

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-74-26>

УДК 543.051

ІВАСЕНКО Віталій

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0001-8318-7437>

e-mail: ivasenko-vitaliy@ukr.net

ВИМІРЮВАННЯ ВИКИДІВ NO_x ГАЗОВИХ КОТЛІВ

Розглянуто проблему контролю та максимальної ефективності роботи паливовикористовуючого обладнання (котли), що працюють на природному газу. Серед токсичних газів, що містять димові гази енергетичних об'єктів (ТЕЦ, котельні), значне місце посідають оксиди азоту (NO, NO₂, NO_x). Аналіз відхідних газів дозволяє визначити концентрацію забруднюючих речовин і максимально налаштувати оптимальну роботу обладнання, досягнувши скорочення викидів та відповідність затвердженим державним екологічним нормам. Шляхом до оптимальної роботи обладнання є встановлення об'єму повітря, що подається на горіння. Все це потребує використання інструментального контролю (газоаналізаторів). Розглянуто принципи єдності вимірювання, що включають в себе подання результатів вимірювання в стандартних одиницях (ppm, мг/м³). Наведено перерахунок з об'ємної концентрації (ppm) в масову (мг/м³). Також необхідність вимірювання вмісту кисню у відхідних димових газах при перерахунку значень концентрацій з «ppm» в «мг/м³», для паливовикористовуючого обладнання. Розглянуто принципи виробу місця для проведення вимірювання концентрацій та параметрів відхідних газів. Виконання цих умов дозволяє підвищити точність вимірювання. Проведені вимірювання концентрації оксидів азоту, в перерахунку на діоксид азоту в залежності від надлишку кисню в паливовикористовуючому обладнанні. Досліджено утворення концентрації оксидів азоту, в перерахунку на діоксид азоту в залежності від навантаження при різних значеннях теплопродуктивності котла, що працює на природному газу. Розглянуті додаткові фактори (вологість та надлишок кисню), які можуть впливати на результати вимірювання викидів паливовикористовуючого обладнання. Обґрунтовано використання газоаналізаторів з одночасним вимірюванням оксидів азоту та кисню у вихідних димових газах для контролю дотримання нормативних викидів та ефективної роботи паливовикористовуючого обладнання.

Ключові слова: діоксид азоту, концентрація, вимірювання, надлишок кисню, газоаналізатор.

IVASENKO Vitaliy

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute»

MEASUREMENT OF NO_x EMISSIONS OF GAS BOILERS

The problem of control and maximum efficiency of fuel-using equipment (boilers) operating on natural gas is considered. Nitrogen oxides (NO, NO₂, NO_x) occupy a significant place among the toxic gases contained in the flue gases of energy facilities (thermal power plants, boiler houses). The analysis of waste gases allows you to determine the concentration of pollutants and maximally adjust the optimal operation of the equipment, achieving a reduction in emissions and compliance with the approved state environmental regulations. The way to optimal operation of the equipment is to set the volume of air supplied for combustion. All this requires the use of instrumental control (gas analyzers). The principles of measurement unity are considered, including the presentation of measurement results in standard units (ppm, mg/m³). Conversion from volume concentration (ppm) to mass (mg/m³) is given. Also, the need to measure the oxygen content in exhaust flue gases when converting concentration values from "ppm" to "mg/m³" for fuel-using equipment. The principles of the product of the place for measuring the concentrations and parameters of exhaust gases are considered. Fulfillment of these conditions allows to increase the accuracy of the measurement. Measurements of the concentration of nitrogen oxides were carried out, in terms of nitrogen dioxide, depending on the excess of oxygen in the fuel-using equipment. The formation of the concentration of nitrogen oxides, in terms of nitrogen dioxide, depending on the load at different values of the heat output of the boiler operating on natural gas, was studied. Additional factors (moisture and excess oxygen) that can affect the results of measurement of emissions of fuel-using equipment are considered. The use of gas analyzers with simultaneous measurement of nitrogen oxides and oxygen in the outgoing flue gases to control compliance with regulatory emissions and efficient operation of fuel-using equipment is substantiated.

Key words: nitrogen dioxide, concentration, measurement, excess oxygen, gas analyzer.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Бурхливий розвиток міст, концентрація великої кількості транспортних засобів, промислових, енергетичних об'єктів у містах призводить до інтенсивного забруднення атмосфери шкідливими викидами. Окреме місце серед цих джерел викидів займають енергетичні об'єкти: теплові електростанції і теплоцентралі, котельні багатопверхових будинків, генератори. Однією з основних цілей охорони навколишнього середовища є дотримання гранично допустимих викидів та поступове їх скорочення. Однак контроль викидів на постійній основі не здійснюється, виконується лише періодична перевірка. У більшості розвинених міст контроль викидів відбувається з використанням інструментального контролю (автоматичні газоаналізатори) [1,2]. Закон встановлює гранично допустимі значення концентрацій оксидів азоту у викидах енергетичних джерел забруднення [3]. Контроль кількості забруднюючих речовин на джерелах викиду являється необхідною умовою для забезпечення дотримання нормативів викидів в атмосферне повітря. Ці норми є основою при формуванні вимог до діапазону вимірювання, порогу чутливості та похибок вимірювання газоаналізаторів. Для забезпечення єдності вимірювань доцільні дослідження з

вибору оптимальних метрологічних характеристик аналітичних засобів. Особливо важливим завданням є відбір проб на джерелах викиду і транспортування їх до вимірювального приладу, від рішення якої залежить правдивість показань засобів вимірювальної техніки, що застосовується.

Аналіз досліджень та публікацій

Дослідження які проведені з аналізу викидів енергетичних установок дозволяють стверджувати, що при використанні різних видів палива утворюється різна кількість оксидів азоту NO_x та інших забруднюючих речовин [4]. В залежності від температури горіння в котлі існує три механізми утворення доксидів азоту NO_x : паливні NO_x , теплові NO_x , швидкі NO_x [5]. В роботі [6] оцінено залежність зміни викидів від режиму експлуатації енергетичної установки. Але виконуючи екологічне дослідження з вимірювання кількості забруднюючих речовин та дотримання екологічних нормативів, доцільно визначити взаємозв'язок з іншими речовини, що впливають на процеси утворення NO_x . Також ці речовини повинні вимірюватися на ряду з забруднюючими речовинами для забезпечення єдності вимірювання і контролю дотримання нормативних викидів.

Виклад основного матеріалу

Сучасні методи вимірювання NO та NO_2 базуються на визначенні об'ємної частки NO та NO_2 у відхідних димових газах, та подальшому перерахунку в масову концентрацію. Для цього отримане значення в одиницях (ppm) множиться на коефіцієнт 2,05, щоб отримати масову концентрацію (мг/м^3). При перерахунку результатів вимірювань, отримують значення, які не залежать від температури та тиску і приведені до нормальних умов (тиск 760 мм.рт.ст. та температура 0°C).

$$C_{\text{NO}_x} = 2,05 \cdot (M_{\text{NO}} + M_{\text{NO}_2}) \quad (1)$$

де C_{NO_x} – масова концентрація оксидів азоту, в перерахунку на діоксид азоту, мг/м^3 ; M_{NO} – об'ємна концентрація оксиду азоту, ppm; M_{NO_2} – об'ємна концентрація діоксиду азоту, ppm.

Крім цього для паливовикористовуючого обладнання результати вимірювань масових концентрацій перераховуються на сухий газ та стандартний вміст кисню.

Приведення масової концентрації до стандартного вмісту кисню у сухих відхідних газах виконується за формулою:

$$C_{n.y.(O_2)} = C_{n.y.} \cdot (21 - O_{2CT}) / (21 - O_{2B}) \quad (2)$$

де $C_{n.y.(O_2)}$ – приведена масова концентрація забруднюючої речовини у сухих відхідних газах, мг/м^3 ; $C_{n.y.}$ – масова концентрація забруднюючої речовини у сухих відхідних газах, мг/м^3 ; O_{2CT} – стандартний вміст кисню у сухих відхідних газах, %; O_{2B} – виміряний вміст кисню у сухих відхідних газах, %.

Отримання масової концентрації у сухих відхідних газах досягається шляхом використання газоаналізаторів, обладнаних системою підготовки проби (осування та конденсування або конденсатозбірником). Таким чином вдається зберегти цілісність проби, оскільки при відсутності системи підготовки проби відбувається утворенні конденсату, в якому частина NO_2 може розчинитися і тим самим зменшувати виміряне значення. Використання системи підготовки проби забезпечує високу точність вимірювання NO та NO_2 і репрезентативність викидів NO_x , що утворюються в процесі згорання.

Також у випадку використання системи підготовки проби перерахунок масової концентрації на сухий газ не здійснюється.

Важливо відзначити, що при одночасному вимірюванні NO і NO_2 , сумісну концентрацію NO , і NO_2 приймають як концентрацію NO_2 . Це пояснюється тим, що після виходу з димової труби в атмосферне повітря, NO реагує з O_2 в повітрі і доокиснюється до NO_2 . Відповідно часто зустрічається формулювання «концентрація оксидів азоту, в перерахунку на діоксид азоту», або позначення NO_x [7].

Вибір точки проведення вимірювання

Важливе місце при вимірюванні посідає процедура відбору проб. Точка відбору проб для вимірювання викидів має бути якомога ближче до джерела утворення викидів, щоб можна було якомога швидше визначити зміни у викидах.

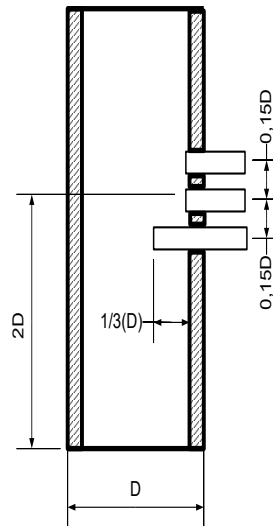


Рис. 1 Розташування точок відбору проб

Місце вимірювання зазвичай вибирають на виході з котла. Також необхідно забезпечити дотримання мінімальної відстані до місць де змінюється напрям потоку газу або площа поперечного перерізу газоходу (відводи, коліна, люки, тощо), щоб забезпечити якомога однорідне змішування димових газів в точці відбору проб. При використанні одного зонд відбору проб, його слід розташувати в центрі потоку димових газів (див. рис. 1). Використання зонду відбору димових газів із кількома точками на одному рівні, забезпечує більш рівномірний відбір проб. Ці заходи призначені для зменшення можливості вимірювання окремих смуг газових потоків та для підвищення точності вимірювання [8,9,10].

Невизначеності вимірювання NO_x

Похибка вимірювання NO_x залежить від багатьох факторів. Серед них, місце та спосіб відбору проб, а також точність самого методу вимірювання. Крім того повітряні газові суміші готуються з галузевою стандартною точністю ± 1 ppm.

У тимчасово допущеному Мінприроди переліку методик виконання вимірювань викидів, похибки для різних методик становлять ± 15 , ± 20 , $\pm 25\%$ від виміряного значення. В той же час похибка засобів вимірювання становить ± 5 , ± 10 від виміряного значення [2].

Вимірювання викидів NO_x

Моніторинг і звітність про рівні викидів NO_x є важливими обов'язками підприємств та організацій які експлуатують паливовикористовуюче обладнання. Робота обладнання є динамічною в часі і залежить від попиту на теплову енергію в конкретний час. Зміна навантаження та споживання палива відповідно впливає на кількість викидів. На утворення оксидів азоту впливає багато факторів, найбільший вплив має температура полум'я в зоні горіння та надлишок кисню. Залежність утворення NO_x від температури та надлишку кисню була проведена при різних навантаженнях на газовому котлі Viessmann Vitomax 200-LW M64B02. На рис. 2,3 наведені результати вимірювання NO_x в димовій трубі в залежності від температури димових газів та навантаження при спалюванні природного газу [11]. Найбільший вплив на викиди NO_x становить підвищення температури.

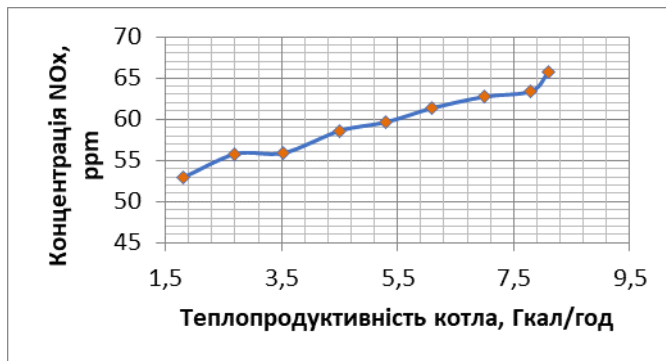


Рис. 2 Залежність викидів NO_x від навантаження

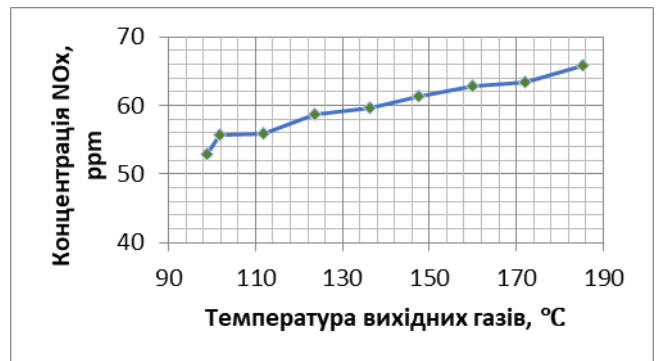


Рис. 3 Залежність викидів NO_x від температури

Вплив засобів контролю кисню на викиди NOx

Щоб запобігти навмисному зменшенню показників підприємства (штучно знизити рівень NOx) за допомогою розбавлення викидів киснем O₂, контролюючі органи вимагають звітувати про показники викидів приведені до стандартного вмісту кисню O₂. На рис. 4 показана залежність вимірених концентрацій NOx від O₂ у відхідних газах.

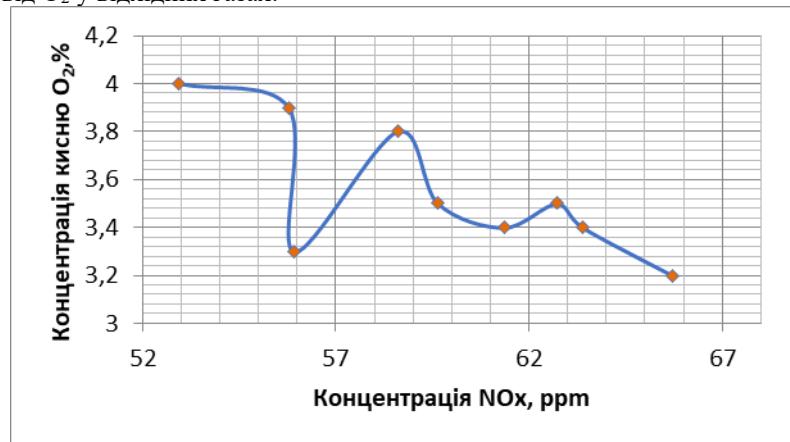


Рис. 4 Залежність концентрацій NOx від O₂

У наш час деякі опалювальні котли, що працюють протягом значного часу оснащені засобами вимірювання O₂. Це дозволяє, незважаючи на сезонну зміну щільності повітря, встановлювати пальники з мінімальним надлишком повітря, що в свою чергу підвищує ефективність горіння, економить паливо і тим самим зменшує загальну кількість відхідних газів, зокрема NOx. Але часто може спостерігатися протилежний ефект для викидів NOx. Зменшення надлишку повітря через контроль O₂ спричиняє вищі температури полум'я та трохи вищі значення викидів NOx.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальшого розвитку у даному напрямі

Встановлено, що використання в котлах способу спалювання з мінімальним надлишком повітря, який дозволяє знизити викиди NOx, без стаціонарного безперервного вимірювання вмісту оксидів азоту у відхідних газах є нераціональним. Контроль вмісту NOx за допомогою портативного аналізатора може бути тимчасовим, але не остаточним рішенням. Тільки контроль з безперервним вимірювання викидів NOx та відповідним коригуванням роботи котла дозволяє мінімізувати їх утворення.

Використовуючи аналізатор, який визначає вміст NOx у відхідних газах, не визнаючи вміст O₂ в місці вимірювання NOx, важко порівняти отримані результати з нормативним рівнем. Важливим вимірюванням, що визначає ефективну роботу котла для зменшення викидів NOx є вимірювання O₂. Реалізація даного підходу дозволить підвищити ефективність роботи котлів та забезпечити дотримання державних екологічних нормативів.

Література

1. Моніторинг якості атмосферного повітря: український та міжнародний досвід. [Аналітична записка] / Кольцов М., Шевченко Л. – Київ: ГО «Фундація «Відкрите Суспільство», 2018. – 13 с.
2. Приміський В.П. Методика проектування і дослідження хемілюмінесцентних газоаналізаторів / В.П. Приміський, В.М. Івасенко // Вост.-Европ. журн. передових технологій. - 2012. - № 2/6. –С. 9 – 12.
3. Наказ Мінприроди України від 27.06.2006 р. № 309 "Нормативи граничнодопустимих викидів забруднюючих речовин із стаціонарних джерел".
4. Полив'янчук В. П. Створення та експериментальне відпрацювання універсальної системи екологічного діагностування теплових двигунів і котельних установок / В. П. Полив'янчук, М. Ф. Смирний, О. І. Каслін, О. О. Скурідіна, О. Ю. Коваленко, В. Є. Бекетов // Комунальне господарство міст. Серія : Технічні науки та архітектура. - 2019. - Вип. 3. - С. 77-82. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/kgm_tech_2019_3_13
5. Schnelle, Karl B. Jr. and Charles A. Brown, Air Pollution Control Technology Handbook, CRC Press, Washington D.C., 2002.
6. Пономаренко Є. Г. Комплексна оцінка еколого-економічної ефективності режимів роботи газових котлів [Електронний ресурс] / Є. Г. Пономаренко, М. В. Катков, Р. А. Семененко // Комунальне господарство міст. Серія : Технічні науки та архітектура. - 2020. - Т. 4. - С. 127-133. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/kgm_tech_2020_4_23

7. Ткаченко, С. Й. Екологічні аспекти виробництва енергії [Електронний ресурс] : навчальний посібник / С. Й. Ткаченко, Л. А. Боднар ; ВНТУ. – Електрон. текст. дані. – Вінниця : ВНТУ, 2017.
8. ДСТУ 8725:2017 Якість повітря. Викиди стаціонарних джерел. Методи визначення швидкості та об'ємної витрати газопилових потоків (2017). Available at: http://www.ksv.biz.ua/GOST/DSTY_ALL/DSTU4/dstu_8725-2017.pdf
9. ДСТУ 8726:2017 Якість повітря. Викиди стаціонарних джерел. Методи визначення тиску та температури газопилових потоків (2017). Available at: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=71894
10. ДСТУ 8826:2019 Якість повітря. Викиди стаціонарних джерел. Методи визначення вологості газопилових потоків (2019). Available at: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=82136
11. Івасенко В.М. Вимірювання та стандартизація викидів NOx / Д.С. Сопружинський, К.В. Єфременюк // Збірник праць XVIII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні”, 06-07 грудня 2022 р. — К.: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2022. – 254 с.

References

1. Monitorynh yakosti atmosferneho povitria: ukrainskyi ta mizhnarodnyi dosvid. [Analitichna zapyska] / Koltsov M., Shevchenko L. – Kyiv: HO «Fundatsiia «Vidkryte Suspilstvo», 2018. – 13 s.
2. Prymiskyi V.P. Metodyka proektuvannia i doslidzhennia khemiliuminestsentnykh hazoanalizatoriv / V.P. Prymiskyi, V.M. Ivaskenko // Vost-Evrop. zhurn. peredovykh tekhnolohiy. - 2012. - № 2/6. –S. 9 – 12.
3. Nakaz Minpryrody Ukrainy vid 27.06.2006 r. № 309 "Normatyvy hranychnodopustymykh vykydiv zabrudniuiuchykh rechovyh iz statsionarnykh dzherel".
4. Polyvianchuk V. P. Stvorennia ta eksperymentalne vidpratsiuvannia universalnoi systemy ekolohichnoho diahnostuvannia teplovykh dvyhuniv i kotelykh ustanovok / V. P. Polyvianchuk, M. F. Smynyi, O. I. Kaslin, O. O. Skuridina, O. Yu. Kovalenko, V. Ye. Beketov // Komunalne hospodarstvo mist. Seriia : Tekhnichni nauky ta arkhitektura. - 2019. - Vyp. 3. - S. 77-82. - Rezhym dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/kgm_tech_2019_3_13
5. Schnelle, Karl B. Jr. and Charles A. Brown, Air Pollution Control Technology Handbook, CRC Press, Washington D.C., 2002.
6. Ponomarenko Ye. H. Kompleksna otsinka ekoloho-ekonomichnoi efektyvnosti rezhymiv roboty hazovykh kotliv [Elektronnyi resurs] / Ye. H. Ponomarenko, M. V. Katkov, R. A. Semenenko // Komunalne hospodarstvo mist. Seriia : Tekhnichni nauky ta arkhitektura. - 2020. - T. 4. - S. 127-133. - Rezhym dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/kgm_tech_2020_4_23
7. Tkachenko, S. Y. Ekolohichni aspekty vyrobnytstva enerhii [Elektronnyi resurs] : navchalnyi posibnyk / S. Y. Tkachenko, L. A. Bodnar ; VNTU. – Elektron. tekst. dani. – Vinnytsia : VNTU, 2017.
8. DSTU 8725:2017 Yakist povitria. Vykydy statsionarnykh dzherel. Metody vyznachennia shvydkosti ta ob`iemnoi vytraty hazopylovykh potokiv (2017). Available at: http://www.ksv.biz.ua/GOST/DSTY_ALL/DSTU4/dstu_8725-2017.pdf
9. DSTU 8726:2017 Yakist povitria. Vykydy statsionarnykh dzherel. Metody vyznachennia tysku ta temperatury hazopylovykh potokiv (2017). Available at: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=71894
10. DSTU 8826:2019 Yakist povitria. Vykydy statsionarnykh dzherel. Metody vyznachennia volohosti hazopylovykh potokiv (2019). Available at: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=82136
11. Ivaskenko V.M. Vymiriuvannia ta standartyzatsiia vykydiv NOx / D.S. Sopruzhyhnyi, K.V. Yefremeniuk // Zbirnyk prats XVIII vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh “Efektyvnist ta avtomatyzatsiia inzhenernykh rishen u pryladobuduvanni”, 06-07 hrudnia 2022 r. K.: PBF, KPI im. Ihoria Sikorskoho. – 2022. – 254 s.