

УДК 504.05

ВПЛИВ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ОБОРОТНИХ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ НА ВЕЛИЧИНУ ВИКИДІВ ДІОКСИДУ АЗОТУ

Є. В. Гусаренко-Барська

Р. В. Гусаренко-Барська

здобувачки вищої освіти першого (бакалаврського) рівня, група ГБВВ-11, навчально-науковий інститут водного господарства та природооблаштування

Науковий керівник – к.т.н., доцент В. Р. Гаєвський

*Національний університет водного господарства та природокористування,
м. Рівне, Україна*

Теоретичними дослідженнями встановлено обсяг викидів, які виникають внаслідок недостатньо ефективної роботи оборотних систем охолодження (ОСО) на теплоелектростанції потужністю 2500 МВт. Для цього застосовано формули для розрахунку питомих викидів діоксиду азоту (NO₂) залежно від річних витрат палива та інших технологічних параметрів. Досліджено вплив неефективної роботи ОСО на збільшення викидів та негативні екологічні наслідки, такі як забруднення навколишнього середовища та перевитрати паливних ресурсів. Розраховано об'єм газів, що утворюються при надлишковому спалюванні палива та його вплив на навколишнє середовище міста Рівне.

Ключові слова: оборотна система охолодження, діоксид азоту, тепла електростанція, конденсатори парових турбін.

Theoretical studies have established the amount of emissions that arise as a result of insufficiently efficient work of reversible cooling systems (CCO) at a thermal power plant with a capacity of 2500 MW. For this, formulas were used to calculate specific emissions of nitrogen dioxide (NO₂) depending on annual fuel costs and other technological parameters. The influence of inefficient operation of OSO on increased emissions and negative environmental consequences, such as environmental pollution and overexpenditure of fuel resources, was studied. The volume of gases produced during fuel over combustion and its impact on the environment of the city of Rivne were calculated.

Keywords: reversible cooling system, nitrogen dioxide, thermal power plant, steam turbine condensers.

Теплоенергетика є однією з головних та найбільш затребуваних галузей енергетики, задачею якої є забезпечення населення, підприємств та інших споживачів електроенергією, гарячою водою та теплом з раціональним використанням енергетичних ресурсів для майбутніх поколінь.

Виробництво електроенергії на ТЕС здійснюється за рахунок використання таких невідновлювальних джерел як вугілля, газ, нафта, спалювання яких викликає забруднення навколишнього середовища шкідливими речовинами. В процесі згорання палива спостерігається надходження в атмосферу твердих частинок, діоксиду азоту, діоксиду сірки, оксиду і діоксиду вуглецю, викидів тепла [1]. Для теплових електростанцій (ТЕС) завжди існувала проблема зменшення величини шкідливих викидів, що в теперішній час стає дедалі актуальнішою, оскільки теплоенергетика є одним із найбільших забруднювачів навколишнього середовища [2].

Згідно з офіційними даними, що були оприлюднені Міністерством енергетики, у 2021 році в Україні частка виробленої електроенергії серед інших галузей енергетики становила близько 29,3% [3]. Слід зауважити, що головним завданням української теплоенергетики на сьогодні є осучаснення та вдосконалення наявних ТЕС. Пошуки нових більш екологічних технологій виробництва електроенергії та тепла сприяють розвитку сфери енергетики та уникненню екологічних катастроф.

Метою роботи є визначення кількості викидів NO_2 , які виникають внаслідок недостатньо ефективної роботи оборотних систем охолодження на теплоелектростанції потужністю 2500 МВт. Ознайомитись з принципом роботи теплової машини, факторами, які впливають на її ефективну роботу, розглянути деякі властивості діоксиду азоту та вплив викидів даної речовини на навколишнє середовище.

Одним із ключових компонентів ТЕС як теплової машини є конденсатор парової турбіни, що відіграє важливу роль у процесі конвертації тепла в електричну енергію. Конденсатор є пристроєм, що використовується для охолодження відпрацьованої пари, перетворення її в конденсат, що в подальшому направляється циркуляційним насосом до нагрівника, яким є котел, що перетворює конденсат знову в пару.

Ефективність роботи конденсатора є важливим показником для ефективної роботи всієї теплової машини і така висока ефективність забезпечується значною мірою за умови високої чистоти поверхні теплообмінних трубок конденсатора. Забруднення теплообмінної поверхні конденсатора можуть бути у вигляді твердих частинок, маслянистих речовин, мінеральних відкладень, біооброствань тощо. Ці забруднення збільшують температурний опір, утруднюють передачу тепла, зменшуючи ефективність конденсації. Як результат, знижується ефективність парової турбіни, збільшується споживання палива і зменшується загальна ефективність роботи ТЕС.

Для забезпечення чистоти теплообмінної поверхні конденсатора необхідно вживати відповідні заходи попередження та очищення забруднень теплообмінних поверхонь. Наприклад, встановлення фільтрів для утримання потрапляння твердих частинок у воду охолодження, використання хімічних реагентів для усунення відкладень малорозчинних солей (CaCO_3 , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ та ін.) та біологічних забруднень, регулярна очистка та інспекція чистоти теплообмінних поверхонь.

Неефективну роботу конденсатора на ТЕС компенсують надлишковим спалюванням палива у котлі, що призводить до збільшення викидів забруднюючих речовин на ТЕС, одним із яких є діоксид азоту (NO_2). Діоксид азоту є газоподібною речовиною, що у певній концентрації є шкідливим для здоров'я людей та навколишнього середовища [4]. Ця речовина викликає гострі подразнення слизової у людей та тварин. Отруєння діоксидом азоту супроводжується зниженням артеріального тиску, ускладненим диханням та головними болями. Розчинні властивості діоксиду азоту у водному середовищі, дозволяють йому легко потрапляти у кров та дихальні шляхи. Оксид азоту негативно впливає на ріст фауни, а також спричиняє виникнення кислотних дощів. З цих причин зменшення кількості викидів діоксиду азоту являє собою важливу задачу енергетики і екології.

Отже, проблема забруднення вимагає проведення пильних досліджень, в ході яких визначаються найбільші ризики використання ТЕС та способи їх усунення. У зв'язку з цим, **метою наших досліджень** є визначення впливу ефективності роботи оборотних систем охолодження ТЕС на величину викидів діоксиду азоту.

Відомо, що завдяки таким охолоджувальним системам, як оборотні системи охолодження (ОСО), здійснюється більш екологічне зниження температури робочого середовища, за рахунок зменшення забруднених скидів у навколишнє середовище [5]. ОСО можуть включати в себе системи водного охолодження, системи повітряного охолодження та пасивні системи охолодження. Загалом системи водного охолодження служать для

оохолодження води та пари в конденсаторах та резервуарах, також для оохолодження ряду іншого обладнання не тільки в енергетиці, а й у багатьох інших галузях промисловості. Зниження ефективності роботи оборотних систем оохолодження призводить до підвищення температури відпрацьованої пари, зменшення ефективності роботи ТЕС і тим самим викликає надлишкові викиди шкідливих речовин, зокрема діоксиду азоту. Існує велика кількість способів поліпшення роботи оборотних систем оохолодження. Один із них полягає у використанні рідинного оохолодження замість повітряного. Таким методом можна знизити температуру пари швидше ніж повітрям.

Визначимо кількість викидів NO₂, які виникають внаслідок недостатньо ефективної роботи оборотних систем оохолодження на теплоелектростанції потужністю 2500 МВт. У нашому випадку річні витрати палива становлять 6·10⁹ кг. Застосуємо формулу для розрахунку питомих викидів NO₂ [6]:

$$m_{NO_2}^{TB} = m_{NO_2}^{пал} + m_{NO_2}^{пов}, \quad (1)$$

де $m_{NO_2}^{пал}$ – викиди від згорання палива, $m_{NO_2}^{пов}$ – повітряні оксиди азоту. $m_{NO_2}^{TB}$ визначаються за формулою

$$m_{NO_2}^{пал} = 0.7 \cdot N_T \cdot \beta_{\alpha_r} \cdot \beta_{\alpha_{пп}} \cdot \beta_{r_r} \cdot \beta_{\Theta} \cdot \beta_{см}. \quad (2)$$

Величини у (2) знаходимо за співвідношеннями:

$$N_T = 10 \cdot \frac{C_N}{Q_H^r} \quad \beta_{\alpha_r} = (0.53\alpha_r + 0.12)^2, \quad \beta_{\alpha_{пп}} = 1.73\alpha_{пп} + 0.48,$$

$$\beta_{r_r} = 1 - 1.6 \cdot 10^{-2} \sqrt{r_r}, \quad \beta_{\Theta} = 0.11(T_{AG} - 1100)^{1/3}, \quad \beta_{см} = 0.98W_{см} - 0.47, \quad (3)$$

де C_N – відсоток вмісту азоту у паливі на одиницю маси; Q_H^r – нижча теплота згорання палива, МДж/кг; β_{α_r} – коефіцієнт надлишку повітря; α_r – коефіцієнт надлишку повітря в пальнику, що знаходяться у діапазоні 0,9–1,3; $\beta_{\alpha_{пп}}$ – коефіцієнт впливу частки первинного повітря в пальнику; $\alpha_{пп}$ – частка первинного повітря щодо теоретично необхідної, яка знаходяться у діапазоні 0,15–0,55; β_{r_r} – коефіцієнт впливу рециркуляції димових газів в первинне повітря; r_r – ступінь рециркуляції димових газів через пальники (%), що знаходиться у діапазоні 0–30%; β_{Θ} – коефіцієнт впливу максимальної температури на ділянці утворення паливних оксидів азоту; T_{AG} – температура за зоною активності горіння, що знаходиться у діапазоні 1800–2050 (К); $\beta_{см}$ – коефіцієнт впливу сумішоутворення в основі факелу для прямоструменевих горілок; $W_{см}$ – коефіцієнт, значення якого знаходяться у діапазоні 1.4–4.0 [7].

Для визначення повітряних оксидів азоту використовують формулу Зельдовича:

$$m_{NO_2}^{пов} = 1.54 \cdot 10^{16} \sqrt{\frac{\alpha_{AG} - 1}{\alpha_{AG}}} \cdot \frac{\exp\left(-\frac{60000}{T_{AG}}\right)}{T_{AG}}, \quad (4)$$

де α_{AG} – коефіцієнт, що визначається за формулою:

$$\alpha_{AG} = \alpha_r + 0.5 \cdot \Delta\alpha_T, \quad (5)$$

де $\Delta\alpha_T$ – присоси в топку, що можна визначити за формулою

$$\Delta\alpha_T = 0.1 \cdot \alpha_r. \quad (6)$$

Для вугілля марки АСШ зі значенням теплової енергії згорання 20,89 МДж/кг та при середніх значеннях коефіцієнтів $\beta_{\alpha_{пп}} = 1,085$ (для $\alpha_{пп} = 0,35$), $\beta_{r_r} = 0,938$ (для $r_r = 15\%$), $\beta_{\Theta} = 1,021$ (для $T_{AG} = 1900$ К) та $\beta_{см} = 2,176$ (для $W_{см} = 2,7$), питомі викиди NO₂ від згорання палива ($m_{NO_2}^{пал}$) складають 0,242 кг/ГДж при середньому надлишку повітря для горіння

($\alpha_{\Gamma} = 1,15$ та $\beta_{\alpha_{\Gamma}} = 0,532$) [6]. Викиди повітряних оксидів азоту ($m_{\text{NO}_2^{\text{пов}}}$) для цих же умов складають 0,065 кг/ГДж, враховуючи, що $\Delta\alpha_{\Gamma} = 0,115$ та $\alpha_{\Delta\alpha_{\Gamma}} = 1,208$.

Якщо в результаті неефективної роботи ОСО температура конденсату збільшиться з 30° С до 31° С, то це спричинить зниження вакууму в конденсаторі турбіни потужністю 500 МВт на 0,25 кПа. Це призведе до зменшення загальної потужності ТЕС на 1%. Для ТЕС з потужністю 2500 МВт викиди NO₂ складають 38,47 тис. тонн/рік. У разі недостатньо ефективної роботи системи охолодження, що призводить до зниження температури оборотної води на 1° С, викиди NO₂ збільшаться на 0,385 тис. тонн/рік при витраті палива $6 \cdot 10^9$ кг/рік.

Розрахуємо висоту стовпа над містом Рівне, тобто весь об'єм газів, що утворюється в результаті спалювання палива. Оскільки об'єм газів, що утворюються при спалюванні 1 кг вугілля становить $V_0 = 6,63$ м³/кг, то об'єм газів за рахунок підвищення температури конденсату з 30° С до 31° С буде $V = M \cdot V_0 = 6 \cdot 10^9$ кг \cdot 0,01 \cdot 6,63 м³/кг = $39,8 \cdot 10^7$ м³. Оскільки площа міста Рівне дорівнює 63,8 км² = $6,38 \cdot 10^7$ м², то висота, на яку маса газів від додаткового спалювання вугілля застелить Рівне, буде становити $h = V/S = 39,8 \cdot 10^7$ м³ / ($6,38 \cdot 10^7$ м²) = 6,2 м.

Таким чином, неефективне використання ОСО за рахунок забруднення теплообмінних поверхонь призводить не тільки до перевитрат матеріальних ресурсів, а й до суттєвих негативних екологічних наслідків, які насамперед шкодять здоров'ю населення. Особливу увагу потрібно звернути на запобігання подібних надлишкових викидів, що може бути досягнуто різними шляхами, включаючи встановлення ефективних систем очищення, застосування сучасних технологій низькотемпературного спалювання, а також використання альтернативних джерел енергії. Не менш ефективним способом вирішення даної проблеми є здійснення якісного контролю та оптимізації процесів спалювання за допомогою використання автоматизованих систем контролю для регулювання подачі палива та повітря з ціллю досягнення їх оптимального співвідношення. Також необхідно впроваджувати оптимальні режими роботи ОСО для зменшення відкладень на теплообмінних поверхнях конденсаторів парових турбін не тільки з ціллю зменшення шкідливих викидів від згорання палива, а й для зменшення забруднених концентрованих скидів у водойми навколишнього середовища.

1. Гаєвський В., Филипчук В., Сироватський О. Вплив забруднень теплообмінних поверхонь конденсаторів парових турбін на викиди оксиду вуглецю. *Комунальне господарство міст*. 2023. Вип. 3(177). С. 21–27. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-3-177-21-27> (дата звернення: 20.08.2023). 2. Про Основні засади (Стратегію) екологічної політики України на період до 2030 року : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text> (дата звернення: 20.08.2023). 3. Міністерство енергетики України. URL: <http://mpe.kmu.gov.ua> (дата звернення: 20.08.2023). 4. Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин в атмосферному повітрі населених місць : наказ МОЗ України від 14.01.2020 р. № 52. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0156-20#Text> (дата звернення: 20.08.2023). 5. Гаєвський В. Р., Кочмарський В. З. Підвищення ефективності оборотних систем охолодження мінімізацією кальцій-карбонатних відкладень : монографія. НУВГП : Рівне, 2018. 154 с. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/15612> (дата звернення: 20.08.2023). 6. Гаєвський В. Р., Филипчук В. Л., Дейнека О. Ю. Вплив забруднень теплообмінних поверхонь конденсаторів парових турбін ТЕС на величину викидів діоксиду азоту. *Український журнал будівництва та архітектури*. Дніпро : ПДАБА, 2022. № 5 (011). С. 27–33. 7. Гаєвський В. Р. Антропоєкологічна оцінка ефективності очищення димових газів ТЕС від діоксиду азоту. *Екологічні проблеми навколишнього середовища та раціонального природокористування в контексті сталого розвитку* : IV Міжнародна науково-практична конференція 21–22 жовтня 2021 року. Херсон, 2021. С. 66–69. ISBN 978-966-289-568-1.