

*В.Е. Колесник, А.В. Павличенко, І.В. Монюк
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»*

ОЦІНКА ЕНЕРГОЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЙ З РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ЗАХИСТУ АТМОСФЕРИ ВІД ВИКИДІВ В СИСТЕМІ «КОТЕЛЬНЯ – СПОЖИВАЧІ ТЕПЛА – ДОВКІЛЛЯ

Вступ. Міські котельні суттєво забруднюють атмосферу міста екологічно небезпечними речовинами, що викидаються в атмосферу разом з димовими газами. У кожному районі міста, наприклад з мільйонним населенням, налічується від 4 до 8 централізованих котельень та цілий ряд котельень меншої потужності. Викиди котельень обумовлені не тільки видом палива, але й умовами його спалювання та наявністю технологій чи засобів вловлювання забруднювачів певного типу. Причому з поступовим сезонним похолоданням підвищується споживання палива, зростають втрати тепла в житлових і адміністративних будівлях, що веде до певного підвищення споживання палива. Відповідно зростають викиди забруднюючих речовин в атмосферу, що знижує рівень екологічної безпеки певних мікрорайонів та міста в цілому.

Мета та методи. Мета роботи – оцінювання енергоекологічної ефективності впровадження ресурсозберігаючих технологій в системі «котельня – споживачі тепла – довкілля», спрямованих як на ресурсозбереження, так і на зниження викидів забруднюючих речовин в атмосферу на основі наукового узагальнення методів оперативного розрахункового оцінювання викидів забруднюючих речовин за інтенсивністю добових витрат палива котлоагрегатами, а також експериментальне визначення обсягів збереження виробленого тепла в певних ланках указаній системи, зокрема завдяки впровадженню технології утеплення будинків.

Результати та обговорення. Запропоновано методику оцінювання енергоекологічної ефективності впровадження технологій з ресурсозбереження та захисту атмосфери від викидів в системі «котельня – споживачі тепла – довкілля» за інтенсивністю добових витрат палива котлоагрегатами, а також за рівнем збереження споживачами виробленого тепла. При цьому використано запропонований авторами енергоекологічний індекс, який одночасно характеризує кратність перевищення поточних витрат палива та відповідних поточних викидів забруднюючих речовин котельнею відносно їх відлікових значень, отриманих на початку опалювального сезону. Отримані результати дозволяють визначити ресурсозберігаючий і екологічний ефект, зокрема від впровадження технології утеплення стін будинків у ланці «споживачі тепла». Для цього потрібно визначити відлікове значення енергоекологічного індексу до і після впровадження технології. Рівень зниження вказаного індексу та пов'язаних з ним енергоекологічних показників й характеризуватиме ефективність запровадженої технології. Зокрема показано, що після повномасштабного утеплення зовнішніх стін міських будинків шарами пінопласту товщиною 5-10 см значення енергоекологічного індексу знизиться в середньому на 2%. відповідно знизиться і споживання палива котлоагрегатами та викиди оксидів азоту, оксидів вуглецю та інших забруднювачів котельнями.

Висновки. Запропоновано та апробовано методику оцінювання енергоекологічної ефективності впровадження технологій з ресурсозбереження та захисту атмосфери від викидів в системі «котельня – споживачі тепла – довкілля» на основі узагальнення запропонованих авторами методів оперативного розрахункового визначення викидів забруднюючих речовин, що базуються на використанні запропонованого авторами енергоекологічного індексу, та визначення енергоекологічної ефективності впровадження технології збереження виробленого котельнею тепла шляхом утеплення зовнішніх стін будинків, з наступним визначенням ступеня зниження енергоекологічного індексу і відповідних показників споживання палива та викидів забруднюючих речовин котельнями.

Ключові слова: викиди котельень, технології ресурсозбереження, технології захисту атмосфери від викидів, ефективність технологій, система «котельня – споживачі тепла – довкілля».

EVALUATION OF ENERGY ECOLOGICAL EFFICIENCY OF TECHNOLOGIES FOR RESOURCE SAVING AND PROTECTION OF THE ATMOSPHERE FROM EMISSIONS IN THE «BOILER-HOUSE – HEAT CONSUMERS – ENVIRONMENTAL» SYSTEM

Introduction. City boiler-houses significantly pollute the city's atmosphere with environmentally hazardous substances emitted into the atmosphere along with flue gases. In each district of the city, for example, with a population of one million, there are from 4 to 8 centralized boilers and several smaller boilers. Boiler emissions are caused not only by the type of fuel but also by the conditions of its combustion and the availability of technologies or means of capturing certain kinds of pollutants. Moreover, with the gradual seasonal cooling, fuel consumption increases, heat losses in residential and office buildings increase, which leads to an increase in fuel consumption. Accordingly, emissions of pollutants into the atmosphere are increasing, which reduces the level of environmental safety of several neighbourhoods and the city as a whole.

Aim and methods. The purpose of the work is to evaluate the energy and environmental efficiency of the introduction of resource-saving technologies in the system "boiler-house - heat consumers - environment", aimed at both resource conservation and reduction of pollutant emissions into the atmosphere based on a scientific generalization of methods boilers, as well as experimental determination of the amount of heat generated in certain parts of the specified system, in particular with the introduction of insulation technology.

Results and discussion. A method for assessing the energy and environmental efficiency of technologies for resource conservation and protection of emissions from emissions in the system "boiler-house - heat consumers - environment" by the intensity of daily fuel consumption by boilers, as well as the level of conservation of heat produced by consumers. The energy-ecological index proposed by the authors is used, which simultaneously characterizes the multiplicity of the excess of current fuel consumption and the corresponding current emissions of pollutants by the boiler house relative to their calculated values calculated at the beginning of the heating season. The obtained results allow determining the resource-saving and ecological effect, in particular, from the introduction of the technology of insulation of the walls of houses in the link "heat consumers". To do this, you need to determine readout index values before and after the introduction of technology. The level of reduction of this index and related energy and environmental indicators will characterize the effectiveness of the introduced technology. In particular, the article showed that after full-scale insulation of the outer walls of urban buildings with layers of foam 5-10 cm thick, the value of the energy-ecological index will decrease by an average of 2%. Accordingly, fuel consumption by boilers and emissions of nitrogen oxides, carbon oxides and other pollutants by boilers will reduce.

Conclusions. The method of estimation of energy-ecological efficiency of introduction of technologies on resource-saving and protection of the atmosphere from emissions in the system "boiler-house - heat consumers - environment" based on the generalization of methods of operative calculation of emissions of pollutants based on the use of energy-ecological efficiency of introduction of technology of preservation of heat produced by the boiler-house due to warming of external walls of buildings, with the following definition of degree of decrease in the energy-ecological index and corresponding indicators of fuel consumption and pollutant emissions by boiler-houses.

Keywords: boiler-houses emissions, resource-saving technologies, technologies for the protection of the atmosphere from emissions, technology efficiency. system "boiler room - heat consumers - environment. "

Вступ. Міські котельні суттєво забруднюють атмосферу міста екологічно небезпечними речовинами, що викидаються в атмосферу разом з димовими газами. У кожному районі міста, наприклад з мільйонним населенням, налічується від 4 до 8 централізованих котельень та цілий ряд котельень меншої потужності. Викиди котельень обумовлені не тільки видом палива, але й умовами його спалювання та наявністю технологій чи засобів вловлювання забруднювачів певного типу. Причому з поступовим сезонним похолоданням підвищується споживання палива, зростають втрати тепла в житлових і адміністративних будівлях, що веде до певного підвищення споживання палива. Відповідно зростають викиди забруднюючих речовин в атмосферу, що знижує рівень екологічної безпеки певних мікрорайонів та міста в цілому.

Формулювання мети та задачі. Валові викиди екологічно небезпечних речовин, що виносяться із труб котельень, якщо не проводяться їх заміри, розраховують на основі чинних нормативних документів [1, 2], а оцінка ступеня екологічної небезпеки забруднення атмосфери викидами – за кратністю перевищення нормативних показників за стандартизованою методикою [3], що й визначає екологічний податок підприємств теплопостачання. За наявності поточних середньодобових викидів або концентрацій забруднювачів атмосфери також можна визначити їх екологічну небезпеку, зокрема, за динамікою викидів [4, 5]. Між тим, мірилом екологічної безпеки котельень може виступати запропонований авторами індекс, який одночасно характеризує кратність перевищення поточ-

них витрат палива та відповідних поточних викидів забруднюючих речовин котельнею відносно їх відлікових (опорних) значень, розрахованих одноразово на початку опалювального сезону [6, 7]. Проте на ресурсозбереження та екологічну безпеку міських котелень впливають не лише зміни природного чи техногенного характеру, але й зміни, що відбуваються в результаті впровадження відповідних технологій, причому як в самій котельні, так і у споживачів тепла, що обслуговуються котельнею. Тому метою роботи стало оцінювання енергоекологічної ефективності впровадження ресурсозберігаючих технологій в системі «котельня – споживачі тепла – довілля», спрямованих як на ресурсозбереження, так і на зниження викидів забруднюючих речовин в атмосферу на основі наукового узагальнення методів оперативного розрахункового оцінювання викидів забруднюючих речовин за інтенсивністю добових витрат палива котлоагрегатами, а також експериментального визначення обсягів збереження виробленого тепла в певних ланках указаної системи, зокрема завдяки впровадженню технології утеплення будинків.

Основний матеріал. Для оцінювання енергоекологічної ефективності впровадження технологій з ресурсозбереження та захисту атмосфери від викидів в системі «котельня – споживачі тепла – довілля» визначено три основні ланки, а саме: «котельня – довілля»; «споживачі тепла – довілля»; «котельня – споживачі тепла». де авторами проводилися дослідження й аналіз взаємозв'язків між цими ланками.

За нормативними методиками [1, 2] розраховуємо валовий викид (показник емісії) j -ої забруднюючої речовини E_j , що надходить в атмосферу з димовими газами котельні за проміжок часу T , за формулою:

$$E_j = \sum_i E_{ji} = 10^{-6} \sum_i k_{ji} B_i (Q_i^r)_{i, T} \quad (1)$$

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 – нижня робоча теплота згоряння i -го палива, МДж/кг.

Очевидно, що при при спалюванні одного виду палива вираз спрощується:

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

Аналіз значимості і мінливості трьох основних показників, що входять до вказаної залежності, показав, що основним і вирішальним є показник витрати палива – B_i за певний проміжок часу T , який реєструють в журналах котелень щодоби, а, в умовах автоматизованих котелень; який

надходить з контролера лічильника газу на комп'ютер у вигляді таблиць. Отже валовий викид j -ої забруднюючої речовини – E_j , що надходить в атмосферу з димовими газами котельні, односторонньо визначається витратами палива – B_i , а динаміка викидів буде повторювати динаміку витрати палива котельнею, що дає змогу отримувати розрахунковим шляхом показники викидів забруднювачів, не вдаючись до замірів їх поточних значень.

Для виявлення зв'язку викидів з температурою довілля в ланці «котельня – довілля» автори проаналізували динаміку витрат природного газу міською котельнею потужністю близько 5 МВт [6]. Показано, що поточні витрати палива котельнею суттєво змінюються протягом опалювального сезону, збільшення або зменшення яких, згідно з формулою (2), призводить до пропорційних змін поточних викидів забруднювачів – E_j . Причому подальший аналіз динаміки витрати палива котельнею виявив цілком однозначну її залежність від сезонних змін температури атмосферного повітря (параметр ланки «довілля»), що притаманна всім котельням. Залежність наведено на рис. 1.

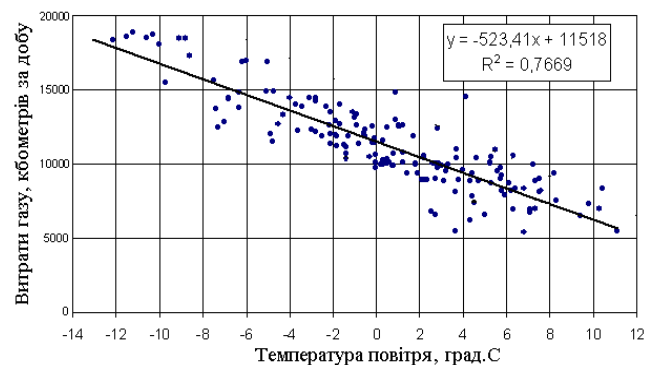


Рисунок 1 – Залежність витрати природного газу ($y = B_i$) досліджуваного котельнею від температури атмосферного повітря ($x=t$)

В аналітичному вигляді залежність подана лінійним рівнянням регресії:

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

Практична користь моделі (3) полягає в одержанні на її основі нормованої залежності витрати палива котельнею від температури атмосферного повітря, характерної не лише для дослідженої котельні, але й для інших міських котелень різної потужності, з іншими видами палива та особливостями технології його спалювання.

Для нормування моделі (3) було обрано значення витрати палива при температурі приземної атмосфери 8°C , що зазвичай слугує сигналом

для запуску сезонних котелень в роботу та є характерним для кожної котельні, і відносно якого варто проводити нормування усіх поточних значень B_i . Саме такий підхід є важливим для оперативного розрахункового визначення поточних значень викидів забруднювачів котельнею, оскільки при температурі 8 °С, коли сезонна котельня підготовлена до роботи, одночасно будемо мати відлікове (опорне) значення викидів кожної із забруднюючих речовин. Так, згідно з (3), відлікове (опорне) значення витрати палива досліджуваною котельнею становило $B_{8C}=7730,72$ м³/добу. А відповідний нормований графік у вигляді кратності ($y=K$) перевищення поточних витрат палива та одночасно відповідних поточних викидів забруднюючих речовин котельнею відносно певних опорних величин викидів, визначених при температурі 8°С наведено на рис. 2 [6].

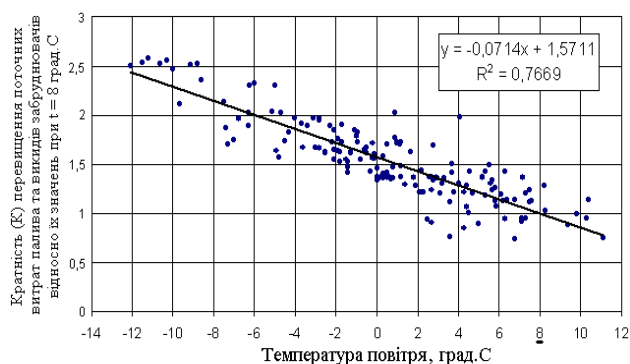


Рисунок 2 – Залежність від температури атмосферного повітря t (х) значень K (у) – кратності перевищення одночасно поточних витрат палива котельнею та відповідних поточних викидів забруднюючих речовин, визначених відносно відповідних опорних величин при температурі 8°С

Таким чином, аналіз взаємозв'язку в ланці «котельня–довкілля» виявив закономірність у вигляді залежності від температури атмосферного повітря – t значень кратності – K перевищення як поточних витрат палива котельнею B_i , так одночасно й відповідних поточних викидів забруднюючих речовин E_j , у вигляді співвідношення:

$$K_i = B_i/B_{8C} = E_j/E_{j8C}, \quad (4)$$

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. Звідки шукана величина поточних викидів кожної j -ої забруднюючої речовини становитиме:

$$E_j = K_i \times E_{j8C}. \quad (5)$$

Для визначення K потрібно на початку опалювального сезону одноразово достовірно визначити спочатку значення B_{8C} а потім за методикою [1, 2] відповідні значення E_{j8C} для кожної забруднюючої речовини, що викидається в атмосферу котельнею при використанні певного виду палива та технологій його спалювання чи пригнічення викидів. Причому кратність K виступає універсальним критерієм оцінювання як енергетичної ефективності витрат палива котельнею, так і ступеня екологічної небезпеки кожної забруднюючої речовини, що викидається в атмосферу. В роботі [7] указану кратність ми назвали «енергоекологічний індекс K », що точніше відповідає його суті, зокрема, при використанні в системі «котельня – споживачі тепла – доквілля».

З іншого боку нормована експериментальна залежність, що наведена на рис.2, представляється достатньо достовірним ($R^2=0,7669$) лінійним рівнянням регресії:

$$K_i = - 0,0714 t + 1,5711, \quad (6)$$

в якому поточна величина K_i лінійно залежить в явному вигляді тільки від середньодобової температури атмосфери – t та варіюється упродовж опалювального сезону від 0,8 (при +10°С) до приблизно 3,0 – при від'ємній температурі -18°С. Важливо, що коефіцієнт регресії при змінній t фактично визначає температурний коефіцієнт зміни показника K . Позначимо його як $\alpha = - 0,0714$, град.⁻¹). Цей температурний коефіцієнт є достатньо сталим для котелень дослідженого регіону, тому, на наш погляд, округлену величину $\alpha = - 0,07$, град.⁻¹ можна прийняти як типову для котелень сезонного типу, розташованих в аналогічних до досліджених кліматичних умовах, та використовувати, як буде показано нижче, для приведення значень K_i та B_i до певної температури.

На практиці, за моделлю (4), (5) не складно розрахувати середні валові викиди певної забруднюючої речовини котельнею за будь-який проміжок часу, що передує моменту визначення наступної добової величини B_i в опалювальному сезоні, в тому числі, упродовж попереднього кварталу, що важливо для розрахунку квартального податку на викиди. Крім того, є можливість визначати викиди, коли спостерігаються найнижчі температури повітря та відповідно найбільші рівні викидів забруднюючих речовин котельнею. До того ж, можна оцінювати ефективність впровадження як

технологій захисту атмосфери від викидів, так і ресурсозберігаючих технологій, зокрема збереження теплового ресурсу.

Згідно з (4), рівень викидів певної котельні визначається рівнем споживання палива, тому для подальших практичних розрахунків, згідно з (5), поточної емісії забруднювачів в атмосферу – E_j доцільно встановити відповідність енергоекологічного індексу – K_i , до поточних витрат палива – B_i в тонах за добу, як того вимагає нормативна методика [1]. Відповідний графік для середньої густини природного газу наведено на рис. 3.

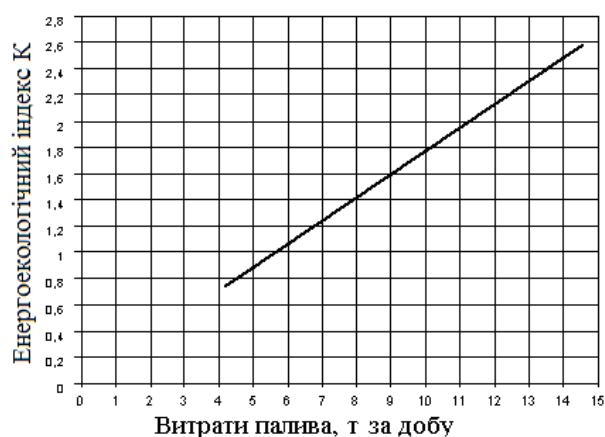


Рисунок 3 – Графік відповідності значень поточного енергоекологічного індексу – K_i добовій витраті палива дослідженою котельнею – B_i

Графік на рис.3 формалізовано, виходячи з первинної, згідно з (4), суті показника K_i , у вигляді:

$$K_i = B_i / B_{8C} = B_i / 5,6447 \approx 0,1772 B_i. \quad (7)$$

Тут параметр B_{8C} , визначений вище як об'ємна величина $B_{8C} = 7330,8 \text{ м}^3/\text{добу}$, перетворюється в масову величину $B_{8C} = 5,6447 \text{ т/добу}$. З наведеної моделі випливає, що безрозмірний індекс K_i прямо пропорційний споживанню палива – B_i та змінюються на протязі опалювального сезону в діапазоні від 0,8 до 2,6 (а при низьких зимових температурах – до 3 і вище). Нагадаємо, що так само, згідно з (4), змінюватиметься кратність перевищення викидів E_j відносно опорних значень E_{j8C} , визначених розрахунковим шляхом за показником B_{8C} за формулою (2) для кожної забруднюючої речовини. Отже, знижуючи поточні (добові) витрати палива B_i , знизимо й поточний енергоекологічний індекс K_i . Для подальшого ж узагальнення отриманої моделі важливо, що вказаний діапазон зміни K є універсальним, тобто в умовах дослідженого

регіону буде однаковим для всіх котельень сезонного типу потужністю від 400 кВт до 50 МВт. Сімейство графіків відповідності енергоекологічного індексу K витратам палива для котельень різної потужності подано у загальному вигляді на рис. 4.



Рисунок 4 – Сімейство графіків відповідності енергоекологічного індексу K витратам палива для котельень потужності від 400 кВт до 50 МВт (пунктирна лінія відповідає потужності котельні 10 МВт).

Очевидно, що для визначення поточних значень енергоекологічного індексу K_i в умовах певної котельні необхідно ідентифікувати відповідне лінійне рівняння з сімейства, що притаманне певній котельні, подібно до моделі (7).

Зазначимо, що пунктирна лінія відповідає котельні з типовим котлоагрегатом марки ТВГ-8м (номінальна потужність 9,6 МВт) [7]. Для ідентифікації рівняння вказаної лінії за апріорними даними, як приклад, була оцінена опорна величина споживання газу котлоагрегатом зазначеної потужності, на початку опалювального сезону, яка становила $B_{8C} \approx 12,5 \text{ т/добу}$ (на рис. 4 відповідає точці, яка вказана стрілкою). В результаті ідентифіковане, подібно до (7), рівняння має вигляд:

$$K_i = B_i / B_{8C} = 0,08 B_i \quad (8)$$

Звертаємо увагу на те, що на рис. 4 значення B_{8C} для кожної певної котельні відповідатимуть точкам перетину лінії зі значенням кратності $K=1$, з кожним графіком вказаного сімейства. Причому для ідентифікації графіків, відповідно до потужності певної котельні, виду палива, технологічних особливостей системи «котельня – споживачі тепла – доквілля» та ін., актуальною стає необхідність визначення величини B_{8C} в умовах цієї котельні. Для цього використано формулу приведення поточних значень вимірюваних параметрів до нормальної температури [8]. За нормальної температури приймаємо

8°C, що відповідає початку опалювального сезону. Тоді формула приведення для показника K , визначеного при іншій температурі – t , матиме вигляд:

$$K_{8C} = \frac{K_t}{1 + \alpha(t - 8)} \quad (9)$$

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

За умови $K_t = B_t/B_{8C}$ та $K_{8C}=1$, вираз (8) набуде вигляду:

$$B_{8C} = \frac{B_t}{1 + \alpha(t - 8)}, \quad (10)$$

де B_t – поточні значення витрати палива, що відповідають визначеній експериментально температурі – t та необхідні для розрахункового визначення B_{8C} (тут параметр α виступає вже як температурний коефіцієнт зміни витрати палива котельнею).

На практиці, за формулою (10) можна визначити B_{8C} у такий спосіб. На початку опалювального сезону після стабілізації режиму котельні (можливо, за час від декількох діб до приблизно двох тижнів) визначають середньодобове значення витрати палива – B_t та середню температуру – t за показаннями зовнішнього термометра котельні, визначену на вказаному інтервалі. Підстановкою значень у (10) отримуємо шукане значення відлікової (опорної) величини витрати палива для певної котельні – B_{8C} .

Зауважимо, що при зміні режимів роботи котельні чи споживаного палива під час опалювального сезону, а також після впровадження інноваційних технологій в певній системі «котельня – споживачі тепла – доквілля», необхідно відкоригувати відлікові значення B_{8C} , наведеним вище способом та відповідно перераховувати опорні величини E_{8C} . При цьому для певної витрати палива B_t визначають нове значення поточного енергоекологічного індексу K_i , зміна якого, порівняно з його значенням до впровадження нової ресурсозберігаючої технології, характеризуватиме її енергоекологічну ефективність.

Для ілюстрації енергоекологічної ефективності впровадження ресурсозберігаючої технології, наприклад шляхом утеплення будинків в ланці «споживачі тепла», наведемо запропонований нами метод її оцінювання, що базується на експериментальних дослідженнях температур не утеплених і утеплених поверхонь будинку радіаційним пірометром. Як досліджуваний

об'єкт було обрано типовий 5 поверховий будинок з білої цегли, стіни якого фрагментарно утеплені пінопластом товщиною 5 та 10 см.

Дослідження проводилося у грудні-січні місяці у похмурі дні за відсутності вітру. Це дозволило виключити вплив прямої сонячної радіації на температуру поверхонь. При цьому температуру не утепленої цегляної й утепленої пінопластом поверхонь вимірювали пірометром попарно, тобто по черзі з обох боків їх границі [9]. Всього упродовж 40 днів було зроблено понад 60 парних вимірювань в діапазоні температур від +10 до -8 °С. Виявлено, що за час експерименту не утеплена стіна мала в середньому температуру 3,57 °С, причому більшу за атмосферну, приблизно на 0,4 °С, тобто стіна віддає тепло у навколишнє середовище як і очікувалось. Для виявлення різниці між показаннями температури, утепленої і не утепленої поверхонь за отриманими даними будувались регресійні залежності температури поверхонь утеплювачів від температури поверхні неутепленої стіни (рис.5).

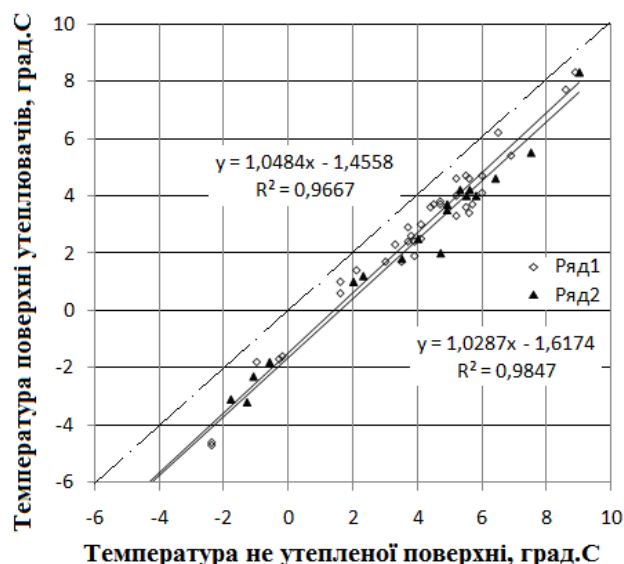


Рисунок 5 – Залежності температури поверхонь утеплювачів від температури неутепленої поверхні стіни, визначених пірометром: ряди 1, 2 – для утеплювача товщиною 5 см та 10 см; штрих-пунктирна лінія – графік рівняння температури неутепленої поверхні

Порівняльний аналіз наведених на рис. 5 залежностей показав, що температури поверхонь утеплювачів слідують за температурою неутепленої поверхні стіни, але, як і очікувалося, виявилися дещо нижчими, оскільки утеплювач певною мірою перешкоджає передачі тепла з нагрітого будинку в атмосферу. Причому утеплювач меншої товщини забезпечує меншу різницю температур, що відповідно становить в середньому – -1,4558 та -1,6174 °С, та мають тенденцію до збільшення з пониженням атмосферної температури.

Обсяги збереженого тепла завдяки утепленню стін визначались відносно середньої температури поверхні не утепленої стіни – 3,57 °С, якій відповідали температури 2,287 °С та 2,055 °С поверхонь утеплювачів товщиною 5 та 10 см, відповідно (визначені за указаними на рис.5 рівняннями регресії).

Втрати тепла не утеплених і утеплених поверхонь стіни при вказаних температурах радіаційним шляхом оцінювалися за формулою Стефана-Больцмана для сірих тіл [10]:

$$B = \delta\sigma T^4, \quad (11)$$

де $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²·К⁴ постійна Стефана-Больцмана; δ – поправка для сірого тіла, поглинальна/випромінювальна здатність якого для всіх довжин хвиль випромінювання однакова; T – температура за шкалою Кельвіна (пов'язана зі шкалою Цельсія співвідношенням $T = t^{\circ}\text{C} + 273,15$).

Якщо стіну вважати абсолютно сірим тілом з $\delta = 0,95$, то повний потік випромінювання її неутепленої поверхні з температурою 3,57°С, становитиме:

$$B = \delta\sigma T^4 = 5,67032 \cdot 10^{-8} \cdot 0,95 \cdot (3,57 + 273,15)^4 = 315,86 \text{ Вт/м}^2.$$

Аналогічно визначалися радіаційні втрати тепла з поверхонь утеплювачів товщиною 5 та 10 см з відповідними температурами: 2,287 °С та 2,055°С, що становили – 310,04 та 309 Вт/м², відповідно. Отже, при застосуванні вказаних утеплювачів втрати тепла знизяться на 5,82 та 6,86 Вт/м², тобто в середньому на 6,34 Вт на 1 м² утепленої поверхні. Відповідні ж відносні втрати тепла, порівняно з потоком випромінювання неутепленої стіни, прийнятим за 1, становитимуть – 0,9816 та 0,9783. Отже у відсотках втрати тепла знизувалися на 1,84% та 2,17%, тобто в середньому на 2% з відносною похибкою $\pm 8\%$.

Важливо, що отримані середні зниження втрат тепла на 2%, будуть характерними для кожної обраної утепленої поверхні, тобто для окремої утепленої ділянки стіни або усього будинку, кварталу чи мікрорайону. Причому зниження у 2% буде стосуватися не лише втрат тепла, але й величин витрат палива B_i , викидів забруднюючих речовин E_j та відповідних індексів K_i , попередньо визначених в системі «котельня – споживачі тепла – доквілля» без урахування утеплення. Доречно зазначити, що механізм впливу технології утеплення стін будинків на енергоекологічну ефективність в системі проявляється завдяки певному підвищенню температури «зворотньої води», яка повертається з опалювальної мережі будинку в

котельню, де водночас в автоматизованому режимі буде знижена подача палива в топку котлоагрегатів для повернення її температури до наперед заданого (нормативного) рівня [11]. Саме певне зменшення енергії, необхідної для нагрівання води в котлоагрегатах до рівня номінальної температури після утеплення стін і призводить до зниження витрати палива, а значить, і до зменшення шкідливих викидів в атмосферу. Це відноситься і до технологій, спрямованих безпосередньо на зниження викидів із труб котельні, якщо вони таким чином знижуватимуть споживання енергії палива.

Отримані результати дозволяють визначити ресурсозберігаючий і екологічний ефект від впровадження технології утеплення стін, зокрема в ланці «споживачі тепла». Для цього потрібно визначити відлікове значення енергоекологічного індексу K до впровадження технології, яке позначимо як K_{i0} . Рівень зниження K_{i0} та пов'язаних з ним енергоекологічних показників й характеризуватиме ефективність запровадженої технології. Рекомендується визначити K_{i0} при такому споживанні палива – B_{i0} , значення якого відповідало б номінальній потужності певної котельні чи її котлоагрегату. На практиці таку величину B_{i0} матимемо при температурі атмосферного повітря близько 0°С., яка відповідає середній температурі протягом опалювального сезону в регіоні.

Наприклад, добове значення витрати палива котлоагрегатом 10 МВт при середній температурі атмосфери $t = 0^{\circ}\text{C}$ становить $B_i = 19,64$ т/добу. За таких умов відлікове поточне значення енергоекологічного індексу, згідно з (8) дорівнюватиме:

$$K_{i0} = 0,08B_{i0} = 0,08 \cdot 19,64 = 1,5712.$$

Після повномасштабного впровадження в будинках кварталу або мікрорайону міста утеплювачів з пінопласту товщиною 5-10 см значення енергоекологічного індексу знизиться в середньому на 2% до рівня $K_i = 1,5397$, тобто на величину 0,0315, що і є фактичним показником енергоекологічної ефективності впровадженої технології. За значенням $K_i = 1,5397$, згідно з (4), (5), було оцінено відповідне зниження споживання палива котлоагрегатом та концентрацій кожної забруднюючої речовини у викидах котельні. Так, для споживання палива – B_i , згідно з отриманими K_i , знизиться до рівня 19,246 т/добу, тобто зменшаться на 394 кг/добу (енергетична ефективність технології утеплення). Концентрації ж оксидів азоту NO_x в димових газах котельні знизяться з відлікового значення 250 мг/м³ до 245 мг/м³, а оксиду вуглецю CO – з 130 мг/м³ до

127,4 мг/м³, тобто зменшаться відповідно на 5 мг/м³ та 2,6 мг/м³ (екологічна ефективність).

Висновки. Запропоновано методику оцінювання енергоекологічної ефективності впровадження технологій із ресурсозбереження та захисту атмосфери від викидів в системі «котельня – споживачі тепла – доквілля» на основі узагальнення також запропонованих авторами методів:

- оперативного розрахункового визначення викидів забруднюючих речовин, що базуються на використанні запровадженого авторами енергоекологічного індексу, 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, зокрема, для температури атмосферного повітря 8 °С;
- визначення енергоекологічної ефективності впровадження технології збереження виробленого котельнею тепла завдяки утепленню зовнішніх стін будинків шарами пінопласту, що базується на експериментальних дослідженнях температур неутеплених і утеплених поверхонь радіаційним пірометром з наступним визначенням фактичного збереження тепла, ступеня зниження енергоекологічного індексу, який відповідає зменшеній витраті палива, та зниженню характерних для певної котельні показників викидів забруднюючих речовин в атмосферу.

Використання запропонованих авторами методики дозволяє оцінювати ефективність впровадження в системі «котельня – споживачі тепла – доквілля» як ресурсозберігаючих технологій, так і технологій захисту атмосфери від викидів, за рівнем зниження отримуваних енергоекологічних показників, порівняно з попереднім їх значенням в аналогічних умовах.

Література:

1. Міністерство палива та енергетики України. ГКД 34.02.305-20002. Викиди забруднюючих речовин в атмосферу від енергетичних установок. Методика визначення. Київ, 2002 (Чинний від 01.07.2002).
2. Збірник показників емісії (питомих викидів) забруднюючих речовин в атмосферне повітря різними виробництвами. Донецьк: Україн. наук. центр технічної екології, 2004. Т. 1. 184 с.
3. Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря населених місць (від забруднення хімічними та біологічними речовинами). Уведені МОЗ України 9.07.97. Наказ № 201. Київ, 1997.

4. Колесник В.Є., Павличенко А.В., Бучавий Ю.В. Оценка динамических показателей пылевого выброса из трубы котельной по данным потребления угля / Проблемы екологічної безпеки: XIII міжнарод. наук.-техн. конф., 6-8 жовтня 2015 р. Кременчук, Україна: тези доп. Кременчуцький нац. ун-тет, 2015. С. 9.

5. Kolesnik V. Ye., Pavlichenko A. V., Buchavy Yu. V.. Dynamic parameters estimation of dust emissions of heat-and-power objects of coal mines. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2016. № 5. С. 91–97.

6. Колесник В.Е., Павличенко А.В., Монюк І.В.. Обґрунтування розрахункового методу оперативного визначення поточних викидів міських котельень, показників їх енергоефективності та ступеня екологічної небезпеки / Зб. наук.праць Національного гірничого університету, № 60. С. 162–176 (<https://doi.org/10.33271/crpnmu/60.162>).

7. <http://mmzavod.com.ua> – Теплофикационный газовый водогрейный котел ТВГ

8. <http://studfile.net/preview/3015>. Приведение результатов измерений к нормальной температуре.

9. Колесник В.Е., Павличенко А.В., Монюк І.В. Оцінка ресурсозберігаючого та екологічного ефектів в системі «котельня – споживачі тепла – доквілля» від утеплення зовнішніх стін будинків / Зб. наук. праць Національного гірничого університету. № 61, 116-128. (<https://doi.org/10.33271/crpnmu/61.116>).

10. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 639 с.

11. <https://web.posibnyku.vntu.ua> – Загальні характеристики котлоагрегатів.

References:

1. Ministerstvo palyva ta enerhetyky Ukrainy. HKD 34.02.305-20002. (2002) Vykydy zabrudniuiuchykh rehovyn v atmosferu vid enerhetychnykh ustanovok. Metodyka vyznachennia. Kyiv.
2. Zbirnyk pokaznykiv emisii (pytomykh vykydiv) zabrudniuiuchykh rehovyn v atmosferne povitria riznyimi vyrobnytstvamy Tom 1 (2004). Donetsk.: Ukrainskyi naukovyi tsentr tekhnichnoi ekolohii.
3. Derzhavni sanitarni pravyla okhorony atmosferного povitria naselenykh mist (vid zabrudnennia khimichnymy ta biolohichnymy rehovynamy) (1997). Nakaz № 201 vid 9.07.97. Kyiv, MOZ Ukrainy.
4. Kolesnik V.Ye., Pavlichenko A.V. & Buchavy Yu.V. (2015). Otsenka dinamicheskikh pokazateley pylévogo vybrosa iz truby kotel'noy po dannym potrebleniya uglya. Problemy ekolohichnoi bezpeky: Tezy KhIII mizhnarod. nauk.-tekhn. konf. Kremenchuk : Kremenchutskyi nats. un-tet, 9.
5. Kolesnik V.Ye., Pavlichenko A.V., Buchavy Yu.V. Dynamic parameters estimation of dust emis-

sions of heat-and-power objects of coal mines. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2016. № 5. С. 91–97.

6. Kolesnyk V., Pavlychenko A., Moniuk I. 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. Coll.res.pap.nat.min.univ. 2020, 60, 162-176 (<https://doi.org/10.33271/crpnmu/60.162>).

7. Teplofikatsiynnyi hazovyi vodohriinyi kotel TVH from: <http://mmzavod.com.ua> –

8. Privedenie rezul'tatov izmereniy k normal'noy temperature. Retrieved from: <http://studfile.net/preview/3015>.

9. Kolesnyk V., Pavlychenko A., Moniuk I. Assessment of resource-saving and environmental effects in the system «boiler room – heat consumers – environment» from insulation of external walls of houses. Coll.res.pap.nat.min.univ. 2020, 61, 116-128. (<https://doi.org/10.33271/crpnmu/61.116>)

10. Matveev L.T. Kurs obshej meteorologii. L.: Gidrometeoizdat, 1976. – 639 s.

11. Zagalni harakterystyky kotloagregativ from: <https://web.posibnyky.vntu.ua>.

* Науково-методична стаття