методу оперативного визначення поточних викидів міських котелень в атмосферу впродовж опалювального сезону з оцінкою енергетичної ефективності використання палива та ступеню екологічної небезпеки викидів.

Методика дослідження передбачає критичний аналіз існуючої розрахункової методики визначення викидів в атмосферу з енергетичних установок; дослідження динаміки температури атмосферного повітря в опалювальному сезоні; математичне моделювання для обґрунтування методу оперативного визначення викидів котелень, їх енергоефективності та ступеня екологічної небезпеки.

Результати дослідження. Проаналізовано особливості систем централізованого теплопостачання та існуючі методи розрахунку величин викидів забруднюючих речовин енергетичними установками, а також статистичні дані про температуру атмосферного повітря в опалювальному сезоні. Виявлено закономірності впливу температури повітря на споживання палива котельнями та їх викиди. Встановлено залежності для оперативного визначення поточних викидів міських котелень та показники (індекси) енергетичної ефективності використання палива та ступеня екологічної небезпеки їх викидів.

Наукова новизна полягає у використанні запровадженого авторами показника (індексу), який одночасно характеризує кратність перевищення поточних витрат палива та відповідних поточних викидів забруднюючих речовин котельнею відносно їх відлікових (опорних) значень, розрахованих одноразово на початку опалювального сезону при температурі атмосферного повітря близько 8°C, що дозволило оперативно визначати поточні викиди забруднюючих речовин котельнею й оцінювати їх енергоефективність та ступінь екологічної небезпеки викидів.

Практичне значення. Отримані розрахункові залежності і показники пропонуються використовувати для подальшого визначення ступеня екологічної небезпеки міських котелень сезонного типу не вдаючись до вимірювань їх викидів.

Ключові слова: екологічна небезпека систем теплопостачання, методи визначення викидів забруднюючих речовин котельнями, енергетичні установки, енергоефективність котелень.

Вступ. Міські котельні, незалежно від того, на якому паливі вони працюють – газі, мазуті, вугіллі, паливних пелетах тощо, в опалювальний сезон є джерелом забруднення міської атмосфери екологічно небезпечними речовинами, що виносяться в атмосферу разом з димовими газами. Серед них: оксид вуглецю (CO),

оксиди азоту (NO_x), діоксид сірки (SO_2), що можуть контролюватися вимірювальними приладами, а також пил (у вигляді золи виносу та частинок сажі), вміст якого визначають переважно ваговим методом шляхом відбору проб на аерозольні фільтри, та важкі метали у вигляді аерозолів, визначення вмісту яких потребує хімічного аналізу проб атмосферного повітря. Очевидно, що утворення викидів котелень, обумовлено видом палива, умовами його згоряння в топці котлоагрегатів, наявністю органічних або мінеральних складових, чи засобів вловлювання забруднювачів певного типу. Причому особливість котелень, в тому числі і міських сезонного типу, полягає в тому, що з поступовим сезонним похолоданням підвищується споживання палива, а відповідно зростають викиди забруднюючих речовин в атмосферу. Забруднювальні речовини розсіюються в приземному шарі атмосфери, являючи екологічну небезпеку не тільки для атмосферного повітря, але й для ґрунту, водойм і біоти. В результаті, знижується рівень екологічної безпеки певних мікрорайонів та міста в цілому.

Актуальність досліджень. Валові викиди екологічно небезпечних речовин, що виносяться разом з димовими газами із труб котелень, якщо не проводяться їх виміри, розраховують на основі діючих нормативних документів [1, 2]. Отримані значення використовують для визначення поквартального податку на викиди, а також оцінки ступеня небезпеки забруднення атмосфери, що оцінюється за кратністю перевищення нормативних показників над рівнем допустимого забруднення (ПДЗ), відповідно до стандартизованої методики [3] або за величиною індексів забруднення атмосфери, котрі враховують ще й клас небезпеки речовин.

Слід зазначити, що поточні середньодобові концентрації забруднювачів постійно змінюються в ході опалювального сезону, тому суттєво відрізняються від розрахованих значень, осереднених за певний період, наприклад квартал. Відповідно буде змінюватися ступінь небезпеки забруднення атмосфери. Таким чином, набуває актуальності оперативний контроль за викидами котелень, необхідний для визначення поточного рівня екологічної безпеки міських територій, обумовленого цими викидами.

Регулярне одержання поточних середньодобових викидів або концентрацій забруднювачів атмосфери вимагає організації постійно діючих постів спостереження, обладнаних відповідними вимірювальними приладами, що, економічно виправдано, на наш погляд, лише в системах централізованого теплозабезпечення переважно з потужністю котлоагрегатів >50 МВт і навіть >300 МВт, що зазвичай є джерелами викидів майданного типу. Щодо систем централізованого теплозабезпечення меншої потужності, зокрема міських котелень, димові труби які є практично точковими джерелами, то для визначення їх викидів доцільно використовувати опосередковані показники роботи котелень, в першу чергу, витрати палива або поточну теплову продуктивність, що реєструються щодоби у встановленому порядку, наприклад, за показанням лічильників газу чи тепла. При цьому, аналізуючи динаміку указаних показників можна визначити показники викидів забруднювачів в атмосферу, не вдаючись до вимірів їх поточних значень або концентрацій, як певною мірою вже пропонувалось авторами в роботах [4, 5]. Тому **метою роботи** стало обґрунтування розрахункового методу

оперативного визначення поточних викидів (емісії) забруднювачів, що надходять в атмосферу разом з димовими газами міських котелень сезонного типу, за інтенсивністю добових витрат палива котлоагрегатами з одночасною оцінкою енергетичної ефективності використання палива та ступеня екологічної небезпеки викидів.

Основні результати. Для досягнення поставленої мети спочатку коротко проаналізуємо основні нормативні чинники, котрі впливають на викиди забруднюючих речовин котлоагрегатами, що надходять в атмосферу з димових труб котелень, відповідно до діючих нормативних методик [1, 2], що, до речі, прийшли на заміну галузевої методики (від 1984 р.) визначення викидів, в тому числі котельнями, за питомими показниками.

Отже, згідно з указаними діючими методиками валовий викид (специфічний показник емісії) j -ої забруднюючої речовини E_j , що надходить в атмосферу з димовими газами котельні за проміжок часу T , визначається як сума валових викидів цієї речовини під час спалювання різних видів палива, в тому числі під час їх одночасного спільного спалювання за формулою:

$$E_j = \sum_i E_{ji} = 10^{-6} \sum_i k_{ji} B_i (Q_i^r)_i, \text{ т} \quad (1)$$

де k_{ji} – показник емісії j -ої забруднюючої речовини для i -го палива, г/ГДж; B_i – витрати i -го палива за проміжок часу T , т; $(Q_i^r)_i$ – нижня робоча теплота згоряння i -го палива, МДж/кг.

Очевидно, що при $i=1$, тобто при спалюванні одного виду палива (наприклад, природного газу), знак \sum_i опускається і вираз спрощується:

$$E_j = 10^{-6} \cdot k_j \cdot B_i \cdot Q_i^r, \text{ т.} \quad (2)$$

Аналіз значимості і мінливості трьох основних показників, що входять до указаної залежності за інформацією, наведеною в [1, 2], та детально виконаний авторами на прикладі спалювання енергетичного вугілля [4, 5], показав наступне. Коефіцієнт емісії – k_j певних газоподібних забруднювачів, твердих частинок та важких металів, специфічних для кожного виду палива, що викидаються у складі димових газів залежить переважно від запроєктованих конструктивних і технологічних особливостей певних котлоагрегатів котельні, ефективності очищення димових газів, взаємодії застосовуваних сорбентів з газами чи частинками тощо, тобто є практично сталим для певної котельні та виду палива принаймні на період опалювального сезону. Нижня робоча теплота згоряння i -го палива – Q_i^r обумовлена як видом палива, так і наявністю різних органічних домішок [1, 2]. Цей параметр, хоч і може змінюватися, але суттєво лише при зміні виду палива, залежно від його теплотворної здатності або технології спалювання, тому його теж можна вважати цілком сталим для певної котельні впродовж опалювального сезону. Залишається показник витрати палива – B_i за певний проміжок часу T . Зазвичай цей показник реєструють в журналах котелень щодоби, а, зокрема, в умовах автоматизованих котелень надходить з контролера лічильника газу на комп'ютер у вигляді таблиць. Як буде показано нижче, він динамічно змінюється

впродовж всього опалювального сезону, а його поточні величини суттєво (часто в рази) відрізняються від середніх або мінімальних значень, обумовлюючи значну мінливість викиду забруднюючих речовин котельнею в атмосферу.

Таким чином, валовий викид j -ої забруднюючої речовини – E_j , що надходить в атмосферу з димовими газами котельні, однозначно визначається витратами палива – V_i при практично мало мінливих значеннях інших показників впродовж одного опалювального сезону, а динаміка викидів забруднюючих речовин в атмосферу буде повторювати динаміку витрати палива котельнею. Тому можна отримати розрахунковим шляхом показники динаміки викидів забруднювачів, не вдаючись до вимірювань їх поточних значень.

Для обґрунтування цього положення авторами виконано аналіз динаміки витрати палива на прикладі споживання природного газу міською котельнею сезонного типу з максимальною потужністю близько 10 МВт, що виробляє теплову енергію для обігріву будинків (Тепловий район №1 Соборного району міста Дніпро). Відповідний щодобовий динамічний ряд витрати палива (природного газу) указаною котельнею впродовж опалювального сезону представлений на рис. 1.



Рис. 1. Динамічний ряд добової об'ємної витрати природного газу міською котельнею (V_i) впродовж опалювального сезону

Як видно з рис. 1, поточні витрати палива котельнею суттєво змінюються впродовж опалювального сезону. Очевидно, їх збільшення або зменшення приведе до відповідного збільшення або зменшення поточних викидів оксиду вуглецю (CO) та оксидів азоту (NO_x), а також важкого металу – ртуті (Hg), тобто забруднювачів, характерних для природного газу. Причому, згідно з формулою (2), за поточними добовими витратами палива – V_i можна визначити розрахунковим шляхом поточні щодобові викиди указаних забруднювачів – E_j , враховуючи необхідні коефіцієнти чи параметри відповідно до умов досліджуваної котельні. Отриманих таким шляхом даних достатньо, для розрахунку податку на викиди, що традиційно визначається за їх середніми значеннями за місяць чи квартал.

Проте в умовах типових міських котельень такому способу отримання поточних даних про викиди, хоч і без вимірювань, бракує оперативності та недостатньо для одночасного оцінювання ефективності впровадження як ресурсозберігаючих технологій в котельнях, так і технологій захисту атмосфери від їх викидів. Отже на основі аналізу наведеного на рис. 1 динамічного ряду споживання палива варто пошукати певні закономірності цього процесу, що здатні забезпечити досягнення поставленої в роботі мети.

Аналіз наведеного динамічного ряду в цілому указує на його стохастичний характер, тобто залежність від випадкових чинників. Між тим, очевидна певна залежність витрати палива від сезонних змін температури атмосферного повітря, що, як указано у вступі, притаманна всім котельням. Отже з'являється перспектива виявлення впливу температурного чинника на споживання газу та відповідно на викиди забруднюючих речовин котельнею. Тому для виявлення указанного впливу за даними архіву метеорологічних даних по місту Дніпро (статистичні дані метеостанції аеропорту) були визначені середньодобові значення міської температури атмосферного повітря за період, указаний на рис. 1. Практично вдалося визначити достовірні значення температури, починаючи з 21.10.2017 р. по 1.04.2018 р. В результаті, до часового ряду динаміки витрати палива було додано часовий ряд температури атмосферного повітря (рис. 2). Це дозволило порівняти на одній діаграмі обидва ряди, а також їхні тренди (на рис. 2 наведені у вигляді плавних суцільних ліній, що отримані засобами Excel за допомогою поліномів 4-ого степеня), які наочно відображають динаміку як сезонних змін температури атмосферного повітря, так і відповідної витрати природного газу дослідженою котельнею.

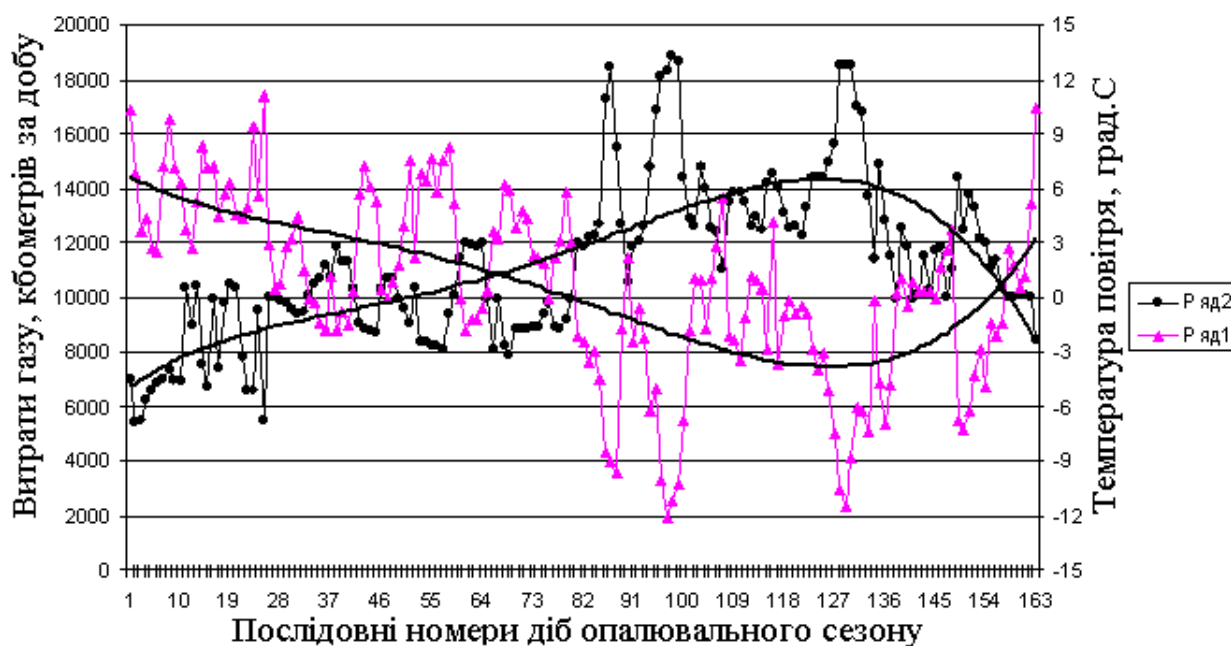


Рис. 2. Порівняльна діаграма динамічних рядів температури атмосферного повітря (ряд 1) та витрати природного газу котельнею (ряд 2) з відповідними трендами у вигляді плавних суцільних ліній

Як бачимо, між наведеними динамічними рядами спостерігається досить тісна парна кореляція від'ємного характеру. Вибором шкали температур (на рис. 2 нанесена праворуч) вдалося побудувати майже дзеркальне відображення обох трендів, що підтверджує залежність витрати палива зворотного характеру від температури атмосферного повітря. Зазначимо, що це цілком очікуваний результат, оскільки сучасні котельні, шляхом регулювання подачі палива в топку котлоагрегатів, забезпечують потрібну компенсацію впливу температури навколишнього середовища на температуру води, що циркулює в опалювальній системі «котельня–споживачі тепла–довкілля». Зміни ж поточної витрати газу котлоагрегатами залежно від температури атмосферного повітря, як зазначалось, ведуть відповідно до прямо пропорційних змін викидів кожної із забруднюючих речовин в атмосферу.

Оскільки виявлена тісна кореляція між розглянутими чинниками, спочатку за наявними даними побудуємо залежність витрати газу від температури атмосферного повітря за середньодобовими даними (рис. 3).

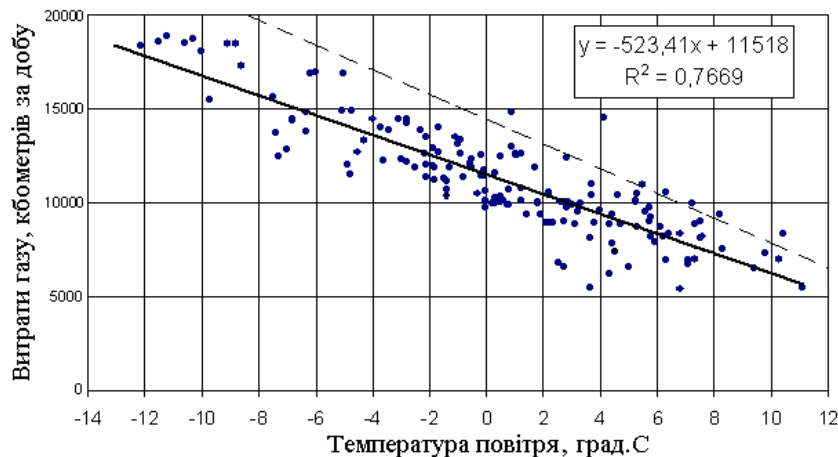


Рис. 3. Залежність витрати природного газу ($y=B_i$) дослідженою котельнею від температури атмосферного повітря ($x=t$)

Отже отримано достатньо достовірну залежність указаних змінних у вигляді лінійного рівняння регресії:

$$B_i = -523,41t + 11518, \text{ м}^3/\text{доб.}, R^2 = 0,7669. \quad (3)$$

Очевидно, що для котелень більшої потужності залежність проходитиме вище та буде мати збільшену крутизну, як показано пунктиром на рис. 3, або у разі меншої потужності, навпаки, – нижче і з меншою крутизною, тобто поточні значення витрати палива – B_i , що відповідають певній температурі, будуть більшими або меншими пропорційно потужності котлоагрегатів. Між тим, практична користь отриманої математичної моделі у вигляді рівняння регресії (3) полягає у можливості отримання на її основі нормованої залежності витрати палива котельнею від температури атмосферного повітря. Нормована ж залежність, тобто безрозмірна, як буде показано нижче, може бути застосована не тільки для дослідженої котельні, але й для інших міських котелень різної потужності, з іншими видами палива та особливостями технології його спалювання.

Нормування значень витрати палива котельнею будемо проводити з урахуванням можливості оперативного розрахункового визначення поточних викидів (емісії) забруднюючих речовин, результати яких необхідні в подальшому, з одного боку, для визначення поточного рівня екологічної безпеки міських територій, обумовленого цими викидами, а з іншого, – для оцінювання ефективності впровадження енергозберігаючих та природозахисних технологій в системі «котельня – споживачі тепла – довкілля».

Зазвичай для нормування поточних значень використовують максимальні, середні, мінімальні або інші відносно сталі значення спостережуваних змінних, що характерні для певного процесу. Отже, для побудови нормованої залежності на основі регресійної моделі (3) потрібні певні значення витрати палива, що характерні для кожної котельні, відносно яких і варто було б проводити нормування усіх поточних значень V_i .

Нескладний аналіз показує, що вибір максимальної витрати палива як нормуючого значення не є доцільним, оскільки ця витрата залежить від найнижчих температур, яку на початку опалювального сезону навіть неможливо передбачити. Так, за даними, наведеними на рис. 3, при -10°C маємо витрату палива $16572 \text{ м}^3/\text{доб.}$, а при -14°C вже $18845 \text{ м}^3/\text{доб.}$

Середнім значенням витратам палива притаманний аналогічний недолік, хоча й в меншій мірі. Очевидно, що вони зв'язані з середньою температурою атмосфери впродовж усього опалювального сезону, тому їх значення з відповідною варіацією зазвичай враховують під час проектування котельні та номінальної потужності котлоагрегатів. Так, середня об'ємна витрата палива (природного газу) та її варіація для дослідженої котельні в опалювальному сезоні склали $11152 \pm 2948 \text{ м}^3/\text{добу}$, тобто відносне відхилення значень поточних витрат палива від середніх сягає $\pm 26\%$, що відповідає виробленій тепловій енергії $374 \pm 99 \text{ ГДж/добу}$ та потужності $4,32 \pm 1,14 \text{ МВт}$, тобто близько $5,5 \text{ МВт}$. Указані середні значення за кожний квартал опалювального сезону також дозволяють розрахувати валові викиди забруднюючих речовин котельнею, за величиною яких визначають податок на викиди котельні. Отже робимо висновок, що середні значення витрати палива більш актуальні для визначення саме податку на викиди котельні, а не для оперативного контролю за викидами та визначення поточного рівня екологічної безпеки міських територій, обумовленого цими викидами.

Щодо нормування V_i відносно мінімальної витрати палива, зауважимо, що мінімум витрат спостерігається переважно на початку опалювального сезону, а саме це і є важливим для оперативного розрахункового визначення наступних поточних значень викидів забруднювачів котельнею за відповідними добовими витратами палива без щодобових вимірювань величини викидів. До того ж, за існуючою нормою опалювальний сезон розпочинають тоді, коли середньодобові температури стають нижче 8°C . Тому саме при цій позитивній температурі варто визначати відлікове значення витрати палива, що буде характерними для кожної котельні сезонного типу. Таке значення фактично відповідає мінімальній витраті палива котельнею, а значить, забезпечує і мінімальні викиди забруднюючих речовин в атмосферу, тобто при температурі 8°C одночасно будемо мати відлікове

(опорне) значення викидів кожної із забруднюючих речовин. Отже, в рамках задач, що відповідають поставленій меті, доцільно нормувати поточні величини V_i відносно значення витрати палива при температурі 8°C .

Згідно з рівнянням регресії, наведеним на рис. 3, температурі 8°C , з високою достатністю відповідає значення витрати палива дослідженою котельнею: $V_{8C}=7730,72 \text{ м}^3/\text{доб.}$, котре обираємо як відлікове, відносно якого й виконаємо нормування усіх поточних величин V_i . Відповідний нормований графік наведено на рис. 4.

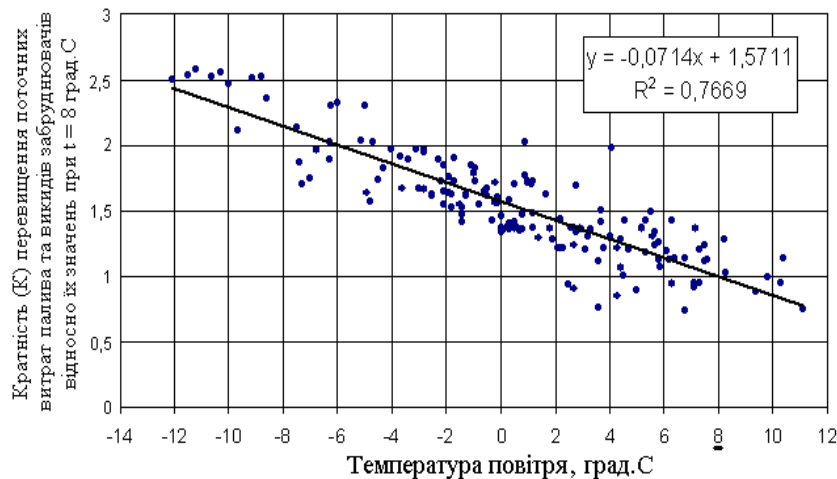


Рис. 4. Залежність від температури атмосферного повітря ($x=t$) значень кратності ($y=K$) перевищення поточних витрат палива та одночасно відповідних поточних викидів забруднюючих речовин котельнею відносно відповідних нормуючих величин, визначених при температурі 8°C , що позначена на вісі абсцис рисою

Таким чином, виявлено певну закономірність в роботі міських сезонних котелень у вигляді залежності від температури атмосферного повітря (t) значень кратності (K) перевищення як поточних витрат палива, так одночасно й відповідних поточних викидів забруднюючих речовин, оскільки, виходячи із залежності (2), при сталих значеннях k_i та Q_i^r маємо поточні кратності: $K_i=V_i/V_{8C}=E_j/E_{j8C}$, звідки шукана величина поточних викидів кожної j -ої забруднюючої речовини складе: $E_j=K_i \times E_{j8C}$ При цьому важливо на початку опалювального сезону одноразово достовірно визначити спочатку значення V_{8C} , а потім відповідні значення E_{j8C} .

Наведена на рис. 4 залежність представляється лінійним рівнянням регресії:

$$K_i=-0,0714 t+1,5711 \quad (4)$$

Зазначимо, що ця залежність, хоч і подібна, наведеній на рис. 3, але подана у безрозмірному вигляді по осі ординат, де температурі 8°C відповідає кратність $K_{8C}=1$, а при $t=0^\circ\text{C}$ – $K_{0C}=1,5711$. Характерно, що поточна величина K_i лінійно залежить в явному вигляді лише від середньодобової температури атмосфери – t та може змінюються впродовж опалювального сезону від 0,8 при $+10^\circ\text{C}$ до приблизно 3,0 при негативній температурі -18°C . Причому з рівняння (4) впливає, що температурний коефіцієнт зміни показника K складає $\alpha =-0,0714$, град. $^{-1}$, та

виглядає достатньо сталим, отже його округлену величину $\alpha = -0,07$, град.⁻¹, на наш погляд можна прийняти як типову для котельень сезонного типу.

Таким чином, кратність K можна прийняти в якості універсального критерію оцінювання як енергетичної ефективності витрат палива котельнею, так і ступеню екологічної небезпеки кожної забруднюючої речовини, що викидається в атмосферу. В результаті, для визначення поточного значення викиду (емісії) кожної j -ої забруднюючої речовини достатньо однократно на початку опалювального сезону визначити величину E_{j8C} , за відповідним значенням B_{8C} , та помножити її на поточну величину кратності K_i , що, є функцією температури атмосферного повітря, але відповідає поточному значенню B_i , визначеному в умовах певної котельні.

На практиці, за отриманими запропонованим розрахунковим шляхом поточними викидами так само, як і за вимірними значеннями, легко розрахувати середні валові викиди певної забруднюючої речовини котельнею за будь-який проміжок часу T , що передує моменту визначення наступної добової величини B_i в поточному опалювальному сезоні, в тому числі, впродовж попереднього кварталу, що, зокрема, необхідно для розрахунку квартального податку на викиди. До того ж, є можливість визначати викиди на часових проміжках, коли спостерігаються найнижчі температури повітря та відповідно й найбільші екологічно небезпечні рівні викидів забруднюючих речовин котельнею в атмосферу.

Безрозмірну величину K доцільно використати як показник (індекс) споживання палива й одночасно – викидів забруднюючих речовин котельнями, тобто, якщо $K_i = B_i/B_{8C}$, маємо індекс енергетичної ефективності котельні, а як $K_i = E_j/E_{j8C}$ – індекс, що визначає ступінь екологічної небезпеки викидів. Це дозволить, зокрема, характеризувати ефективність впровадження ресурсозберігаючих технологій в міських котельнях, а також ефективність інноваційних технологій захисту атмосфери від викидів, за ступенем зниження цього індексу, порівняно з його попереднім значенням в аналогічних умовах, наприклад, при певній температурі.

Зазначимо, що показник температури в умовах більшості існуючих котельень не завжди є достатнім аргументом для регулювання температури обігрівної води, оскільки в цілях економії палива часто знижують його витрати або вдень – в жилих помешканнях, або вночі – в адміністративних будівлях. Між тим, існують автоматизовані котельні з модульними котлоагрегатами потужністю 400–600 кВт, в яких подача природного газу автоматично регулюється програмованим контролером саме залежно від зовнішньої температури атмосфери, що вимірюється виносним датчиком. Проте, пам'ятаючи, що рівень викидів визначається рівнем споживання палива, для подальших практичних розрахунків поточної емісії забруднювачів – E_j запропонованим методом доцільно встановити відповідність поточної кратності викидів котельні – K_i поточним витратам палива – B_i або у вигляді графіка, або у вигляді аналітичної формули. Перед тим варто звернути увагу на те, що у формулах (1) чи (2) величина B_i визначається в тонах за певний проміжок часу, тому при розрахунках викидів за рівнянням регресії, наведеним на рис. 3, його слід лінійно перетворити з урахуванням густини природного газу, що зазвичай змінюється у межах від 0,68 до 0,85 кг/м³, в тому числі

й від температури газу, що надходить в топку котлоагрегатів. Наприклад, для середнього значення густини природного газу $0,77 \text{ кг/м}^3$ ($0,00077 \text{ т/м}^3$) отримаємо рівняння у вигляді:

$$B_i = (-523,41t + 11518) \times 0,00077 = -0,4115 t + 8,869, \text{ т/добу}, R^2 = 0,7669.$$

В такому випадку величина $B_{8C} = 7330,8 \text{ м}^3/\text{доб.}$, відносно якої проводилося нормування поточних значень B_i дослідженою котельнею, перетвориться у величину $B_{8C} = 5,6447 \text{ т/доб.}$

На практиці, варто побудувати два графіка відповідності значень кратності перевищення викидів – K_i певним поточним витратам палива – B_i , визначеним або в кубометрах, або в тонах за добу. Графіки легко отримати в пакеті Excel шляхом сполучення вихідних даних, використаних для побудови залежностей, наведених на рис. 3 та 4, тобто вилучивши температурний чинник. В результаті, для кожної розмірності витрати палива, отримуємо два відповідні графіки (рис. 5).

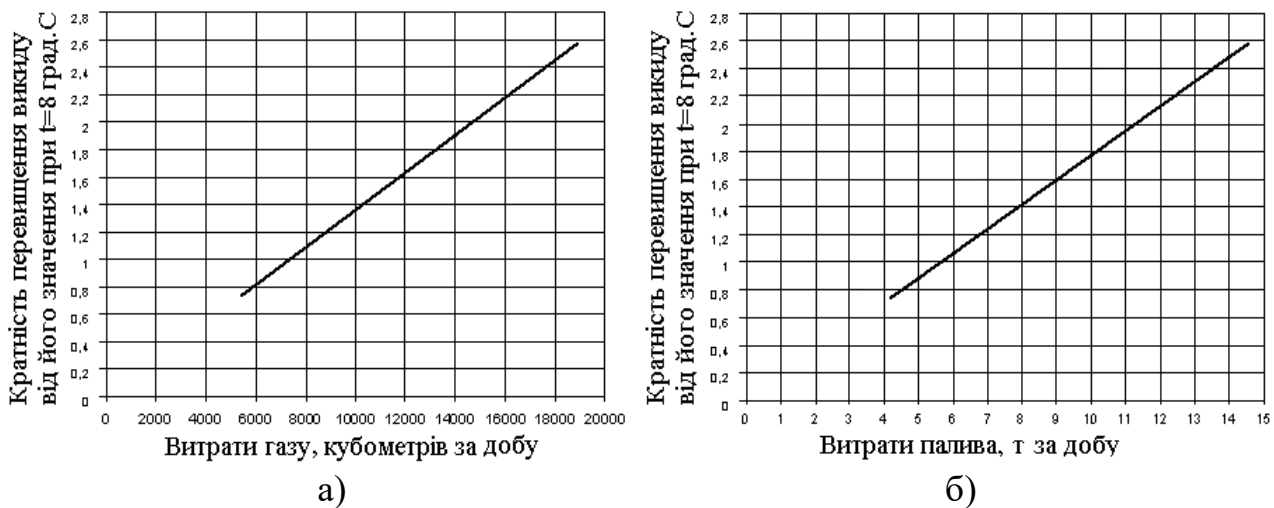


Рис. 5. Графіки відповідності кратності викиду забруднювачів (K_i) добовій витраті палива дослідженою котельнею (B_i), визначеній: а) – в кубічних метрах за добу; б) – в тонах за добу

Наведені графіки для розрахунків витрати палива в кубометрах, або в тонах за добу можна формалізувати, виходячи з первинної суті показника K , у вигляді відповідних рівнянь:

$$K_i = B_i / B_{8C} = B_i / 7330,8 \approx 0,000136 B_i, \quad (5)$$

або

$$K_i = B_i / B_{8C} = B_i / 5,6447 \approx 0,1772 B_i, \quad (6)$$

Проте, графіки виглядають наочніше, ніж формули, та підтверджують достовірність виконаних перетворень в Excel, оскільки для побудованих графіків стандартний показник $R^2 = 1$. Так чи інакше, наведеними моделями зручно користуватися при оперативному оцінюванні кратності перевищення поточних викидів – E_j відносно їх опорних значень – E_{j8C} .

З наведених на рис. 5 графіків або формул (5), (6) випливає, що кратності перевищення викиду ($K_i = E_j / E_{j8C}$) котельнею кожної j -ої забруднюючої речовини, змінюються впродовж опалювального сезону від 0,8 до 2,6 прямо пропорційно

поточним витратам палива – B_i на тому ж інтервалі. Достовірність указаних значень кратності ($K_i = E_j / E_{j8C}$), а значить, і достовірність значень визначених як $E_j = K_i \times E_{j8C}$ викидів є найбільшою в межах витрат палива приблизно від 5000 до 20000 м³ за добу або від 4 до 15 т за добу, проте, у разі необхідності прогнозу викидів, не виключається можливість лінійної екстраполяції в область витрат палива, що виходять за межі наведених діапазонів змінних, оскільки залежність лінійна та ще й виходить з начала координат.

Слід також зазначити, що наведені залежності K_i , від B_i , хоч і отримані для певної дослідженої котельні, але можуть застосовуватися у розрахунках викидів інших котелень сезонного типу з наближеними обсягами споживання палива. На практиці, – з найменшою похибкою для котелень з потужністю котлоагрегатів, аналогічною дослідженій та розміщених в тому ж районі, тобто з аналогічною температурою зовнішнього повітря. Причому, графік на рис. 5 а обирають у разі споживання котельнею природного газу, оскільки його витрати визначають за показаннями лічильника поточного об'єму газу в кубічних метрах за добу, причому показання лічильника потрібно скоректувати з урахуванням температури газу. Графік же, наведений на рис. 5 б, обирають у разі використання твердого палива (мазуту, вугілля, пелет тощо), витрати якого визначають ваговим способом в тонах за добу.

Звертаємо увагу також на те, що діапазон зміни значень K_i , відповідно до (4), визначається лише температурою атмосфери, тобто буде однаковим для всіх котелень, незалежно від їх номінальної потужності (принаймні до 50 МВт) та виду палива, оскільки, згідно з моделями (5) чи (6), зі зростанням потужності прямо пропорційно зростатимуть значення величини B_{8C} та відповідні рівні викидів – E_{j8C} . Це положення ілюструється кількісно-якісною діаграмою, наведеною на рис. 6, де зображено можливе сімейство графіків відповідності кратності викидів (K_i) від зростаючої масової витрати палива (B_i) різними котельнями сезонного типу, що відносяться до класу <50 МВт, в діапазоні змін їх потужності від 400 кВт до 50 МВт.

Примітно, що на рис. 6 значення B_{8C} для кожної котельні відповідатимуть точкам перетину лінії зі значенням кратності $K=1$, з кожним графіком указанного сімейства. Причому для точної ідентифікації графіка, відповідно до потужності котельні, треба визначити величину B_{8C} для певної котельні, нанести це значення на графік, як показано стрілкою на рис. 6, та провести через неї лінію, що виходить з начала координат (на рисунку показана пунктиром). В результаті ідентифікуємо рівняння $K_i = B_i / B_{8C}$, подібно (6), для певної котельні, тобто залежно від її потужності, виду палива та технологічних особливостей.

Залишається до кінця не вирішеним питання визначення значення величини B_{8C} , в тому числі й для котелень, що відрізнятимуться від дослідженої як потужністю, так і видом палива чи технологічними особливостями. Для її розрахункового (теоретичного) визначення скористаємося відомою формулою приведення поточних значень вимірюваних параметрів до нормальної температури [6, с. 14]. Стосовно вирішуваної нами задачі як нормальну температуру приймаємо 8°C.

Тоді формула приведення для показника K , визначеного при дещо іншій температурі – t , матиме вигляд:

$$K_{8C} = \frac{K_t}{1 + \alpha(t - 8)} \quad (7)$$

де K_t – поточні значення K_i при температурі – t ; $\alpha = -0,07, \text{град.}^{-1}$ – запропонований авторами типовий температурний коефіцієнт зміни показника K для міських котелень сезонного типу, визначений авторами, як коефіцієнт регресії рівняння (4).

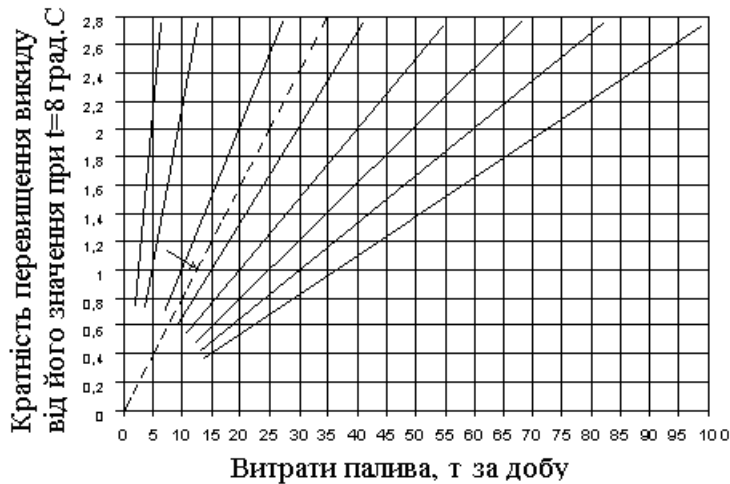


Рис. 6. Можливе сімейство графіків відповідності кратності викидів (K_i) від зростаючої витрати палива котельнями в діапазоні дискретних значень їх потужності від 400 кВт (крайній графік зліва) до 50 МВт

Маючи на увазі, що в умовах поставленої задачі $K_t = B_t / B_{8C}$, а згідно з (4) $K_{8C} = 1$, підставляємо ці значення в (7) та отримуємо вираз для розрахункового значення B_{8C} за величиною B_t , визначеною на початку опалювального сезону експериментально при певній температурі t :

$$B_{8C} = \frac{B_t}{1 + \alpha(t - 8)}, \quad (8)$$

де B_t – поточні значення B_i , що відповідають визначеній температурі – t ,

Зауважимо, що у формулі (8) параметр α виступає вже як температурний коефіцієнт зміни витрати палива котельнею.

На практиці за формулою (8) можна визначити B_{8C} у такий спосіб. На початку опалювального сезону після стабілізації режиму котельні (можливо, впродовж від декількох діб до приблизно двох тижнів) визначають середньодобове значення витрати палива – B_t та середню температуру – t на тому ж інтервалі, наприклад, за показаннями зовнішнього термометра котельні. Підстановкою цих значень у (8) отримаємо шукане значення відлікової величини витрати палива певною котельнею – B_{8C} , що, як зазначалось, залежить від її потужності, виду палива та особливостей технології його спалювання. Наприклад, середньодобове значення витрати палива котельнею номінальною потужністю близько 10 МВт склало $B_t = 19,64$ т/доб., а середня температура $t = 0^\circ\text{C}$. За таких умов, згідно з формулою (8), шукана величина B_{8C} складе:

$$B_{8C} = \frac{B_i}{1 + \alpha(t-8)} = \frac{19,64}{1 - 0,07(0-8)} \approx 12,5 \text{ т/доб.}$$

В результаті, для цієї котельні графік відповідності кратності викидів (K_i) витратам палива (B_i), визначених в тонах за добу, ідентифікуємо рівнянням: $K_i = B_i / B_{8C} = 0,08 B_i$, що і нанесене пунктиром на діаграму рис. 6 як приклад та одночасно, як зразок.

Зауважимо, що при зміні режимів роботи котельні чи споживаного палива в опалювальному сезоні, а також після впровадження інноваційних технологій, проводять коректування відлікових значень B_{8C} , наведеним вище способом та відповідно перераховують опорні величини E_{j8C} . При цьому визначають зміни показника K , як індексів енергетичної ефективності котельні чи ступеню екологічної небезпеки її викидів, та за величиною змін оцінюють ефективність впровадженної інноваційної ресурсозберігаючої технології або технології захисту атмосфери від викидів певної забруднюючої речовини.

Висновки. Особливість міських котелень, зокрема сезонного типу, полягає в тому, що з поступовим сезонним похолоданням підвищується споживання палива, необхідного для підтримки температури теплоносія у споживачів тепла на заданому рівні, а відповідно разом з димовими газами зростають викиди забруднюючих речовин в атмосферу. Тому набуває актуальності оперативний контроль за викидами котелень, необхідний, з одного боку, для визначення податку на викиди, рівня екологічної безпеки міських територій, обумовленого цими викидами, в тому числі при екстремальних низьких температурах атмосферного повітря, а з іншого, – для визначення ефективності впровадження як ресурсозберігаючих технологій, так і технологій захисту атмосфери від викидів.

Обґрунтовано розрахунковий метод оперативного визначення поточних викидів міських котелень за добовими витратами палива, що реєструються щодоби впродовж усього опалювального сезону, з одночасною оцінкою енергетичної ефективності використання палива та ступеню екологічної небезпеки викидів. Суть методу полягає у використанні запровадженого авторами показника (індексу) K , який одночасно характеризує кратність перевищення, як поточних витрат палива, так і відповідних поточних викидів забруднюючих речовин котельнею, відносно їх відлікових (опорних) значень, визначених одноразово на початку опалювального сезону при температурі атмосферного повітря близько 8°C. Шляхом множення поточного індексу K , який відповідає певній добовій витраті палива, на опорні значення викидів при зазначеній температурі і пропонується оперативно розраховувати поточну емісію кожної забруднюючої речовини в умовах конкретної котельні. Крім того, індекс K дозволяє оцінювати ефективність впровадження в системі «котельня – споживачі тепла – довкілля» як ресурсозберігаючих технологій, так і технологій захисту атмосфери від викидів, за рівнем його зниження, порівняно з попереднім значенням в аналогічних умовах.

Перелік посилань

1. Міністерство палива та енергетики України. ГКД 34.02.305-20002. (2002) *Викиди забруднюючих речовин в атмосферу від енергетичних установок. Методика визначення*. Київ.

2. *Збірник показників емісії (питомих викидів) забруднюючих речовин в атмосферне повітря різними виробництвами Том 1* (2004). Донецьк.: Український науковий центр технічної екології.
3. *Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря населених місць (від забруднення хімічними та біологічними речовинами)* (1997). Наказ № 201 від 9.07.97. Київ, МОЗ України.
4. Колесник В.Є., Павличенко А.В. & Бучавый Ю.В. (2015). Оценка динамических показателей пылевого выброса из трубы котельной по данным потребления угля. *Проблеми екологічної безпеки: Тези XIII міжнарод. наук.-техн. конф.* Кременчук : Кременчуцький нац. ун-тет, 9.
5. Kolesnik V. Ye., Pavlichenko A. V. & Buchavy Yu. V. (2016). Dynamic parameters estimation of dust emissions of heat-and-power objects of coal mines. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu.* 5, 91–97.
6. *Приведение результатов измерений к нормальной температуре.* Retrieved from: <http://studfile.net/preview/3015>.

АННОТАЦІЯ

Цель. Обоснование расчетного метода оперативного определения текущих выбросов от городских котельных в атмосферу, в течение отопительного сезона, с оценкой энергетической эффективности использования топлива и степени экологической опасности выбросов.

Методика исследований. Предусматривает критический анализ существующей расчетной методики определения выбросов в атмосферу от энергетических установок; исследование динамики температуры атмосферного воздуха в отопительном сезоне; математическое моделирование для обоснования метода оперативного определения выбросов от котельных, их энергоэффективности и уровня экологической безопасности.

Результаты исследований. Проанализированы особенности системы централизованного теплоснабжения и существующие методы расчета величин выбросов загрязняющих веществ энергетическими установками, а также статистические данные температуры атмосферного воздуха в отопительном сезоне. Выявлена закономерность влияния температуры воздуха на потребление топлива котельными и их выбросы. Установлена закономерность для оперативного определения текущих выбросов городских котельных и показатели (индексы) энергетической эффективности расхода топлива и степени экологической безопасности их выбросов.

Научная новизна заключается в использовании введенного авторами показателя (индекса), который одновременно характеризует кратность превышения текущего расхода топлива и соответствующих текущих выбросов загрязняющих веществ от котельной относительно их отсчетных (опорных) значений, рассчитанных однократно в начале отопительного сезона при температуре атмосферного воздуха около 8°C. Это позволило оперативно определить текущие выбросы загрязняющих веществ котельной и оценить их энергоэффективность, а также степень экологической безопасности.

Практическое значение. Полученные расчетные зависимости и показатели предлагаются в использовании при дальнейшем определении степени экологической безопасности городских котельных сезонного типа, не прибегая к измерению выбросов.

Ключевые слова: экологическая опасность систем теплоснабжения, методы определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, энергетические установки, энергоэффективность котельных.

ABSTRACT

Goal. Justification of the calculation method for the operational determination of current emissions from urban boiler houses to the atmosphere during the heating season, with an assessment of the energy efficiency of fuel use and the degree of environmental hazard of emissions.

Research methodology provides a critical analysis of the existing calculation methodology for determining atmospheric emissions from power plants; study of the dynamics of air temperature in the heating season; mathematical modeling to justify the method for the operational determination of emissions from boiler houses, their energy efficiency and environmental safety level.

Research results The features of the district heating system and the existing methods for calculating the values of pollutant emissions by power plants, as well as statistical data on the temperature of the air in the heating season are analyzed. The regularity of the influence of air temperature on fuel consumption by boiler houses and their emissions is revealed. A pattern has been established for the operational determination of current emissions of urban boiler houses and indicators (indices) of energy efficiency of fuel consumption and the degree of environmental safety of their emissions.

Scientific novelty consists in using an indicator (index) introduced by the authors, which at the same time characterizes the multiplicity of excess of current fuel consumption and corresponding current pollutant emissions from the boiler house relative to their reference (reference) values, calculated once at the beginning of the heating season at atmospheric temperature of about 8 °C. This made it possible to quickly determine the current emissions of polluting substances from the boiler house and evaluate their energy efficiency, as well as the degree of environmental safety.

Practical value. The obtained calculated dependencies and indicators are proposed for use in further determining the degree of environmental safety of seasonal city boiler houses without resorting to measuring emissions.

Keywords: *environmental hazards of heat supply systems, methods for determining emissions of pollutants into the atmosphere, power plants, energy efficiency of boiler houses.*