

ЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.311:502.5

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/36>

Беднарська І.С.

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

Шелешей Т.В.

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

Риндюк Д.В.

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

Беднарська Я.С.

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

ОЦІНКА ВПЛИВУ МАРКИ МАЗУТУ НА ВИКИДИ СІРЧИСТОГО АНГІДРИДУ НА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТАХ

У статті розглядається стан екологічної ситуації в країні й основні джерела забруднення навколишнього середовища. Незважаючи на впровадження «зеленого тарифу» й досліджень альтернативних джерел енергії, більшість екологічних проблем спричиняє саме енергетика, зокрема, теплова енергетика. Викладається аналіз впливу підприємств теплоенергетики на екологічний стан. Оскільки питання утилізації відходів не вирішено, механізми фінансування не передбачено, алгоритм енергооснащення не розроблено, а підзаконні акти не адаптовано, поставлено завдання вирішити й надати рекомендації, яке з видів палива, що використовується на великих енергетичних об'єктах, несе меншу загрозу для навколишнього середовища. До шкідливих викидів, що потрапляють в атмосферу під час спалювання мазуту, належать: речовини у вигляді суспендованих твердих частинок, оксид азоту NO , діоксид азоту NO_2 , оксиди сірки SO_2 та SO_3 , оксиди вуглецю CO , діоксид вуглецю (вуглекислий газ CO_2), мазутна зола (в перерахунку на ванадій або п'ятиоксид ванадію), метан CH_4 . Одним із найбільш токсичних газоподібних викидів енергоустановок при спалюванні й вугілля, і мазуту є діоксид сірки SO_2 , що становить 98–99% викидів сірчистих сполук теплової електростанції. Основною метою дослідження є визначення впливу марки мазуту на показник емісії викидів сірчистого ангідриду. Проаналізовано вплив на навколишнє середовище сірчистого ангідриду, що виділяється разом із продуктами згоряння під час спалювання різних марок мазуту й потрапляє в атмосферу разом із відхідними шкідливими газами. Зроблені рекомендації щодо вибору марки мазуту для спалювання на енергетичних установках великої потужності. Було розраховано показники емісії при спалюванні різних марок мазуту з врахуванням відсутності сіркоочисної установки й однакових умов зв'язування сірки золою або сорбентом в енергетичній установці. Встановлено, що найбільш доцільна з екологічного боку марка мазуту для спалювання на енергетичних установках – це малосірчистий мазут 40, оскільки показник емісії сірчистого ангідриду найменший. Отримані поліноміальні залежності показника емісії сірчистого ангідриду від нижчої робочої теплоти згоряння палива й вмісту сірки в паливі на робочу масу.

Ключові слова: теплоенергетика, марка мазуту, спалювання, шкідливі викиди, екологія, показник емісії, сірчистий ангідрид, оксиди сірки.

Постановка проблеми. Бурхливий розвиток людства, що розпочався у ХХ столітті, як технологічної цивілізації привів до різкого збільшення

енергетичних потреб. У повітря кожного року потрапляє понад 6 млн тонн речовин, які забруднюють атмосферу, зокрема вуглекислого газу.

Головними забруднювачами є промислові підприємства й великі об'єкти теплоенергетики. Тому ще на початку XXI століття екологічні проблеми здобули статус глобальних [1].

На сучасному етапі розвитку суспільства екологія вирішує коло проблем і користується методами, матеріалами, принципами, які далеко виходять за межі суто біологічних наук, оскільки проблема стану навколишнього середовища постає все гостріше.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Незважаючи на впровадження «зеленого тарифу» й дослідження альтернативних джерел енергії, більшість екологічних проблем спричиняє саме енергетика, а зокрема, тепла енергетика. І нате-пер головна мета науковців у сфері теплоенергетики – це зменшення викидів шкідливих речовин.

Коли згорає паливо, в повітря потрапляє велика кількість шкідливих речовин. Це газоподібні оксиди сірки й азоту, тверді частки золи й сполуки важких металів [2]. Не можна забувати й про величезну кількість вуглекислого газу, який створює парниковий ефект і змінює тепловий баланс Землі. Саме тому найактуальнішою темою найближчого десятиліття є розробки й дослідження задля владнання згубливого впливу теплоенергетики. І незважаючи на поставлені задачі країн Західної Європи швидше перейти на альтернативні джерела енергії, цього так швидко не досягти, й теплоенергетика ще довго слугуватиме одним із провідних джерел енергії.

Не дивлячись на те, що заявлена «Значна орієнтація на охорону навколишнього середовища з посиленням екологічних норм і розвитком генерації на базі нетрадиційних і поновлюваних джерел», реальної підтримки розвитку альтернативних джерел на світовому рівні не передбачено. Так само проігноровано екологічні складові розвитку електроенергетики, а саме проблеми теплового й газового забруднення атмосфери (викиди оксидів сірки, азоту тощо), нестачі водних ресурсів, пилового забруднення та забруднення поверхневих і підземних вод [1].

Для покращення екологічної ситуації країни Західної Європи створили Національний план скорочення викидів. Він створений задля поступового скорочення викидів діоксиду сірки й оксидів азоту. Національний план скорочення викидів встановлює обмеження на річні викиди обсягів SO_2 та NO_x .

Нещодавно Україна зобов'язалась дотримуватися положення Договору про заснування Енергетичного Співтовариства. Згідно з ним, після

2017 року всі спалювальні установки мають бути виконані, дотримуючись вимог Директиви 2001/80/ЄС, в якій йдеться про зменшення шкідливих викидів в атмосферу з великих промислових установок. Але оскільки країна не змогла вчасно виконати умови директиви, за статтею 4 їй надано можливість на тимчасовий відступ.

Строк дії Національного плану скорочення викидів: з 2018 по 2033 рік. Часу залишилось обмаль, а директива вимагає в найближчі роки зменшити кількість викидів деяких речовин у повітря від установок. Для забезпечення своїх зобов'язань Україна має скористатися успішним досвідом скорочення викидів забруднювальних речовин низкою європейських країн, зокрема Німеччини й Польщі, впродовж останніх 20 років [3].

Зниження викидів планується здійснити за допомогою будівництва нових модернізованих енергоблоків (27 нових блоків теплових електростанцій (далі – ТЕС) і теплоенергоцентралей (далі – ТЕЦ)), обмеженої кількості годин роботи енергоблоків із подальшим їх виведенням з експлуатації (133 установок) й оснащення наявних блоків газочисними спорудами (90 установок) [4].

Постановка завдання. Оскільки питання утилізації відходів не розв'язано, механізми фінансування не передбачено, алгоритм енергооснащення не розроблено, а підзаконні акти не адаптовано, слід надати рекомендації, яке з видів палива, що використовується на великих енергетичних об'єктах, несе меншу загрозу для навколишнього середовища.

У теплоенергетиці спалюють тверде паливо (вугілля), рідке (мазут) і газоподібне (природний газ). Проведено низку досліджень про вибір найкращого палива задля уникнення великої кількості шкідливих викидів в атмосферу. В порівнянні з твердим паливом мазут вважається значно екологічно чистішим, але кращий у цьому плані – природний газ. Тому багато блоків ТЕС і ТЕЦ, згідно з вище вказаними дослідженнями, переведено на природний газ. У котлах теплових електростанцій мазут, зазвичай, використовується як резервне паливо. Тому йому теж варто приділити увагу.

До шкідливих викидів, що потрапляють в атмосферу під час спалювання мазуту, належать: речовини у вигляді суспендованих твердих частинок, оксид азоту NO , діоксид азоту NO_2 , оксиди сірки SO_2 та SO_3 , оксиди вуглецю CO , діоксид вуглецю (вуглекислий газ CO_2), мазутна зола (в перерахунку на ванадій або п'ятиоксид ванадію), метан CH_4 . Одним із найбільш токсичних газопо-

дібних викидів енергоустановок під час спалювання і вугілля, і мазуту є діоксид сірки SO_2 , що становить 98–99% викидів сірчистих сполук ТЕС. Отже, основною метою дослідження є визначення впливу марки мазуту на показник емісії викидів сірчистого ангідриду.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Мазут, який використовується в енергетиці, представлений на ринку здебільшого трьох марок – 40, 100 і 200. У мазуті міститься 84–86% вуглецю та 11–12% водню, вміст води не перевищує 3–4%, а золи – 0,5% [7]. Сірка, яка міститься в мазуті, може бути поділена на горючу й негорючу. Вона входить до складу вуглеводневих палив як шкідлива домішка. Це зумовлене тим, що в камері згорання, з'єднуючись з киснем, вона утворює двооксид сірки (сірчистий ангідрид), частина якого окислюється, утворюючи вищий оксид SO_3 . А також у продуктах згорання завжди є пари води, які утворюють з парами SO_3 пари сірчаної кислоти H_2SO_4 . Наявність сірчаної кислоти в димових газах викликає низькотемпературну корозію поверхонь нагріву котла, газоходів і металевих конструкцій димової труби [5].

Також шкода сірчистого ангідриду полягає в тому, що кисень, який міститься в повітрі, разом зі світлом окислює сірчистий газ до отримання сірчистого ангідриду. Кінцевий продукт цієї реакції – аерозоль сірчаної кислоти в атмосфері. Це розчин кислоти в дощовій воді. Коли він випадає разом із дощем, то окислює ґрунт і негативно впливає на навколишнє середовище й людей. Учені вважають, що ці опади є однією з найважливіших причин деградації лісів. Від кислотних дощів страждають будівлі й споруди, кам'яні й металеві конструкції. Особливо страждають мармурові й вапнякові споруди. Через підвищену кислотність міського повітря останнім часом помітно прискорилося руйнування мармурових споруд і пам'ятників, що витримали натиск століть.

Як вказано вище, до основних марок мазуту, які використовуються в енергетиці [8], належать високосірчистий мазут марок 40, 100 й 200 і малосірчистий мазут 40 і 100. Вони відрізняються між собою енергетичним складом, а отже й кількістю викидів сірчистого ангідриду в результаті спалювання.

Валові викиди забруднювальних речовин і парникових газів визначаються за галузевим керуючим документом (далі – ГКД) 34.02.305–2002 шляхом постійних вимірювань концентрацій забруднювальних речовин у димових газах енергетичних установок і розрахункових методів

за даними про витрати й склад використаного палива й характеристики енергетичних і газоочисних установок. Розрахункові методи визначення викиду забруднювальної речовини базуються на використанні показника емісії, що характеризує масову кількість забруднювальної речовини, яка викидається енергетичною установкою в атмосферне повітря разом із димовими газами, віднесену до одиниці енергії, що виділяється під час згорання палива. Викид залежить від багатьох чинників. Показник емісії k_{SO_2} , г/ГДж оксидів сірки SO_2 та SO_3 в перерахунку на діоксид сірки SO_2 , який надходить в атмосферу з димовими газами, специфічний і розраховується за формулою [6]:

$$k_{\text{SO}_2} = \frac{10^6}{Q_i^r} \frac{2S^r}{100} (1 - \eta_I)(1 - \eta_{II}\beta), \quad (1)$$

де Q_i^r – нижча робоча теплота згорання палива, МДж/кг; S^r – вміст сірки в паливі на робочу масу за проміжок часу P , %; η_I – ефективність зв'язування сірки золою або сорбентом в енергетичній установці; η_{II} – ефективність очищення димових газів від оксидів сірки; β – коефіцієнт роботи сіркоочисної установки.

Нижча робоча теплота згорання палива (Q_i^r) – це кількість теплоти, виділеної під час повного згорання палива за вирахуванням теплоти конденсації водяної пари, що міститься в паливі.

Нижча теплота згорання розраховується за формулою Менделєєва:

$$Q_i^r = 339C^r + 1030H^r - 108,8(O^r - S^r) - 25W^r, \text{ кДж/кг}, \quad (2)$$

де C^r – масовий вміст вуглецю в паливі на робочу масу; H^r – масовий вміст водню в паливі на робочу масу; O^r – масовий вміст кисню в паливі на робочу масу; S^r – масовий вміст сірки в паливі на робочу масу; W^r – масовий вміст води в паливі на робочу масу.

Масовий вміст сірки в робочій масі потрібно визначати під час технічного аналізу палива відповідно до Державного стандарту (ГОСТ) 27313–95 (ISO 1170–77).

Усереднені значення вмісту сірки для різних видів і марок палива наведено в таблиці 1.

Ефективність зв'язування оксидів сірки золою або сорбентом в енергетичній установці η_I залежить від технології спалювання та хімічного складу палива, яке спалюється, і типу сорбенту. В розрахунках враховували однакові умови при спалюванні в одній і тій же енергетичній установці для всіх марок мазуту.

За відсутності даних для енергетичної установки про ефективність зв'язування сірки в топковому просторі значення η_t для різних технологій спалювання палива приймаються згідно з ГКД 34.02.305–2002.

За результатами розрахунків за формулою (1) в таблиці 2 наведено показники емісії сірчистого ангідриду під час спалювання різних марок мазуту.

Відповідно до таблиці 3 на рисунках 1 і 2 побудовані залежності показника емісії сірчистого ангідриду від вмісту сірки й нижчої теплоти згорання палива.

Як видно з рисунка 1, найбільш екологічно чистим є малосірчистий мазут марки 40. Під час його спалювання показник емісії сірчистого ангідриду найменший у порівнянні з марками високосірчистого мазуту. В дослідженнях участь брали

Таблиця 1

Склад енергетичних мазутів (ГКД 34.02.305–2002)

Показники	Марка мазуту				
	високосірчистий			малосірчистий	
	40	100	200	40	100
Середні:					
$S^{daf}, \%$	2,50	2,70	3,00	0,40	0,40
$C^{daf}, \%$	85,50	85,70	85,90	87,50	87,50
$H^{daf}, \%$	11,20	10,60	10,20	11,50	11,10
$(O + N)^{daf}, \%$	0,80	1,00	0,90	0,60	1,00
$Q^{daf}, \text{МДж/кг}$	40,40	40,03	39,77	41,24	40,82
Граничні:					
$A^d, \%$	0,15	0,15	0,30	0,15	0,15
Мазутна зола (V_2O_5), мг/кг	600	600	1200	600	600
$W^r, \%$	2,00	2,00	1,00	2,00	2,00

Таблиця 2

Результати розрахунків

Марка мазуту	$S(daf), \%$	$Q_i^r, \text{МДж/кг}$	$k(SO_2), \text{г/ГДж}$
високосірчистий мазут 100	2,7	39,11936	475,2507
високосірчистий мазут 200	3	39,22799	478,0515
малосірчистий мазут 100	0,4	39,89237	466,0415
малосірчистий мазут 40	0,4	40,30334	461,2893

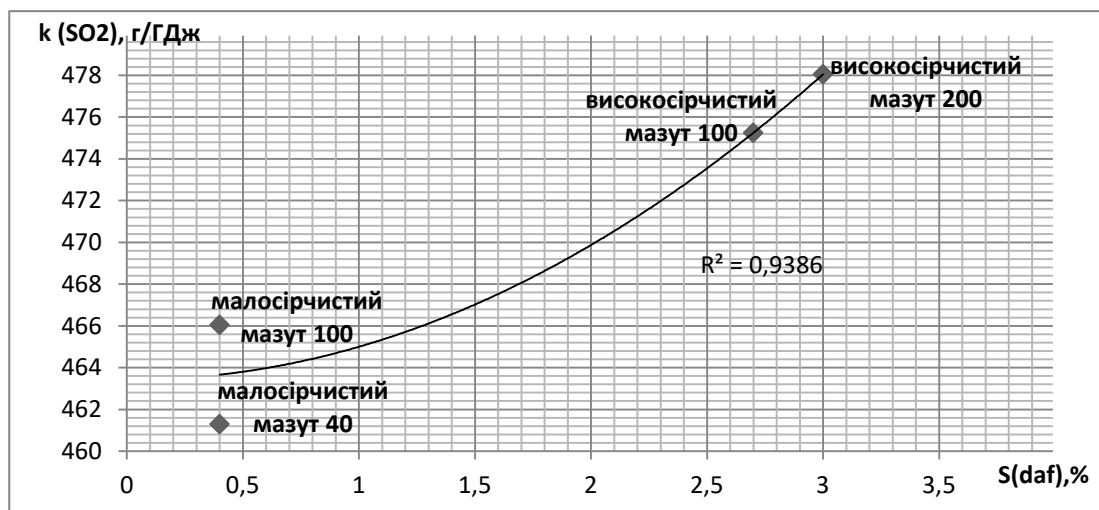


Рис. 1. Залежність показника емісії сірчистого ангідриду під час спалювання мазуту від марки мазуту



Рис. 2. Залежність показника емісії сірчистого ангідриду від нижчої теплоти згорання палива

також високосірчистий мазут 100, високосірчистий 200, малосірчистий 100 й, власне, малосірчистий мазут 40.

У результаті проведених розрахунків отримана функціональна поліноміальна залежність показника емісії сірчистого ангідриду:

$$k_{\text{SO}_2} = 1,6534 (S^{\text{daf}})^2 - 0,0885(S^{\text{daf}}) + 463,44, \quad (3)$$

На графіку 2 наведено залежність показника емісії сірчистого ангідриду від нижчої теплоти згорання палива:

З рисунка 2 також видно, що під час спалювання малосірчистого мазуту марки 40 в атмосфері потрапляє менша кількість оксидів сірки, ніж під час спалювання високосірчистих мазутів.

У результаті проведених розрахунків отримали функціональну поліноміальну залежність показника емісії сірчистого ангідриду:

$$k_{\text{SO}_2} = -1,1245 (Q_i^r)^2 + 75,691(Q_i^r) - 763,06, \quad (4)$$

Із залежностей 3 та 4 видно, що показник емісії сірчистого ангідриду залежить від вмісту сірки в елементарному складі палива й нижчої теплоти згорання палива.

Висновки. Одним із найбільш токсичних газоподібних викидів енергоустановок при спалюванні вугілля та мазуту є діоксид сірки SO₂, що становить 98–99% викидів сірчистих сполук ТЕС.

До основних марок мазуту, які використовуються в енергетиці належать високосірчистий й малосірчисті мазути трьох марок – 40, 100 і 200. Вони відрізняються між собою енергетичним складом, а отже й кількістю викидів сірчистого ангідриду в результаті спалювання.

Розрахункові методи визначення викиду забруднювальної речовини базуються на використанні показника емісії. Було розраховано показники емісії під час спалювання різних марок мазуту з врахуванням відсутності сіркоочисної установки й однакових умов зв'язування сірки золою або сорбентом в енергетичній установці. Встановлено, що найбільш доцільна з екологічного боку марка мазуту для спалювання на енергетичних установках – це малосірчистий мазут 40, оскільки його показник емісії сірчистого ангідриду найменший. Отримані поліноміальні залежності показника емісії сірчистого ангідриду від нижчої робочої теплоти згорання палива й вмісту сірки в паливі на робочу масу.

Список літератури:

1. Критичні зауваження щодо планів уряду України щодо розбудови енергетичної галузі. *Національний екологічний центр України*. Київ, 2011. 14 с.
2. Сердюк О.С. Сучасний стан та перспективи розвитку українських ТЕС. *Економічний вісник Донбасу*. 2016. С. 4–10.
3. Газизуллін І., Лозовий Л., Івахно О., Вільямс В., Петренко І., Зайка Р. Зменшення викидів у тепловій електроенергетиці України через виконання вимог Європейського енергетичного співтовариства : зелена книга / літ. редак. Н. Цісик. Київ : ТОВ Видавництво «Оптіма», 2011. 48 с.

4. Вербіцька І.Ю. Перспективи роботи ТЕС в умовах сучасних екологічних вимог. *Вугільний форум*. Дніпро, 12 квітня 2018 р. 17 с.

5. Нечаєва Т.П., Шульженко С.В., Сас Д.П., Парасюк М.В. Фактори екологічного впливу електроенергетичних об'єктів на довкілля. *Проблеми загальної енергетики. Серія «Екологічні аспекти енергетики та захист довкілля»*. 2008. Вип. 19. С.54–60.

6. ГКД 34.02.305-2002. Викиди забруднюючих речовин в атмосферу від енергетичних установок. Методика визначення. [Чинний від 2002-07-01]. Київ, 2002 .

7. Энергетическое топливо СССР (ископаемые угли, горючие сланцы, торф, мазут и горючий природный газ) : справочник / под ред. Т.А. Зикеева. Москва : Энергия, 1968. 111 с.

8. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод) / под ред. Н.В. Кузнецова, В.В. Митора, И.Е. Дубровского, Э.С. Карасиной. Москва : Энергия, 1973. 295 с.

9. Питомі показники викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря від основних виробництв промисловості та сільського господарства. Київ : Мінекоресурсів України, 2001.

Bednarska I.S., Sheleshei T.V., Ryndiuk D.V., Bednarska Ya.S. ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF THE FUEL OIL BRAND ON THE SULFUR ANGRIDES EMISSIONS IN ENERGY SITES

The article deals with the state of the environmental situation in the country and the main sources of environmental pollution. Despite the introduction of green tariffs and research into alternative energy sources, most environmental problems are caused by energy itself, and in particular by thermal energy. The analysis of influence of heat power companies on the ecological status is covered. Since the issue of waste management is not resolved, financing mechanisms are not provided, the power supply algorithm is not developed and the by-laws are not adapted, the task is to solve and make a recommendation which of the types of fuel used in large energy objects poses a lower threat to the environment. Solid fuel (coal), liquid (fuel oil) and gaseous (natural gas) are burned in the power industry. Fuel oil is considered to be much more environmentally friendly compared to solid fuels, but the clear leader in this regard is natural gas. Therefore, many TPPs and CHP units have been converted to natural gas. In boilers of thermal power plants, fuel oil is usually used as a backup fuel. So we should also pay attention. Emissions into the atmosphere during combustion of fuel oil include: substances in the form of suspended solids, nitric oxide NO, nitrogen dioxide NO₂, sulfur oxides SO₂ and SO₃, carbon monoxide CO, carbon dioxide (CO₂ carbon dioxide) (in terms of vanadium or vanadium pentoxide), methane CH₄. One of the most toxic gaseous emissions of power plants from combustion and coal and fuel oil is SO₂ sulfur dioxide, which makes up 98–99% of the emissions of sulfur compounds of TPPs. The main purpose of the study is to determine the effect of the brand of fuel oil on the emission index of sulfur dioxide. The environmental impact of sulfur dioxide, which is released along with combustion products during the combustion of different grades of fuel oil and enters the atmosphere with flue gases, is analyzed. Recommendations were made regarding the choice of the brand of fuel oil for high-power power plants.

Key words: thermal power engineering, fuel oil brand, combustion, harmful emissions, ecology, emission index, sulfuric anhydride, sulfur oxides.