

ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ВОДОВІДВЕДЕННЯ

УДК 504.03:504.05:628.51:628.179.2 <https://doi.org/10.31713/vt4202015>

Гаєвський В. Р., к.т.н, доцент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, v.r.haievskiy@nuwm.edu.ua), **Кочмарський В. З., к.ф.-м.н., професор** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, v.z.kochmarskii@nuwm.edu.ua), **Филипчук В. Л., д.т.н., професор** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, v.l.fylypchuk@nuwm.edu.ua)

ВПЛИВ ВІДХИЛЕНЬ У РОБОТІ ОБОРОТНИХ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ ТЕС НА ВЕЛИЧИНУ ВИКИДІВ ДІОКСИДУ ТА ОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ

Розраховано викиди діоксиду і оксиду вуглецю на прикладі ТЕС потужністю 2500 МВт, що працює на вугіллі марки АШ (АСШ). Зроблена оцінка наслідків недостатньо ефективної роботи оборотних систем охолодження (ОСО) для паросилової частини ТЕС. Встановлено, що валові річні викиди CO₂ і СО складають 15520 та 373 тис. тонн/рік відповідно. Показано, що недоліки у роботі ОСО, які призводять до недогріву охолоджуючої води на 1° С, збільшують кількість викидів CO₂ на 31 тис. тонн/рік і для СО – на 0,75 тис. тонн/рік. Викиди СО складають 2,4% від викидів CO₂, що значно підсилює негативний вплив димових газів на стан навколишнього середовища, оскільки оксид вуглецю є токсичною речовиною.

Ключові слова: теплові електричні станції; оборотна система охолодження; шкідливі гази; діоксид та оксид вуглецю; методики розрахунку викидів.

Вступ

Згідно з основами національної безпеки України [1] і стратегією екологічного розвитку України до 2030 року [2] для підвищення індекса екологічної ефективності (Environmental Performance Index, EPI) планується зменшення енергоємності ВВП з 0.286 кг (2020 рік) до 0,186 кг (2030 рік) умовного палива (у.п.) на один долар США. Таке завдання стосується енергетики, яка є однією із найбільш енергоємних галузей промисловості. При цьому зниження енергоємності неодмінно означає зменшення екологічних ризиків об'єктів, що виробляють електричну енергію. З точки зору екологічних проблем елект-

172

ричні станції взагалі і їх основні елементи повинні відповідати екологічним нормативам [3].

Для виробництва електричної енергії використовують різні типи енергогенеруючих систем, основними з яких в Україні за 2020 рік згідно [4] є:

- атомні електростанції (АЕС) – 51,2%;
- теплові електростанції та теплоелектроцентралі (ТЕС і ТЕЦ) – 35,2%;
- гідроелектростанції (ГЕС і ГАЕС) – 5,1%.

Встановлена потужність енергоблоків ТЕС знаходиться у межах від 150 МВт до 3600 МВт. Основними ресурсами, потрібними для роботи електричних станцій є повітря, паливо і вода. Робота енергоблоків неможлива без відведення частини тепла в навколишнє середовище. Загальна кількість ТЕС і АЕС в Україні близько 50. Кількість відведеного тепла від них, а це приблизно 1,86 Дж теплової енергії на 1 Дж виробленої електричної енергії, суттєво впливає на екологічний стан навколишнього середовища. Крім цього, під час роботи ТЕС в атмосферу у вигляді твердих та газоподібних відходів надходить велика кількість шкідливих речовин. Вони розповсюджуються за декілька діб на десятки і сотні кілометрів, що суттєво порушує регіональний екологічний баланс навколишнього середовища.

Аналіз досліджень. За 2020 рік ТЭС України виробили 39,583 млн МВт·год електроенергії [4]. Для різних типів ТЕС в середньому на 1 МВт·год виробленої електроенергії витрачається 150–300 м³ води. Отже на вироблення електроенергії у 2020 році ТЕС України використали мінімум 5,9 млрд м³ води, з якої свіжа вода становить близько 10–20%. Основна частина спожитої води (близько 90%) використовується оборотними системами охолодження (ОСО) для конденсації пари в конденсаторах парових турбін. В результаті у 2020 році ОСО використали щонайменше 0,6–0,8 млрд м³ свіжої води. Це є суттєвим з точки зору загального водокористування, що значно впливає на водний баланс України.

Зауважимо, що ефективність роботи паротурбінних установок (ПТУ) залежить від температури охолоджуючої води (ОВ). Її підвищення призводить до збільшення тиску в паровому просторі конденсаторів і таким чином знижує коефіцієнт корисної дії ПТУ, що за умови виробництва сталої кількості енергії на стільки ж збільшує споживання палива і води.

В таких умовах виробництво електричної енергії супроводжується більшим утворенням і поширенням у навколишньому середо-

вищі шкідливих продуктів згоряння. Основна частина викидів шкідливих речовин ТЕС відноситься до паросилової частини. У їх складі тверді частинки (зола), діоксид азоту, діоксид сірки, оксид та діоксид вуглецю та викиди тепла. Особливо небезпечними для людини та довкілля є оксид та діоксид вуглецю. Оксид вуглецю (чадний газ), що утворюється внаслідок неповного згоряння палива, є токсичною речовиною 4 класу небезпеки, середньодобова ГДК якого становить 3.0 мг/м^3 (0,25%), а максимально разова ГДК – 5 мг/м^3 (0,42%) [3]. Діоксид вуглецю відноситься до парникових газів і його викиди мають специфічні наслідки, які в останні роки відокремились в окрему екологічну проблему глобального потепління [5–8].

Метою даної роботи є розрахунок викидів діоксиду і оксиду вуглецю на прикладі ТЕС потужністю 2500 МВт і оцінка наслідків недостатньо ефективної роботи ОСО для паросилової частини ТЕС.

Результати досліджень. Розрахунок впливу викидів діоксиду і оксиду вуглецю на навколишнє природне середовище для паросилової частини ТЕС виконано згідно наведеної схеми (рисунок).

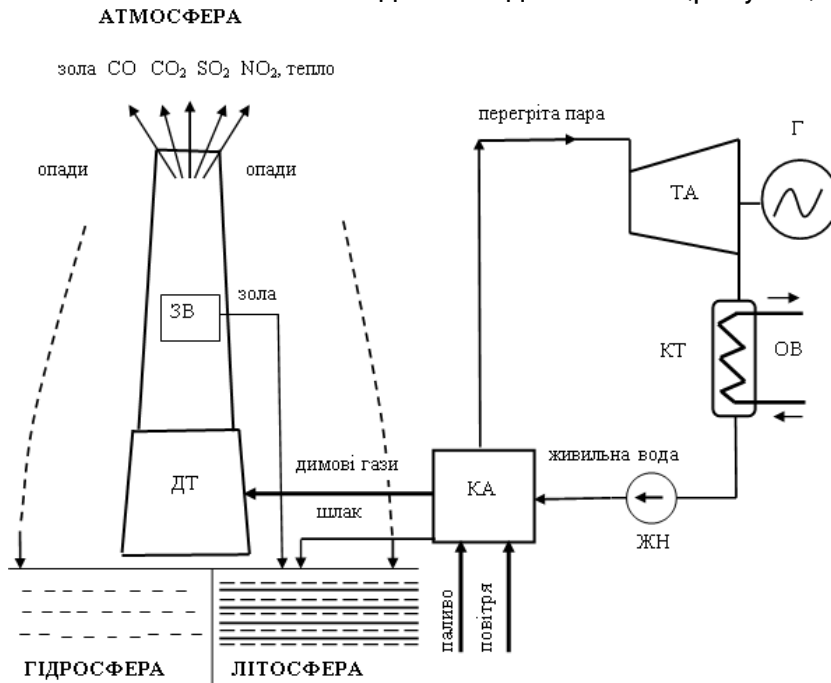


Рисунок. Схема екологічного впливу паросилової частини ТЕС:
ДТ – димова труба; ЗВ – золоуловлювання; КА – котлоагрегат; ЖН – живильний насос; ТА – турбоагрегат; Г – генератор; КТ – конденсатор турбіни;
ОВ – охолоджуюча вода

Розрахунок викидів діоксиду вуглецю. Маса викидів CO_2 згідно з

[9] визначається за формулою

$$M_{CO_2} = \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_C} \cdot K \cdot B \cdot \left(\frac{100 - (A + V + S)}{100} \right) \cdot \left(1 - \frac{q_4}{100} \right), \quad (1)$$

де $M_{тв}$ – викиди CO_2 , т/рік; q_4 – втрата теплоти від механічної неповноти згоряння, %; B – витрата палива, т/рік. Втрати від механічної неповноти згоряння (q_4) визначають за спеціальними номограмами [10] і для характеристик палива ($A^p = 22,9\%$, $C_r = 4\%$, $Q_{н^p} = 20,89$ МДж/кг) та водного шлаковидалення ($\alpha_{вк} = 0,85$) $q_4 = 1,27\%$. Також для вугілля марки АШ (АСШ), згідно [11] вміст золи складає $A = 22,9\%$, вміст летючих $V = 4,0\%$ і вміст сірки $S = 1,7\%$. Коефіцієнт глобального потепління (K) згідно [12] дорівнює одиниці ($K = 1$); μ_{CO_2} і μ_C – молярні маси CO_2 і вуглецю дорівнюють 44 г/моль і 12 г/моль відповідно.

Підставляючи числові дані, отримаємо величину валових викидів вуглекислого газу $M_{CO_2} = 15,52$ млн тон за рік, що становить 259% від маси спалювального палива. Контамінаційний еквівалент енергії (КЕЕ), що характеризує питоми забруднення, який дорівнює відношенню валових викидів до енергетичних затрат, для CO_2 становить 2,59/20,89 кг/МДж або 124 кг/ГДж.

Визначимо додаткове паливо, яке потрібно використати, якщо внаслідок порушень в роботі ОСО, наприклад, забруднення трубної системи конденсаторів відкладеннями, виникає збільшення недогріву ОВ. Прийmemo, що збільшення недогріву ОВ призвело до росту температури конденсації пари від $30^\circ C$ до $31^\circ C$ і, відповідно, до зниження потужності ТЕС з п'яти турбін (по 500 МВт кожна) на 0,2%. Звідси отримаємо, що недостатньо ефективна робота ОСО всього на $1^\circ C$ призведе до перевищення викидів CO_2 на 750 тон на рік. Підвищення температури конденсації на $1^\circ C$ приблизно дорівнює такому ж збільшенню недогріву охолоджуючої води, який може виникнути внаслідок нештатної роботи ОСО.

Розрахунок викидів оксиду вуглецю. Масова кількість викидів CO згідно [12] визначається за співвідношенням

$$M_{CO} = 10^{-3} \cdot q_3 \cdot Q_{н^p} \cdot R \cdot B \cdot \left(1 - \frac{q_4}{100} \right), \quad (2)$$

де M_{CO} – викиди CO , т/рік; q_3 – втрата теплоти від хімічної неповноти згоряння, %; q_4 – втрата теплоти від механічної неповноти згоряння, %; $Q_{н^p}$ – нижча теплота згоряння на робочу масу, МДж/кг; $R=1$ для твердого палива; B – витрата палива, т/рік.

Втрата теплоти від хімічної неповноти згоряння визначається (без врахування вмісту у вугільних димових газах H_2 і CH_4) за формулою:

$$q_3 = \frac{V_{зг}}{Q_H^p} \cdot 126.5 \cdot CO \cdot \left(1 - \frac{q_4}{100}\right), \quad (3)$$

де питомий об'єм димових газів від згоряння палива $V_{зг}$ (m^3/kg) розраховують за

$$V_{зг} = \frac{C^p + 0.375 \cdot S_{ор+к}^p}{0.54 \cdot (RO_2 + CO)}, \quad RO_2 = \frac{21}{(1 + \beta) \cdot \alpha}. \quad (4)$$

Коефіцієнт β визначається за співвідношенням

$$\beta = 2.37 \cdot \frac{H^p - 0.126 \cdot O^p}{C^p + 0.375 \cdot S_{ор+к}^p}. \quad (5)$$

Відповідно, величина CO обраховується за виразом

$$CO = \frac{(21 - \beta \cdot RO_2) - (RO_2 + O_2)}{0.65 + \beta}. \quad (6)$$

Враховуючи, що для наших умов коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 1,15$ і тоді $O_2 = 2,2\%$. Далі, за (6) розрахуємо кількість викидів CO для характеристик палива марки АШ (АСШ) на робочу масу (X^p): вміст вуглецю $C^p = 63,8\%$; вміст загальної сірки $S_{ор+к}^p = 1,7\%$; вміст водню $H^p = 1,8\%$; вміст кисню $O^p = 1,3\%$ [11], а також розраховані за (3) $q_3 = 2,75\%$; за (5) $\beta = 0,06$; за (4) $RO_2 = 16,5\%$ та $V_{зг} = 6,63 m^3/kg$ та за (6) $CO = 0,73\%$. Тоді викиди оксиду вуглецю (M_{CO}) складають 373 тис. тон/рік, що становить 6,22% від маси спалювального палива. КЕЕ для вугілля марки АСШ буде становити $6,22 \cdot 10^{-2} / 20,89$ кг/МДж або 2.98 кг/ГДж. Контамінаційний коефіцієнт для вугілля марки АСШ буде становити $6,22 \cdot 10^{-2} / 20,89$ кг/МДж або 2.98 кг/ГДж.

Додаткове спалювання палива при недогріві охолоджуючої води на $1^\circ C$ (аналогічно розрахунку CO_2) призводить до збільшення температури конденсації пари і відповідного зниження потужності турбін ТЕС на 0,2%. Отже, порушення штатного режиму роботи ОСО, яке призводить до збільшення недогріву ОВ на $1^\circ C$, спричиняє перевищення викидів CO на 31 тисячу тон за рік.

Можна показати, що підвищення температури конденсації на $1^\circ C$ приблизно дорівнює такому ж збільшенню недогріву охолоджуючої води, який може виникнути внаслідок нештатної роботи ОСО.

За співвідношення (4) визначаємо питомий об'єм димових газів ($V_{зг}$) в результаті спалювання вугілля марки АШ (АСШ), який становить $6,63 m^3/kg$. Використовуючи ці дані, можна розрахувати річний об'єм димових газів, які виділяє ТЕС потужністю 2500 МВт, що працює на вугіллі марки АСШ на прикладі міста Києва. Оскільки об'єм

димових газів за рік (V_p) при витраті палива $6 \cdot 10^9$ кг/рік становить $V_p = 6,63 \cdot 6 \cdot 10^9 = 39,78 \cdot 10^9$ (м³), а площа міста Києва $S = 0,836 \cdot 10^9$ м², то за рік роботи ТЕС виділяються димові гази, об'єм яких утворює над Києвом стовп, висотою 47,6 м.

Зведені екологічні показники ТЕС потужністю 2500 МВт, що використовує вугілля марки АСШ, розраховані за наведеними методами показано в таблиці.

Таблиця

Валові річні викиди, контамінаційні коефіцієнти та валові викиди за рахунок недогріву води ОСО для ТЕС, потужністю 2500 МВт

| Шкідлива речовина | Валові викиди, тис. тон/рік | КЕЕ, кг/ГДж | Валові викиди за рахунок недогріву води ОСО на 1° С, тис. тонн/рік |
|-------------------|-----------------------------|-------------|--|
| CO ₂ | 15520 | 123,7 | 31,0 |
| CO | 373 | 2,98 | 0,75 |

З таблиці видно, що відношення M_{CO_2}/M_{CO} становить 41,6 і для вугілля марки АСШ викиди CO становлять 2,4% від викидів CO₂, що є суттєвою величиною. Враховуючи, що оксид вуглецю є токсичною речовиною, то він значно підсилює негативний вплив діоксиду вуглецю на навколишнє середовище.

Висновки

Валові річні викиди CO₂ і CO для умовної ТЕС, потужністю 2500 МВт, яка працює на вугіллі марки АШ (АСШ), складають відповідно 15520 та 373 тис. тонн/рік, що відповідає об'єму стовпа димових газів над м. Київ висотою близько 47 метри.

Недоліки у роботі ОСО, які призводять до недогріву охолоджуючої води на 1° С, збільшують кількість викидів CO₂ на 31 тис. тонн/рік і для CO – на 0,75 тис.тонн/рік, внаслідок чого співвідношення валових викидів діоксиду вуглецю та оксиду вуглецю для вугілля марки АШ (АСШ) досягає 41,3.

Викиди CO складають 2,4% від викидів CO₂, що значно підсилює негативний вплив димових газів на стан навколишнього середовища, оскільки оксид вуглецю є токсичною речовиною. Це вказує на безперспективність розвитку вугільної теплової енергетики без розробки природоохоронних заходів щодо підвищення ефективності роботи оборотних системам охолодження.

1. Про основи національної безпеки України : Закон України від 26.09.2003 р. № 39. *Відомості Верховної Ради України*. 2. Про Основні засади (Стратегію)

екологічної політики України на період до 2030 року : Закон України від 28 лютого 2019 р. № 2697-VIII. *Відомості Верховної Ради (ВВР)*. 2019. № 16. Ст. 70. **3.** Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин в атмосферному повітрі населених місць : Наказ МОЗ від 14.01.2020 р. № 52. *Зареєстровано в Міністерстві юстиції України*. 10 лютого 2020 р. № 156/34439. **4.** Exploration & Production Consulting (новини 15:30 / 13 січня 2021). **5.** United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC. 09.05. 1992. *Рамкова конвенція ООН зі зміни клімату*. **6.** Про ратифікацію Рамкової конвенції ООН про зміну клімату : Закон України від 29 жовтня 1996 року, N 435/96-ВР. *Відомості Верховної Ради України (ВВР)*. 1996. N 50, ст. 277. **7.** Кіотський протокол (додатковий протокол до рамкової угоди 1997 року). Прийнятий у 2005 році. **8.** Paris climate change conference (COP21/CMP11). 30.11–12.12, 2015. un.org/sustainabledevelopment/ru/cop21/. **9.** Методические указания и руководство по количественному определению объема выбросов парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность в Российской Федерации. 30.06.2015. **10.** Мейкляр М. В. Краткий справочник по паровым котлам, М.–Л. : Госэнергоиздат, 1961. 104 с. **11.** Роддатис К. Ф., Полтарецкий А. Н. Справочник по котельным установкам малой производительности / под ред. К. Ф. Роддатиса. М. : Энергоатомиздат, 1989. 488 с. **12.** Внуков А. К. Защита атмосферы от выбросов энергообъектов : справочник. М. : Энергоатомиздат, 1992. 176 с.

REFERENCES:

1. Pro osnovy natsionalnoi bezpeky Ukrainy : Zakon Ukrainy vid 26.09.2003 r. № 39. *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy*. **2.** Pro Osnovni zasady (Stratehiuu) ekolohichnoi polityky Ukrainy na period do 2030 roku : Zakon Ukrainy vid 28 liutoho 2019 r. № 2697-VIII. *Vidomosti Verkhovnoi Rady (VVR)*. 2019. № 16. St. 70. **3.** Pro zatverdzhennia hiiienichnykh rehlamentiv dopustymoho vmistu khimichnykh i biolohichnykh rehovyn v atmosfernomu povitri naselenykh mists : Nakaz MOZ vid 14.01.2020 r. № 52. *Zareiestrovano v Ministerstvi yustytysii Ukrainy*. 10 liutoho 2020 r. № 156/34439. **4.** Exploration & Production Consulting (новини 15:30 / 13 січня 2021). **5.** United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC. 09.05. 1992. *Ramkova konventsiiia OON zi zminy klimatu*. **6.** Pro ratyfikatsiiu Ramkovoii konventsii OON pro zminu klimatu : Zakon Ukrainy vid 29 zhovtnia 1996 roku, N 435/96-VR. *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy (VVR)*. 1996. N 50, st. 277. **7.** Kiotskyi protokol (dodatkovyi protokol do ramkovoii uhody 1997 roku). Pryiniatyi u 2005 rotsi. **8.** Paris climate change conference (COP21/CMP11). 30.11–12.12, 2015. un.org/sustainabledevelopment/ru/cop21/. **9.** Metodicheskie ukazaniya i rukovodstvo po kolichestvennomu opredeleniyu obyema vyibrosov parnikovyyih gazov organizatsiyami, osuschestvlyayuschimi hozyaystvennuyu i inuyu deyatelnost v Rossiyskoy Federatsii. 30.06.2015. **10.** Meyklyar M. V. Kratkiy spravochnik po parovym kotlam, M.–L. : Gosenergoizdat, 1961. 104 s. **11.** Roddatys K. F., Poltaretskiy A. N. Spravochnik po kotelnyim ustanovkam maloy proizvoditelnosti / pod red. K. F. Roddatisa. M. : Energoatomizdat, 1989.

488 s. 12. Vnukov A. K. Zashchita atmosferyi ot vyibrosov energoobyektov : spravochnik. M. : Energoatomizdat, 1992. 176 s.

Haievskiy V. R., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor, Kochmarskiy V. Z., Candidate of Physico-Mathematical Sciences (Ph.D.), Professor, Fylypchuk V. L., Doctor of Engineering, Professor (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

INFLUENCE OF DEVIATIONS IN THE OPERATION OF CIRCULATING COOLING SYSTEMS OF TPP ON THE AMOUNT OF DIOXIDE AND OXIDE CARBON EMISSIONS

According to the strategy of environmental development of Ukraine until 2030, in order to increase the Environmental Performance Index (EPI), it is planned to reduce the energy intensity of GDP from 0.286 kg (2020) to 0.186 kg (2030 year) of standard fuel. one US dollar. This challenge concerns energy, which is one of the most energy-intensive industries. At the same time, a decrease in energy intensity will certainly mean a decrease in the environmental risks of facilities that produce electricity. From the point of view of environmental problems, power plants in general and their main elements must comply with environmental standards.

2020 TPPs of Ukraine produced 39,317 billion MWh of electricity. For various types of TPPs, an average of 1 MWh of generated electricity is consumed 150 - 300 m³ of water. So for the generation of electricity in 2020, TPPs of Ukraine used at least 5.9 billion m³ of water, of which fresh water is about 10-20%. The production of electrical energy is accompanied by a large formation and distribution of harmful combustion products in the environment. The main part of the emissions of hazardous substances from TPPs is related to the steam power section. They include particulate matter (ash), nitrogen dioxide, sulfur dioxide, carbon monoxide and dioxide, and heat emissions. Carbon monoxide and carbon dioxide are especially dangerous for humans and the environment.

The purpose of this work is to develop emissions of carbon dioxide and monoxide using the example of a thermal power plant with a capacity of 2500 MW and assess the consequences of insufficiently effective circulation cooling system CCS operation for the steam power section of a thermal power plant.

Emissions of carbon dioxide and monoxide on the example of a thermal power plant with a capacity of 2500 MW, operating on coal

grade ASS are calculated in the work. An assessment was made of the consequences of insufficiently effective CCS operation for the steam power section of the TPP. It has been established that the gross annual emissions of CO₂ and CO are 15520 and 373 thousand tons / year, respectively. It is shown that shortcomings in CCS operation, which lead to subcooling water by 1° C, increase the amount of CO₂ emissions by 31 thousand tons / year and for CO – by 0.75 thousand tons / year. CO emissions account for 2.4% of CO₂ emissions, significantly increasing the negative impact of flue gases on the environment, since carbon monoxide is a toxic substance.

Keywords: thermal power plants; circulation cooling system; harmful gases; carbon dioxide and oxide; emission calculation methods.

Гаевский В. Р., к.т.н., доцент, Кочмарский В. З., к.ф.-м.н., профессор, Филипчук В. Л., д.т.н., профессор (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

ВЛИЯНИЕ ОТКЛОНЕНИЙ В РАБОТЕ ОБОРОТНЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЭС НА ВЕЛИЧИНУ ВЫБРОСОВ ДИОКСИДА И ОКСИДА УГЛЕРОДА

Рассчитано выбросы диоксида и оксида углерода на примере ТЭС мощностью 2500 МВт, работающей на угле марки АШ (АСШ). Произведена оценка последствий недостаточно эффективной работы оборотных систем охлаждения для паросиловой части ТЭС. Установлено, что валовые годовые выбросы CO₂ и CO составляют 15520 и 373 тыс.тонн / год соответственно. Показано, что недостатки в работе ОСО, которые приводят к недогреву охлаждающей воды на 1° C, увеличивают количество выбросов CO₂ на 31 тыс.т онн / год и для CO – на 0,75 тыс. тонн / год. Выбросы CO составляют 2,4% от выбросов CO₂, что значительно усиливает негативное влияние дымовых газов на состояние окружающей среды, поскольку оксид углерода является токсичным веществом.

Ключевые слова: тепловые электрические станции; обратная система охлаждения; вредные газы; диоксид и оксид углерода; методики расчета выбросов.
