ВПЛИВ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ОБОРОТНИХ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ ТЕС НА ВЕЛИЧИНУ ВИКИДІВ ДІОКСИДУ АЗОТУ

Бондар О.І.¹, Гасєвський В.Р.², Кочмарський В.З.², Филипчук В.Л.²

¹Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ

²Національний університет водного господарства та природокористування
вул. Соборна, 11, 33028, м. Рівне
dei2005@ukr.net, v.r.haievskiy@nuwm.edu.ua,

В Україні за 2020 рік частка ТЕС та теплоелектроцентралей (ТЕЦ) у виробництві електроенергії становила 36,2%. Зменшення енергоємності таких об'єктів означає загальне істотне зменшення екологічних ризиків навколишнього середовища. Для екологічної роботи ТЕС необхідне раціональне використання оборотних систем охолодження (ОСО), оскільки підвищення температури оборотної води ОСО зменшує величину вакууму в конденсаторі турбіни і таким чином знижує потужність турбіни, що призводить до збільшення споживання палива та води.

Під час спалювання палива на ТЕС в атмосферу потрапляє значна кількість шкідливих речовин, зокрема тверді частинки (зола), діоксид азоту (NO_2), діоксид сірки (SO_2), оксид і діоксид вуглецю (CO , CO_2) та викиди тепла. Діоксид азоту є шкідливою токсичною сполукою, належить до 3-го класу небезпеки і відноситься до парникових газів. Надлишок NO_2 безпосередньо викликає респіраторно-легеневі захворювання, разом з іншими речовинами призводить до синергетичного негативного ефекту і тому потребує видалення з різних газових середовищ. NO_2 утворюється під час спалювання вугілля завдяки окисленням атомарного азоту, що міститься у вугіллі, а також молекулярного азоту, що міститься в атмосфері. Зменшення утворення NO_2 можна досягти різними технологічними режимами горіння та хімічними методами очищення.

Здійснено розрахунок викидів діоксиду азоту на прикладі ТЕС потужністю 2500 МВт, що спалює $6 \cdot 10^9$ кг вугілля марки АСШ за рік та зроблена оцінка наслідків недостатньої ефективної роботи ОСО. Для розрахунку викидів NO_2 використано методику, що враховує особливості технології спалювання палива. Розрахунками визначено, що валові викиди NO_2 становлять 38,48 тис. т за рік, а контамінаційний еквівалент енергії (КЕЕ) – 0,307 кг на один ГДж виробленої електроенергії. За номінальною потужністю турбін і річними затратами вугілля марки АСШ розраховано, що недогрів води ОСО лише на 1°C призведе до надлишкових викидів NO_2 0,385 тис. т на рік.

Порівнюючи концентрацію NO_2 у димових газах із ГДК робочої зони (для NO_2 ГДК_{рз} = 2 мг/м³), визначено рівень ступеня очищення димових газів до необхідних санітарно-гігієнічних норм, що має становити 99,8%. Такий результат засвідчує необхідність глибокого очищення димових газів ТЕС від NO_2 з використанням комплексних технологій. *Ключові слова:* теплоелектростанції, оборотні системи охолодження, викиди двоокису азоту, гранично допустимі концентрації робочої зони, ефективність очищення.

Influence of the efficiency of the operation of the cooling systems of the TPP on the value of emissions of nitrogen dioxide.
Bondar O., Gayevskii V., Kochmarskii V., Fylypchuk V.

In Ukraine, in 2020, the share of thermal power plants (TPP) and combined heat and power plants (CHP) in electricity production was 36.2%. A decrease in the energy intensity of such facilities means an overall significant reduction in environmental risks of the environment. For the ecological operation of TPP, the rational use of circulating cooling systems (CCS) is necessary, since an increase in the temperature of the circulating water CCS reduces the amount of vacuum in the turbine condenser and thus reduces the turbine power, which in turn leads to an increase in fuel and water consumption.

When fuel is burned at TPPs, many harmful substances are released into the atmosphere, such as particulate matter (ash), nitrogen dioxide (NO_2), sulfur dioxide (SO_2), carbon monoxide and dioxide (CO , CO_2) and heat emissions. Nitrogen dioxide is a harmful toxic compound, belongs to the 3rd hazard class and belongs to greenhouse gases. Excess NO_2 directly causes respiratory and pulmonary diseases, together with other substances leads to a synergistic negative effect and therefore requires removal from different gas media. NO_2 is formed during the combustion of coal due to the oxidation of atomic nitrogen contained in coal, as well as due to the oxidation of molecular nitrogen contained in the atmosphere. Reducing the formation of NO_2 can be achieved by various technological modes of combustion and chemical cleaning methods.

In this work, the calculation of nitrogen dioxide emissions was carried out using the example of a thermal power plant with a capacity of 2500 MW, which burns $6 \cdot 10^9$ kg of ASH coal per year, and an assessment of the consequences of insufficiently effective operation of the CCS was made. To calculate NO_2 emissions, a methodology was used that takes into account the peculiarities of fuel combustion technology. Calculations have established that the gross NO_2 emissions are 38.48 thousand tons per year, and the contaminated energy equivalent (CEE) is 0.307 kg per one GJ of generated electricity. Based on the nominal power of the turbines and the annual consumption of ASH coal, it is calculated that the underheating of the CCS water by only 1°C will lead to excess NO_2 emissions of 0.385 thousand tons per year.

Comparing the concentration of NO_2 in flue gases with the MPC of the working area (for NO_2 MPC_{wa} = 2 mg/m³), an assessment was made of the degree of purification of flue gases to the necessary sanitary and hygienic standards, which should be 99.8%. This result indicates the need for deep cleaning of flue gases from TPP from NO_2 using complex technologies. *Key words:* thermal power plants, circulating cooling systems, nitrogen dioxide emissions, maximum permissible concentrations of the working area, cleaning efficiency.

Постановка проблеми. Однією з найбільш забруднюючих атмосферу галузей промисловості є теплова енергетика, і тому зменшення емісії шкідливих газів, зокрема діоксиду азоту, є важливою екологічною проблемою. Відповідно, режим експлуатації теплових електричних станцій (ТЕС) має відповідати екологічним нормативам [1]. В Україні за 2020 рік згідно із [2] частка ТЕС та теплоелектроцентралей (ТЕЦ) становила 36,2%, і тому зменшення енергоємності таких об'єктів означає загальне істотне зменшення екологічних ризиків навколишнього середовища в країні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для ефективної роботи ТЕС необхідне постійне відведення тепла (отримання 1 Дж електричної енергії вимагає відведення 1,5 Дж тепла). Тепло на ТЕС відводиться за допомогою оборотних систем охолодження (ОСО), і тому основним ресурсом, необхідним для роботи електростанцій, окрім палива, є вода. У середньому на 1 МВт·год. виробленої електроенергії витрачається для різних типів ТЕС 150–300 м³ води. На вироблення електроенергії у 2020 році ТЕС України використали мінімум 5,9 млрд м³ води, з якої близько 90–95% припадає на ОСО. Із систем охолодження близько 3–5% від обсягу оборотної води скидається у навколишнє середовище. Крім цього, ТЕС створюють теплові, вуглекислотні (CO_2) та азотисті (NO_x) викиди (див. рис.). Величина цих викидів залежить від ефективності роботи ОСО, яка впливає на раціональне використання палива та водних ресурсів і, відповідно, на стан навколишнього середовища. Підвищення тем-

ператури оборотної води ОСО зменшує величину вакууму в конденсаторі турбіни і таким чином знижує потужність турбіни, що у свою чергу збільшує споживання палива і води.

Загальна кількість великих ТЕС в Україні – близько 15, їх потужності перебувають у межах від 275 МВт до 3600 МВт. Загалом вироблена на них електроенергія становила у 2020 році близько $39,55 \cdot 10^9$ кВт·год. Кількість відведеного тепла є значною, що суттєво впливає на екологічний стан навколишнього середовища. ТЕС на 1000 МВт виробленої електроенергії спалює за рік 2,3 млн т антрациту або 1,6 млн т нафти чи 1,9 млрд м³ газу. Під час спалювання палива в атмосферу надходить величезна кількість шкідливих речовин, що розповсюджуються на десятки і сотні кілометрів. Щодо згоряння палива, то основна частина викидів шкідливих речовин ТЕС припадає на паросилову частину (див. рис.). Такими викидами є: тверді частинки (зола), діоксид азоту (NO_2), діоксид сірки (SO_2), оксид та діоксид вуглецю (CO , CO_2) і викиди тепла.

Однією з найбільш шкідливих токсичних сполук є діоксид азоту, який належить до 3-го класу небезпеки [3] з гостроспрямованим механізмом дії, що потребує автоматизованого контролю за його вмістом у повітрі і видалення з різних газових середовищ. NO_2 утворюється під час спалювання вугілля, що містить атомарний азот. За різних умов азот може утворювати з киснем низку сполук (N_2O , NO , N_2O_3 , NO_2 , N_2O_4 і N_2O_5), властивості яких різні. У кінцевому результаті всі речовини перетворю-

ються в NO_2 . Концентрація викидів NO_2 залежить від технології спалювання палива і може істотно відрізнятись для різних котлоагрегатів. Діоксид азоту належить до парникових газів, сприяє утворенню парникового ефекту і руйнуванню озонового шару. Крім того, оксиди азоту негативно впливають на ріст зелених насаджень і лісів, а також ініціюють виникнення кислотних дощів. Надлишок NO_2 безпосередньо викликає респіраторно-легеневі захворювання [4], а також разом з іншими речовинами викликає синергетичний негативний ефект [5].

Під час горіння вугілля азот, що знаходиться в повітрі, поєднуючись із киснем, утворює NO, загальна ланцюгова схема реакції якого запропонована Я.Б. Зельдовичем, П.Я. Садовниковим та Д.А. Франк-Каменецьким [6]:

де М – молекула довільної речовини.

Незважаючи на складний механізм ланцюгової реакції утворення NO, у дослідженні [6] показано, що кінетика його утворення добре описується рівнянням оборотної реакції

Реакції (5) відповідає кінетичне рівняння

$$\frac{dC_{NO}}{dt} = K_1 \cdot C_{N_2} \cdot C_{O_2} - K_2 \cdot (C_{NO})^2 \text{ Equation. 3, (6)}$$

де CO_2 , CN_2 , C_{NO} – актуальні концентрації компонентів газової суміші, K_1 і K_2 – кінетичні константи прямої і зворотної реакцій відповідно. Після утворення NO миттєво переходить у діоксид азоту за реакцією $2\text{NO} + \text{O}_2 = 2\text{NO}_2$. Зменшення утворення NO можна досягти різними технологічними режимами горіння [7], а також хімічними методами очищення [8].

Метою роботи є розрахунок викидів діоксиду азоту на прикладі ТЕС потужністю 2500 МВт, що спалює $6 \cdot 10^9$ кг вугілля марки АСШ за рік, оцінка наслідків недостатньо ефективної роботи ОСО для паросилової частини ТЕС та необхідного ступеня очищення димових газів від NO_x .

Викладення результатів досліджень. Визначення викидів і необхідної ефективності очищення відхідних газів здійснювалося відповідно до схеми екологічного впливу паросилової частини ТЕС на довкілля.

Викиди діоксиду азоту. Нині є декілька методик розрахунку викидів NOx. Оскільки у [9] більшість коефіцієнтів рекомендується визначати експериментально і вона повніше враховує технологічні особливості котлів, ми застосуємо таку методику. Щодо інших, то необхідно зазначити, що вони не повною мірою враховують технологічні особливості котлів, а отже, є наближено усередненими. Згідно з [9]

питомі викиди оксидів азоту $m_{\text{NO}_2}^{\text{TB}}$ (кг/МДж) визначаються за формулою:

$$m_{\text{NO}_2} = m_{\text{NO}_2}^{\text{пал}} + m_{\text{NO}_2}^{\text{пов}}, \quad (7)$$

де $m_{\text{NO}_2}^{\text{пал}}$ – викиди від згорання палива,
 $m_{\text{NO}_2}^{\text{пов}}$ – викиди від азоту, що знаходиться у повітрі.

Валові річні викиди M_{NO_2} будуть визначатися за формулою:

$$M_{\text{NO}_2} = m_{\text{NO}_2} \cdot B \cdot Q, \quad (8)$$

де В – витрати палива, кг/рік; Q – теплота згоряння палива, Мдж/кг.

Для твердого топлива $m_{\text{NO}_2}^{\text{пал}}$ визначається за формулами [9]:

$$m_{\text{NO}_2}^{\text{пал}} = 0,7 \cdot N_{\text{пал}} \cdot \beta_{\alpha_1} \cdot \beta_{\alpha_1} \cdot \beta_{\alpha_1} \cdot \beta_{Z_1} \cdot \beta_{\dots} \cdot \beta_{\text{см}} \cdot (9)$$

Величини у співвідношенні (9) визначаються за формулами:

$$N_{\text{пал}} = 10 \cdot \frac{C_N}{O}, \quad (10)$$

де C_N – вміст азоту в паливі у % на робочу масу;
 Q – теплота згоряння палива, МДж/кг. Коефіцієнт надлишку повітря $\beta_{от}$ визначається за формулою:

$$\beta_{\alpha_{\Gamma}} = (0,53\alpha_{\Gamma} + 0,12)^2, \quad (11)$$

де α_r – коефіцієнт надлишку повітря в пальнику, значення якого знаходяться у діапазоні $0,9 \div 1,3$.

Коефіцієнт впливу частки первинного повітря в пальнику $\beta_{\text{впл}}$ визначається за формулою:

$$\beta_{\alpha_{\pi}} = 1,73\alpha_{\Pi\Pi} + 0,48, \quad (12)$$

де $\alpha_{\text{ш}}$ – частка первинного повітря щодо теоретично необхідного, значення якого знаходяться у діапазоні $0,15 \div 0,55$.

Коефіцієнт впливу рециркуляції димових газів у первинне повітря $\beta_{\text{г}}$ визначається за формулою:

$$\beta_{\text{CT}} = 1 - 1,6 \cdot 10^{-2} \sqrt{r_r}, \quad (13)$$

де r_r – ступінь рециркуляції димових газів через пальники (%), значення якого знаходяться у діапазоні $0 \div 30\%$.

Коефіцієнт впливу максимальної температури на ділянці утворення паливних оксидів азоту β_{θ} визначається за формулою:

$$\beta_- = 0.11(T_{Ar} - 1100)^{1/3}, \quad (14)$$

де T_{AG} – температура за зоною активності горіння, що знаходиться у діапазоні $1250 \div 2050$ (K).

Коефіцієнт впливу сумішоутворення в корені факелу для прямотруменивих горілок $\beta_{\text{см}}$ визначається за формулою:

$$\beta_{\text{CM}} = 0,98W_{\text{CM}} - 0,47, \quad (15)$$

де W_{cm} – коефіцієнт, значення якого знаходяться у діапазоні $1.4 \div 4.0$ [10].

Повітряні оксиди азоту $m_{\text{NO}_2}^{\text{TB}}$ визначаються за рівнянням Зельдовича:

$$m_{\text{NO}_2}^{\text{пов}} = 1.54 \cdot 10^{16} \sqrt{\frac{\alpha_{\text{AG}} - 1}{\alpha_{\text{AG}}}} \cdot \frac{\exp\left(-\frac{60000}{T_{\text{AG}}}\right)}{T_{\text{AG}}}, \quad (16)$$

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

$$\alpha_{\text{AG}} = \alpha_{\text{A}} + 0,5 \cdot \alpha_{\text{AG}}, \quad (17)$$

де $\Delta\alpha_{\text{T}}$ – присоси в топку, що можна визначити за формулою

$$\Delta\alpha_{\text{T}} = 0,1 \cdot \alpha_{\text{T}}. \quad (18)$$

Визначимо питомі викиди NO_2 викидів від згоряння палива ($m_{\text{NO}_2}^{\text{нал}}$) для середнього необхідного надлишку повітря для горіння ($\alpha_{\text{T}} = 1,15$ і $\beta_{\text{ат}} = 0,532$), а також для Донецького вугілля марки АСШ ($Q = 20,89$ МДж/кг, $C_{\text{N}} = 0,6\%$ [11]) і для середніх значень інших коефіцієнтів: $\beta_{\text{анп}} = 1,085$ (для $\alpha_{\text{анп}} = 0,35$); $\beta_{\text{т}} = 0,938$ (для $r_{\text{т}} = 15\%$); $\beta_{\text{о}} = 0,901$ (для середнього значення T_{AG} , що можна рахувати як 1900 К); для прямоструменевих горілок $\beta_{\text{см}} = 2,176$ (для $W_{\text{см}} = 2,7$). Тоді, згідно з (9), $m_{\text{NO}_2}^{\text{нал}} = 0,242$ кг/ГДж. Визначимо для цих же умов ($\alpha_{\text{T}} = 1,15$ та $T_{\text{AG}} = 1900$ К) питомі викиди повітряних оксидів азоту ($m_{\text{NO}_2}^{\text{пов}}$). Оскільки з (17) $\alpha_{\text{AG}} = 1,208$ та (18) $\Delta\alpha_{\text{T}} = 0,115$, то згідно з (16) $m_{\text{NO}_2}^{\text{пов}} = 0,065$ кг/ГДж. Видно, що для цих умов $m_{\text{NO}_2}^{\text{пов}}$ становить близько 27%. Таким чином, у результаті наших розрахунків можна стверджувати, що повні питомі викиди NO_2 , які будемо вважати рівними контамінаційному еквіваленту енергії (КЕЕ), становлять 0,307 кг/ГДж. Валові річні викиди згідно з (8) будуть становити $M_{\text{NO}_2} = (0,307 \text{ кг/ГДж}) \cdot (6 \cdot 10^9 \text{ кг/рік}) \cdot (20,89 \cdot 10^{-3} \text{ ГДж/кг}) = 38,48$ тис. т/рік.

Для прикладу проаналізуємо викиди для ТЕС, що складається із 5 блоків по 500 МВт. За неефективної роботи ОСО, що призводить до підвищення температури конденсату, наприклад, із 30°C до 31°C, зниження вакууму становить 0,25 кПа, що призведе до падіння потужності кожної турбіни потужністю 500 МВт на $\Delta N = 1,0$ МВт і, відповідно, всієї ТЕС на 5,0 МВт, що буде становити 0,2% втрат потужності і за необхідності стабільного виробітку електроенергії на такий же відсоток збільшить витрати палива, а отже, кількість викидів шкідливих речовин. Неефективна робота ОСО, що спричиняє підвищення температури в конденсаторі лише на 1°C, призведе до надлишкових викидів діоксиду азоту 77,0 т/рік. Такий результат відображає суттєві негативні екологічні наслідки недостатньо ефективної роботи ОСО (таблиця).

Необхідна ефективність очищення. Для визначення ефективності очищення визначимо концентрацію NO_2 у димових газах під час спалювання вугілля марки АШ (АСШ). Порівняємо цю величину із гранично допустимою концентрацією у повітрі робочої зони (ГДКрз), тобто з нормативною концентрацією, яка під час щоденної роботи протягом усієї трудової діяльності не викликає захворювань або відхилень у стані здоров'я [12]. Зауважимо, що ГДКрз є однією

із найважливіших екологічних характеристик роботи підприємства, яка нормує вміст шкідливих речовин у викидах і скидах. Згідно з [3] ГДКрз для NO_2 становить 2 мг/м³.

Таблиця

Валові річні викиди, контамінаційний еквівалент енергії (КЕЕ) та валові викиди за рахунок недогріву води ОСО для ТЕС потужністю 2500 МВт

Шкідлива речовина	Валові викиди, тис. т/рік	КЕЕ кг/ГДж	Валові викиди за рахунок недогріву води ОСО на 1°C т/рік
NO_2	38,48	0,307	77,0

Для дотримання ГДКрз по NO_2 необхідно підтримувати відповідну їх концентрацію у димових газах, і тому таку ефективність очищення (ЕО) для NO_2 ми пропонуємо визначати за співвідношенням:

$$(\text{ЕО})_{\text{NO}_2} = \left(1 - \frac{(\text{ГДЗрз})_{\text{NO}_2}}{C_{\text{NO}_2}}\right) \cdot 100, \%, \quad (19)$$

де $(\text{ГДЗрз})_{\text{NO}_2}$ у г/м³; C_{NO_2} – концентрація NO_2 у димових газах (г/м³), що визначається за формулою, вказаною у [9]:

$$C_{\text{NO}_2} = \frac{M_{\text{NO}_2}}{B \cdot V_{\text{зг}}} \text{ Equation. 3, г/м}^3, \quad (20)$$

де M_{NO_2} – викиди NO_2 , г/с; B – витрата палива, кг/с; $V_{\text{зг}}$ – питомий об'єм димових газів від згоряння палива (м³/кг), який розраховуємо за формулою, наведеною у [13]:

$$V_{\text{зг}} = \frac{C^{\text{P}} + 0,375 \cdot S_{\text{оп+к}}^{\text{P}}}{0,54 \cdot (\text{RO}_2 + \text{CO})}, \quad (21)$$

$$\text{RO}_2 = \frac{21}{(1 + \beta) \cdot \alpha}. \quad (22)$$

Коефіцієнт β визначається за співвідношенням:

$$\beta = 2,37 \cdot \frac{H^{\text{P}} - 0,126 \cdot O^{\text{P}}}{C^{\text{P}} + 0,375 \cdot S_{\text{оп+к}}^{\text{P}}}. \quad (23)$$

Відповідно, величина CO обраховується за виразом:

$$\text{CO} = \frac{(21 - \beta \cdot \text{RO}_2) - (\text{RO}_2 + O_2)}{0,65 + \beta}. \quad (24)$$

Враховуючи, що для наших умов коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 1,15$, тоді $O_2 = 2,2\%$. Далі за (24) розрахуємо кількість викидів CO для характеристик палива марки АШ (АСШ) на робочу масу (X^{P}): вміст вуглецю $C^{\text{P}} = 63,8\%$; вміст загальної сірки $S_{\text{оп+к}}^{\text{P}} = 1,7\%$; вміст водню $H^{\text{P}} = 1,8\%$; вміст кисню $O^{\text{P}} = 1,3\%$ [11], а також розраховані за (23) $\beta = 0,06$; за (22) $\text{RO}_2 = 16,5\%$, за (21) визначаємо питомий об'єм димових газів, що рівний $V_{\text{зг}} = 6,63$ м³/кг. Отже, враховуючи, що $M_{\text{NO}_2} = 38,48$ тис. тон/рік = $1,22 \cdot 10^3$ г/с, а $B = 6 \cdot 10^9$ кг/рік = 190 кг/с і $V_{\text{зг}} = 6,63$ м³/кг, за (20) визначаємо концентрацію NO_2 , що рівна $C_{\text{NO}_2} = 0,968$ г/м³ = 968 мг/м³.

Оскільки, згідно з [3], $(ГДКрз)NO_2 = 2 \text{ мг/м}^3$, то за (19) ефективність очищення становить 99,8%, що потребує глибокого очищення димових газів від діоксиду азоту для забезпечення санітарно-гігієнічних вимог робочої зони ТЕС за умов, розглянутих у цій роботі.

Отже, результати дослідження засвідчують важливість ефективного функціонування оборотних систем охолодження і необхідність використання глибокого очищення димових газів від NO_2 для забезпечення санітарно-гігієнічних вимог робочої зони ТЕС.

Література

1. Про Основні засади (Стратегію) екологічної політики України на період до 2030 року: Закон України від 28 лютого 2019 року № 2697-VIII/ Верховна Рада України. *Відомості Верховної Ради України*. 2019. № 16. Ст. 70.
2. Інформаційне агенство Мінпром. Київ, 2020. URL: <http://minprom.ua/>.
3. ГОСТ 12.1.005-88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. Межгосударственный стандарт. Москва: Стандартинформ, 2008.
4. Barck, C., Sandstrom, T. Lundahl, J., Hallden, G, Svartengren, M., Strand, V., Rak, S., Bylin, G. Ambient level of NO_2 augments the inflammatory response to inhaled allergen in asthmatics. *Respiratory Medicine*. 2002. Volume 96. Issue 11. P. 907–917.
5. Farraj, Aimen K., Malik, Fatiha; Haykal-Coates; Najwa; Walsh, Leon; Winsett, Darrell; Terrell, Dock; Thompson, Leslie C., Cascio, Wayne E., Hazari, Mehdi S. Morning NO_2 exposure sensitizes hypertensive rats to the cardiovascular effects of same day O_3 exposure in the afternoon. *Inhalation Toxicology*. 2016. Volume 28. Issue 4. P. 170–179.
6. Зельдович Я.Б. Избранные труды. Химическая физика и гидродинамика. Москва: Наука, 1984. 374 с.
7. Котлер В.Р., Сосин Д.В. Концентрическое сжигание как способ снижения выбросов NO_x в атмосферу // *Экология производства*. 2008. №3, прил. *Энергетика*. С.7–8.
8. Кузнецов И.Е. Защита атмосферного воздуха от загрязнений. Симферополь: Таврия, 1973. 124 с.
9. РД. 34.02.304-95. Методические указания по расчету выбросов оксидов азота с дымовыми газами котлов тепловых электростанций. Москва, 1996. 14 с.
10. Руководящие указания. Проектирование топок с твердым шлакоудалением. Ленинград: НПО ЦКТИ, вып. 42, 1981.
11. Роддатис К.Ф., Полтарецкий А. Н. Справочник по котельным установкам малой производительности / Под ред. К.Ф. Роддатиса. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 488 с.
12. Снітинський В.В., Екотоксикологія: Навчальний посібник/ В.В. Снітинський, П.Р. Хірівський, П.С. Гнатів, Г.Л. Антоняк, Н.С. Панас, М.А. Петровська. Херсон: Олді-плюс, 2011. 330 с.
13. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). Издание третье перераб. и дополн. Санкт-Петербург: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. 256 с.