

Охрана окружающей среды

УДК 662.613:628.512

Вольчин І.А., докт. техн. наук, **Гапонич Л.С.**, канд. техн. наук
Інститут вугільних енерготехнологій НАН України, Київ
вул. Андріївська, 19, 04070 Київ, Україна, e-mail: volchyn@gmail.com, haponych@ukr.net

Розрахунок параметрів димових газів вугільних теплових електростанцій на основі характеристик твердого палива

Розроблено інженерний метод визначення питомих викидів сухих димових газів на вугільних ТЕС України та очікуваної концентрації діоксиду сірки в них на основі даних технічного аналізу при наявності механічного недопалу палива q_4 . Розроблений метод пропонується використовувати для високореакційного (марки Г, ДГ, Д) та низькорекційного (марки А, П) вугілля в діапазоні зольності A^d від 4,0 до 50,0 % та теплоти згоряння $Q_{i,r}$ від 14,5 до 32,0 МДж/кг для котлів з рідким та твердим шлаковидаленням. Проведено розрахунки питомих та валових викидів сухих димових газів на вугільних ТЕС України та концентрації в них діоксиду сірки у 2012–2015 рр. Значення питомих викидів сірки в димових газах в останні роки знаходяться на рівні 16–18 г/кВт·год відпущеної електроенергії. Розроблений метод дає змогу зробити оцінку очікуваного викиду діоксиду сірки в димових газах та обрати необхідну технологію десульфуризації для дотримання вимог екологічного законодавства. *Бібл. 12, рис. 1, табл. 5.*

Ключевые слова: енергетика, екологія, теплоелектростанція, димові гази, шкідливі речовини, діоксид сірки.

Заходи зі зменшення викидів забруднюючих речовин з димових газів, що утворюються при спалюванні твердого палива на теплових електростанціях (ТЕС), мають екологічне, технологічне та економічне значення. В останні роки до 90 % викидів діоксиду сірки в Україні припадає на теплову енергетику. Збільшення частки вугілля в паливному балансі ТЕС до 98 % та в паливному балансі великих ТЕЦ до 20 % призвело до зростання валових викидів SO_2 до близько 1 млн т/рік. Поточні технологічні нормативи допустимих викидів [1] діоксиду сірки визначаються на основі якості палива, що постачається на ТЕС України, та враховують технологію спалювання. Граничні

значення викидів SO_2 в димових газах пилоспалювальних ТЕС при спалюванні антрациту не мають перевищувати 3400 мг/м³, пісного вугілля — 4500, кам'яного та бурого вугілля — 5100 мг/м³. Для спалювання твердого палива в циркулюючому киплячому шарі граничне значення викидів діоксиду сірки в димових газах становить 400 мг/м³.

Поточні технологічні нормативи допустимих викидів діоксиду сірки дійсні до 31 грудня 2017 р., після цього терміну вони мають відповідати вимогам перспективних технологічних нормативів для модернізованих установок. Україна як повноправний член Енергетичного співтовариства зобов'язана забезпечити

з 1 січня 2018 р. дотримання вихідної концентрації SO_2 в димових газах від існуючих вугільних ТЕС та ТЕЦ не вище 400 мг/м_n^3 , а для нових енергоблоків – 200 мг/м_n^3 , як цього вимагає наказ Мінприроди України від 22.10.2008 р. № 541 та Директива 2001/80/EU [2, 3]. У теперішній час рівень викидів SO_2 на ТЕС України перевищує ці граничні значення у 5–17 разів. У 2014 р. плата за викиди SO_2 на ТЕС перевищила 1,2 млрд грн (106,5 млн дол.).

Крім того, економіка країни зазнає величезних соціальних та економічних збитків через погіршення стану здоров'я населення, що проживає на прилеглих до вугільних ТЕС територіях, та постійне збільшення витрат на охорону здоров'я. Викиди забруднюючих речовин призводять до відчутного збільшення загального рівня смертності населення, вони збільшують число кардіо-пульмонарних захворювань та раку легень до 68 % від загальної смертності від усіх хвороб [4].

За оцінками Всесвітньої організації охорони здоров'я, збільшення середньодобової концентрації SO_2 в атмосферному повітрі на 10 мкг/м^3 призводить до збільшення загальної смертності на 0,6 %, від захворювань органів дихання – на 1,2 %, від серцево-судинних захворювань – на 0,6 %. Близько 3,7 млн додаткових випадків смерті в світі у 2012 р. пов'язані з забрудненням повітря від стаціонарних джерел. Рівень додаткової смертності через забруднення повітря в Україні досягає 30 тис. осіб на рік [4, 5], за нашими оцінками, через забруднення повітря діоксидом сірки він сягає 11 тис. осіб на рік.

В Україні обсяг безпосередніх затрат на лікування через захворювання, спричинені забрудненням повітря, перевищує 125 млн дол./рік [4]. Враховуючи негативний вплив SO_2 на здоров'я людей та на довкілля, необхідно невідкладно впроваджувати на ТЕС України технологічні заходи щодо скорочення викиду сірчастого ангідриду.

Для вибору джерел постачання на вугільні ТЕС палива, яке відповідало б вимогам поточних технологічних нормативів допустимих викидів діоксиду сірки, та для вибору технології сіркоочищення з метою дотримання перспективних технологічних нормативів допустимих викидів SO_2 визначальними є характеристики палива, оскільки саме вони формують величину концентрації діоксиду сірки після котельної установки та обумовлюють потрібну ефективність десульфуризації. У зв'язку з цим становить інтерес питання оцінки вихідної концентрації SO_2 у сухих відпрацьованих газах.

Мета роботи – створення інженерного методу розрахунку питомих викидів сухих димових газів на вугільних ТЕС та очікуваної концентрації діоксиду сірки в димових газах.

Питомий об'єм димових газів та очікувану концентрацію діоксиду сірки можна розрахувати за стандартною методикою [6, 7] при відомому елементному складі вугілля (на робочий стан): волога W^r ; зола A^r ; сірка S^r (суми сірки органічної S^r_o та сірки колчеданної або піритної S^r_p); вуглець C^r ; водень H^r ; кисень O^r ; азот N^r . Сірка сульфатна S^r_s входить до складу золи A^r .

Сухі димові гази складаються з діоксиду вуглецю, діоксиду сірки та молекулярного азоту. Теоретичний питомий об'єм сухих димових газів V^0_{DVG} ($\text{м}_n^3/\text{кг}$) за умови повного вигорання палива та відсутності в них кисню визначається так [6–8]:

$$V^0_{DVG} = 0,0899 C^r + (0,007 (1 - h_1) + 0,263) S^r + 0,008 N^r + 0,2094 H^r - 0,0263 O^r, \quad (1)$$

де h_1 – ефективність зв'язування сірки золою (або сорбентом) у котлі.

Ефективність зв'язування сірки в паливні для пилувугільних котлів з рідким шлаковидаленням складає 5 %, для котлів з твердим шлаковидаленням – 10 % [6].

Для забезпечення ефективного спалювання палива в котлі повітря для горіння подають з надлишком. Ще певна кількість повітря потрапляє в котел через нещільності (паразитні прismsокти). Питомий об'єм сухих димових газів V_{DFG} ($\text{м}_n^3/\text{кг}$) за нормальних умов (температура 0°C , тиск $101,35 \text{ кПа}$) та відомому значенні вмісту в них кисню O_2 (%) визначається за такою формулою (за умови повного вигорання палива):

$$V_{DFG} = [21 / (21 - O_2)] [0,0899 C^r + (0,007 (1 - h_1) b + 0,263) S^r + 0,008 N^r + 0,2094 H^r - 0,0263 O^r]. \quad (2)$$

Згідно наказу Мінприроди від 22.10.2008 р. № 541, стандартний вміст кисню O_2 при спалюванні твердого палива становить 6 %. При вмісті кисню 6 % в сухих димових газах перший множник у рівнянні (2) складає $1,4 = 21 / (21 - 6)$, тобто цей множник є коефіцієнтом надлишку повітря α .

Очікувана концентрація діоксиду сірки c_{SO_2} (мг/м_n^3) у димових газах за нормальних умов та стандартного вмісту кисню при повному спалюванні палива визначається так:

$$c_{SO_2} = 2 \cdot 10^4 S^r (1 - h_I) (1 - h_{II} b) / [1,4 (0,0899 C^r + (0,0333 - 0,007 h_I) S^r + 0,008 N^r + 0,2094 H^r - 0,0263 O^r)], \quad (3)$$

де h_{II} — ефективність очищення димових газів від діоксиду сірки; b — коефіцієнт роботи сіркоочисної установки.

Для вугільних ТЕС України втрати теплоти палива через хімічний недопал q_3 (%) є незначними (менше 0,1 %). Втрати теплоти з механічним недопалом q_4 (%) на ТЕС, що спалюють високореакційне вугілля марок Г, ДГ, складають 0,2–1,8 %, на ТЕС, що спалюють низькореакційне вугілля марок А, П, — 3,6–10,0 %.

Питомий об'єм сухих димових газів за нормальних умов та стандартного вмісту кисню з урахуванням наявності механічного недопалу можна визначити за формулою:

$$V_{DVG} (q_4) = 1,4 [0,0899 C^r (1 - (q_4/C^r) \times (Q_i^r/Q_c) + (0,0333 - 0,007 h_I) S^r + 0,008 N^r + 0,2094 H^r - 0,0263 O^r)], \quad (4)$$

де Q_i^r — нижча робоча теплота згоряння палива, МДж/кг; Q_c — теплота згоряння вуглецю до CO_2 , яка дорівнює 32,68 МДж/кг.

Для розрахунку концентрації діоксиду сірки в них отримаємо такий вираз:

$$c_{SO_2} = 2 \cdot 10^4 S^r (1 - h_I) (1 - h_{II} b) / [1,4 (0,0899 C^r (1 - (q_4/C^r) (Q_i^r/Q_c) + (0,0333 - 0,007 h_I) S^r + 0,008 N^r + 0,2094 H^r - 0,0263 O^r)]. \quad (5)$$

Рівняння (4) та (5) є основними формулами, за якими можна розрахувати питомий об'єм сухих димових газів та концентрацію в них діоксиду сірки за даними елементного складу палива (на робочий стан) при наявності механічного недопалу.

Для спрощення розрахунків нами пропонується замінити формули (4) та (5) на такі інженерні формули:

$$V_{DVG} (q_4) = 1,4 (0,0899 C^r + (0,0333 - 0,007 h_I) S^r + 0,008 N^r + 0,2094 H^r - 0,0263 O^r) [1 - (q_4/C^r) (Q_i^r/Q_c)]; \quad (6)$$

$$c_{SO_2} = 2 \cdot 10^4 S^r (1 - h_I) (1 - h_{II} b) / [1,4 (0,0899 C^r + (0,0333 - 0,007 h_I) S^r + 0,008 N^r + 0,2094 H^r - 0,0263 O^r)] \times [1 - (q_4/C^r) (Q_i^r/Q_c)]. \quad (7)$$

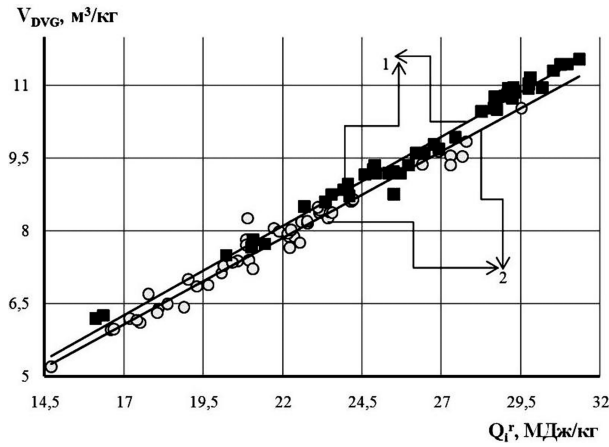
Проте в реальних умовах партії вугілля, що постачаються на ТЕС, супроводжуються технічним аналізом, де наведені тільки такі характеристики палива: волога на робочий стан W_t^r , зольність A^d та сірка S^d на сухий стан, нижча теплота згоряння палива Q_i^r на робочий стан палива. Дані технічного аналізу не дають змоги безпосередньо (за стандартною методикою) розрахувати питомі об'єми димових газів та концентрації в них SO_2 . Розроблений нами метод розрахунку питомих викидів сухих димових газів та концентрації в них діоксиду сірки дозволяє використовувати дані технічного аналізу.

Розрахунки питомих об'ємів сухих димових газів та концентрацій в них діоксиду сірки виконані за даними 96 сертифікатів на вугільну продукцію з шахт та збагачувальних фабрик Донецького вугільного басейну для зразків високо- та низькореакційного вугілля марок А, П, Г, ДГ, Д. Дані сертифікати складені та затверджені державним підприємством «УкрНДІвугле-збагачення», м. Луганськ. У сертифікаті визначено такі характеристики: марка вугілля; найменування продукції (клас); вміст летких на сухий беззольний стан (горючу масу) V_{daf} ; зольність на сухий стан A^d ; загальна сірка на сухий стан S_t^d ; вища теплота згоряння на сухий беззольний стан Q_s^{daf} ; загальна волога на робочий стан W_t^r ; піритна сірка на сухий стан S_p^d ; сульфатна сірка на сухий стан S_s^d ; нижча теплота згоряння на робочий стан Q_i^r ; органічний вуглець на сухий беззольний стан C^{daf} ; органічний водень на сухий беззольний стан H^{daf} ; органічна сірка на сухий беззольний стан S_o^{daf} ; азот та кисень на сухий беззольний стан $(N+O)^{daf}$ тощо. Тобто за даними сертифікатів було проведено розрахунки за стандартною методикою за формулами (1)–(5).

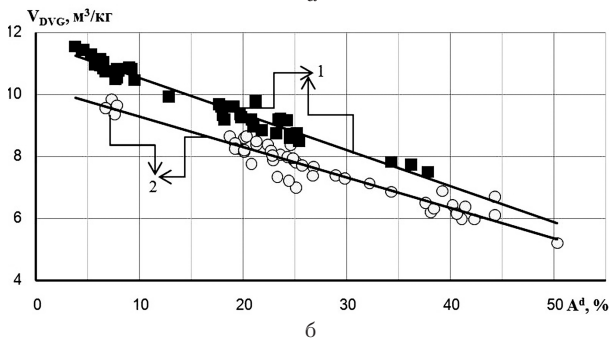
На рисунку наведено результати розрахунків питомих викидів сухих димових газів за нормальних умов та стандартного вмісту кисню для зразків високо- та низькореакційного вугілля за умови повного вигорання палива ($q_4 = 0$) та відсутності установки сіркоочищення.

Встановлено, що залежність питомого об'єму сухих димових газів V_{DFG} (m_H^3/kg) від теплоти згоряння палива Q_i^r (МДж/кг) має лінійний характер (рисунок, а): $V_{DVG} = K Q_i^r$, де K — коефіцієнт, що залежить від ступеня метаморфізму вугілля.

Отримано значення K для кам'яного вугілля та окремо для високо- та низькореакційного вугілля (табл.1). Отримані нами значення добре узгоджуються з літературними джерелами [9–11]. Саме значення $K = 0,358$ для високореакційного вугілля використо-



а



б

Залежність розрахованого питомого об'єму сухих димових газів, утворених при спалюванні вугілля, від теплоти згоряння палива (а) та від його зольності (б): 1 – низькорекційне вугілля (А, П); 2 – високореакційне (Г, ДГ, Д).

ується в Національному плані скорочення викидів у Правилах розрахунку граничних валових викидів [11].

Різниця в значеннях К для високо- та низькорекційного вугілля пояснюється високим вмістом водню H^r та кисню O^r у високореакційному вугіллі. Тому для високореакційного палива характерні більш низькі значення питомих об'ємів сухих димових газів (див. рисунок, а).

Цікавою для практичного застосування є отримана залежність питомого виходу сухих димових газів V_{DFG} (m^3/kg) від зольності вугілля на сухий стан A^d (%): $V_{DFG} = a + b A^d$. При цьому значення коефіцієнтів апроксимації а та б також будуть різними для низько- та високореакційного вугілля (табл.2). Очевидно зменшення об'єму сухих димових газів при зростанні зольності: зменшується частка органічної складової вугілля (рисунок, б).

Для розрахунків питомих об'ємів сухих димових газів пропонується використовувати емпіричну залежність розрахунку через теплоту згоряння палива $V_{DVG} = K Q_i^r$. Емпірична залежність розрахунку через зольність палива

$V_{DFG} = a + b A^d$ рекомендується для використання як оціночна.

Також були отримані емпіричні залежності концентрації діоксиду сірки в димових газах c_{SO_2} (mg/m^3) від вмісту сірки та золи в паливі для високореакційного (Г, ДГ, Д) та низькорекційного (А, П) вугілля. Вони добре описуються залежністю типу $c_{SO_2} = S^d (a A^d + b)$, де а, b – коефіцієнти апроксимації [12].

У табл.3 наведено ці залежності для вказаних двох груп вугілля та типу шлаковидалення котла за даними технічного аналізу та за умови повного вигорання палива ($q_4 = 0$). Залежності наведені для випадку відсутності установок сіркоочистки. Для практичної перевірки запропонованого урахування втрат теплоти через механічний недопал палива q_4 було проведено розрахунки за формулами (4), (5) та (6), (7) для усіх 96 видів вугільної продукції. Розрахунки показують, що ці формули дають близькі значення з відносною похибкою менше 0,6 % при значеннях q_4 до 10,0 %.

Наявність втрат теплоти через механічний недопал палива q_4 призводить до зменшення питомого об'єму сухих димових газів і, відповідно, до збільшення очікуваної концентрації діоксиду сірки в сухих димових газах в $1/(1 - q_4/100)$ раз у порівнянні з випадком повного вигорання палива. Для урахування наявності механічного недопалу ($q_4 > 0$) пропонується використовувати залежності $V_{DVG}(q_4) = V_{DVG}(1 - q_4/100)$ та $c_{SO_2}(q_4) = c_{SO_2}/(1 - q_4/100)$.

Таблиця 1. Емпіричні залежності питомого об'єму сухих димових газів від теплоти згоряння палива $V_{DVG} = K Q_i^r$ (Q_i^r , МДж/кг) для різних типів вугілля

Тип вугілля	Коефіцієнт К		
	наші результати	[9, 11]	[10]
Кам'яне, в тому числі:	0,363*	–	0,365
низькорекційне (А, П)	0,368**	–	–
високореакційне (Г, ДГ, Д)	0,357***	0,358	–

* $V_{DVG} = 0,363 Q_i^r \pm 0,23$, відносна похибка $\delta < 2,2$ %;

** $V_{DVG} = 0,368 Q_i^r \pm 0,16$, $\delta < 1,3$ %;

*** $V_{DVG} = 0,357 Q_i^r \pm 0,20$, $\delta < 1,8$ %.

Таблиця 2. Емпіричні залежності питомого об'єму сухих димових газів від зольності різних типів вугілля

Тип вугілля	Залежність
Низькорекційне (А, П)	$V_{DFG} = 11,70 - 0,12 A^d [\pm 0,22]$, $\delta < 1,9$ %
Високореакційне (Г, ДГ, Д)	$V_{DFG} = 10,20 - 0,10 A^d [\pm 0,31]$, $\delta < 3,1$ %

Таблиця 3. Емпіричні залежності концентрації діоксиду сірки в сухих димових газах c_{SO_2} ($мг/м_н^3$)

Тип шлаковидалення	Низькорекційне вугілля	Високорекційне вугілля
Тверде	$c_{SO_2} = S^d (1400 + 24 A^d) \pm 40, \delta < 1,9 \%$	$c_{SO_2} = S^d (1350 + 31 A^d) \pm 60, \delta < 2,6 \%$
Рідке	$c_{SO_2} = S^d (1500 + 25 A^d) \pm 40, \delta < 1,7 \%$	$c_{SO_2} = S^d (1450 + 32 A^d) \pm 70, \delta < 2,7 \%$

У разі наявності установки сіркоочищення для концентрації діоксиду сірки в сухих димових газах пропонується використовувати залежність $c_{SO_2}(q_4) = c_{SO_2}(1 - h_{II} b) / (1 - q_4 / 100)$.

Розроблений інженерний метод розрахунку питомих викидів сухих димових газів на вугільних ТЕС та очікуваної концентрації у них діоксиду сірки пропонується використовувати в діапазоні зольності палива A^d від 4,0 до 50,0 % та теплоти згоряння палива Q_{I^r} від 14,5 до 32,0 МДж/кг.

За розробленим методом були проведені розрахунки питомих та валових викидів сухих димових газів на ТЕС України та концентрації у них діоксиду сірки у 2012–2015 рр. Для розрахунків використовувалася інформація з якості, витрати вугілля, що постачалося на ТЕС, та q_4 з офіційних звітів ТЕС – ЗТЕХ.

У табл.4 наведено результати розрахунків для вугільних ТЕС та 5 генеруючих компаній України на 2012 р. Отримані при розрахунках значення валових викидів сухих димових газів та діоксиду сірки в сухих димових газах добре співпадають з даними, представленими ТЕС та генеруючими компаніями України за 2012 р. [11].

У табл.5 наведено узагальнені результати розрахунків валових викидів сухих димових газів та концентрацій у них діоксиду сірки на ТЕС, що спалюють низькорекційне вугілля (А, П), та на ТЕС, що спалюють високорекційне вугілля (Г, ДГ), у 2012–2015 рр.

В останні роки об'єм валових викидів оксидів сірки на вугільних ТЕС України досягає 1000–1200 тис. т. Його зменшення у 2015 р. до 800 тис. т пов'язано зі зменшенням виробництва на них електроенергії більше ніж на 30,0 %.

Таблиця 4. Якість та витрати вугілля, результати розрахунків питомих та валових викидів сухих димових газів та діоксиду сірки на вугільних ТЕС України у 2012 р.

Генеруюча компанія, ТЕС	Паливо	Якість палива			Витрата палива, млн т	Тип шлаковидалення	$q_4, \%$	Розрахунок за запропонованим методом	Дані ТЕС					
		$Q^r, \text{МДж/кг}$	$A^d, \%$	$S^d, \%$					$V_{DVG}, \text{мн}^3/\text{кг}$	$c_{SO_2}, \text{мг/мн}^3$	$V_{DVG}, \text{млрд м}^3$	$SO_2, \text{тис.}^2\text{т}$	$V_{DVG}, \text{млрд м}^3$	$SO_2, \text{тис.}^2\text{т}$
ПАТ «Донбасенерго»		<u>1.47</u>	<u>4.38</u>					<u>33,3</u>	<u>107,6</u>	<u>32,7</u>	<u>92,7</u>			
Старобешівська	А, П	22,04	24,1	1,45	3,03	РШВ	4,12	7,55	3172,5	22,9	72,7	22,3	57,4	
Слов'янська	А	22,16	23,5	1,53	1,34	РШВ	4,70	7,77	3348,4	10,4	34,9	10,4*	35,2	
ПАТ «Центренерго»		<u>2.21</u>	<u>8.30</u>					<u>66,0</u>	<u>325,5</u>	<u>70,9</u>	311,1			
Вуглегірська	Г, ДГ	22,57	22,9	3,22	2,60	РШВ	0,17	8,29	7195,7	21,5	154,8	21,4	143,2	
Трипільська	А, П	22,82	23,9	1,53	2,56	РШВ	0,36	8,63	3418,7	19,6	66,9	18,2	68,2	
Зміївська	А, П	23,03	23,6	1,92	3,14	РШВ	3,50	7,93	4170,8	24,9	103,8	31,4	99,7	
ПАТ «ДТЕК Дніпроенерго»		<u>1.83</u>	<u>7.90</u>					<u>62,6</u>	<u>258,0</u>	<u>62,0</u>	306			
Криворізька	П	24,35	23,2	2,14	3,75	РШВ	3,85	8,36	4634,4	31,3	145,2	27,7	175,5	
Придніпровська	А, П	22,56	25,1	1,29	1,99	РШВ	9,00	7,33	3011,8	14,5	43,8	16,5	54,6	
Запорізька	Г, ДГ	21,08	25,2	1,78	2,17	РШВ	0,38	7,73	4122,6	16,7	69,0	17,9	76,1	
ПАТ «ДТЕК Західенерго»		<u>1.88</u>	<u>8.09</u>					<u>62,8</u>	<u>264,6</u>	<u>55,2</u>	232,6			
Бурштинська	Г, ДГ	21,33	22,6	1,97	4,70	РШВ	1,22	7,75	4426,6	36,4	161,3	33,3	138,7	
Добротвірська	Г, ДГ	22,44	24,1	2,09	1,14	ТШВ	1,09	8,17	4539,2	9,3	42,2	7,4	35,5	
Ладжинська	Г, ДГ	20,73	23,0	1,59	2,25	РШВ	0,43	7,60	3571,9	17,1	61,1	14,4	58,4	
ТОВ «ДТЕК Східенерго»		<u>1.68</u>	<u>8.80</u>					<u>63,3</u>	<u>251,2</u>	<u>66,1</u>	243,4			
Зуївська	Г, ДГ	19,22	30,1	1,93	2,63	РШВ	0,30	7,05	4756,6	18,5	88,2	19,6	85,4	
Курахівська	Г, ДГ	17,67	36,9	1,67	3,42	ТШВ	2,04	6,37	4323,6	21,8	94,3	22,3	91,5	
Луганська	А, П	24,43	18,7	1,46	2,75	РШВ	4,11	8,36	2991,5	23,0	68,7	23,9	66,4	
Всього (середнє значення)			<u>1.85</u>	<u>37.46</u>					<u>288,1</u>	<u>1207</u>	<u>287,0</u>	1186		

Примітка. РШВ – рідке шлаковидалення, ТШВ – тверде шлаковидалення. * Дані відсутні, у таблиці представлено розрахункове значення.

Таблиця 5. Дані з встановленої потужності, відпуску електроенергії, якості та витрати вугілля та результати розрахунків валових викидів сухих димових газів та діоксиду сірки на вугільних ТЕС України у 2012–2015 рр.

Паливо	Встановлена потужність, млн кВт (%)	Відпуск електроенергії, млрд кВт·год (%)	Якість палива			Витрата вугілля, млн т (%)	V _{DVG} , млрд м ³	c _{SO₂} , тис. т (%)	SO ₂ , г/кВт·год
			Q _Г , МДж/кг	A _d , %	S _d , %				
2012 рік									
Всього, з них:	21,73	71,7			1,85*	37,46	288,1	1207,0	16,8
А, П	12,06 (55,5)	36,7 (51,2)	23,2	23,1	1,7	18,56 (49,5)	146,6	536,0 (44,4)	14,6
Г, ДГ	9,67 (44,5)	35,0 (48,8)	20,5	26,1	2,0	18,90 (50,5)	141,5	671,0 (55,6)	19,2
2013 рік									
Всього, з них:	21,94	71,1			1,93*	36,85	286,1	1244,6	17,5
А, П	12,21 (55,6)	34,7 (48,9)	23,3	22,7	1,83	17,78 (48,3)	140,3	562,1 (45,2)	16,2
Г, ДГ	9,73 (44,4)	36,4 (51,1)	20,9	24,6	2,04	19,07 (51,8)	145,8	682,5 (54,8)	18,8
2014 рік									
Всього, з них:	22,3	62,0			1,82*	32,52	251,0	1038,0	16,7
А, П	12,44 (55,8)	28,5 (46,0)	23,4	22,2	1,68	14,52 (44,7)	114,8	423,5 (40,8)	14,8
Г, ДГ	9,86 (44,2)	33,5 (54,0)	20,8	27,4	1,93	18,0 (55,3)	136,2	614,5 (59,2)	18,4
2015 рік									
Всього, з них:	22,4	49,0			1,73*	26,70	202,1	818,2	16,7
А, П	12,50 (55,8)	15,6 (31,7)	23,0	24,2	1,72	8,36 (31,3)	66,5	249,7 (30,5)	16,0
Г, ДГ	9,90 (44,2)	33,4 (68,3)	20,2	28,7	1,74	18,35 (68,7)	136,6	568,5 (69,5)	17,0

* Середнє значення.

Значення питомих викидів сірки на вугільних ТЕС України в останні роки знаходяться на рівні 16–18 г/кВт·год відпущеної електроенергії, проти 1,2 г/кВт·год відпущеної електроенергії – нинішнього середнього європейського рівня (за даними Оновленої Енергетичної стратегії України на період до 2030 року). Це пояснюється використанням на ТЕС України вугілля з середнім та високим вмістом сірки (див. табл.4, 5) та збільшенням частки вугілля в паливному балансі ТЕС.

Крім того, експлуатація пиловугільних енергоблоків ТЕС відбувається на основі застарілих технологічних схем, які розроблялися у 1960-х рр. Станом на 1 січня 2015 р. з 85 вугільних енергоблоків ТЕС України 63 енергоблоки загальною встановленою потужністю 16,3 млн кВт (72,7 %) відпрацювали більше 250 тис. год. Середній ККД цих енергоблоків становить близько 31,0 % (для порівняння, при роботі у базовому режимі у розвинутих країнах – 45 %). При цьому спостерігаються високі питомі витрати умовного палива, у 2015 р. вони були 400,1 г у. п. на 1 кВт електроенергії. Енергоблоки оснащені лише пиловловлювачами, на жодній ТЕС не споруджені установки очищення димових газів від діоксиду сірки (та оксидів азоту). Крім того, українські вугільні ТЕС переважно оснащені котлами з рідким

шлаковидаленням (див. табл.4), ефективність внутрішньопаливненого зв'язування сірки в яких становить 5,0 %.

Треба зазначити, що виконання Директиви 2001/80/ЕС передбачає зменшення викидів оксидів сірки на вугільних ТЕС України до 56 тис. т у 2018 р.

Висновки

Створено інженерний метод визначення питомих викидів сухих димових газів на вугільних ТЕС та очікуваної концентрації діоксиду сірки в димових газах за нормальних умов на основі даних технічного аналізу при наявності механічного недопалу палива q₄. Розроблений метод дає змогу зробити оцінку очікуваного викиду діоксиду сірки на основі даних технічного аналізу та обрати необхідну технологію десульфуризації для дотримання вимог екологічного законодавства.

Отримано лінійні емпіричні залежності питомого виходу сухих димових газів від теплоти згоряння палива для низькорекційного вугілля та для високореакційного вугілля.

За розробленим методом були проведені розрахунки питомих та валових викидів сухих димових газів на ТЕС України та концентрації в них діоксиду сірки у 2012–2015 рр. Значення питомих викидів сірки в останні роки знахо-

дяться на рівні 16–18 г/кВт-год відпущеної електроенергії.

Список літератури

1. Наказ Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 22.10.2008 р. № 541 «Про затвердження Технологічних нормативів допустимих викидів забруднюючих речовин із теплосилових установок, номінальна теплова потужність яких перевищує 50 МВт». — Режим доступу: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/z1110-08> (дата звернення 2.12.2015). — Назва з екрана.
2. Directive 2001/80/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from large combustion plants // Official Journal of the European Communities, L 309/1, 27.11.2001.
3. Вольчин І. А., Дунаєвська Н.І., Гапонич Л.С. та ін. Перспективи впровадження чистих вугільних технологій в енергетику країни. — Київ : ГНОЗІС, 2013. — 310 с.
4. ЗЕЛЕНА КНИГА. Зменшення шкідливих викидів у тепловій енергетиці України через виконання вимог Європейського енергетичного співтовариства. — Київ, 2011. — 43 с. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: http://ua-energy.org/upload/files/Green%20book_TES_ICPS.pdf (дата звернення 12.01.2016). — Назва з екрана.
5. Strukova E., Golub A., Markandya A. Air Pollution Costs in Ukraine. — The access mode: <http://ideas.repec.org/p/fem/femwpa/2006>. 120. html (дата звернення 1.02.2016). — Назва з екрана.
6. ГКД 34.02.305–2002. Викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря від енергетичних установок. Методика визначення. — Київ : ОЕП «ГРІФРЕ», 2002. — 42 с. — Режим доступу: www.sop.org.ua (дата звернення 01.11.2015).
7. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод). — СПб. : Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. — 256 с.
8. Липов Ю. М., Третьяков Ю. М. Котельные установки и парогенераторы. — М.; Ижевск : НИЦ Регулярная и хаотическая динамика, 2003. — 592 с.
9. Graham D.P., Salway G. & Stack R.P. Stack Gas Flow Rate. Calculation for Emissions Reporting — A Guide to Current Best Practice for the Operators of Coal Fired Boilers. — PT/07/LC422/R, 2007. — Access mode: http://www.vgb.org/vgbmultimedia/gr338_flue_gas.pdf (дата звернення 10.09.2015).
10. РД 34.02.305-98. Методика определения валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от котельных установок ТЭС. — М. : ВТИ им. Ф.Э.Дзержинского, 1998.
11. Національний план скорочення викидів від великих спалювальних установок. Проект. — Режим доступу: <http://mpe.kmu.gov.ua> (дата звернення 03.03.2016).
12. Volchyn I., Haponych L. Estimate of the sulfur dioxide concentration at thermal power plants fired by donetsk coal // Power Technology and Engineering. — 2014. — Vol. 48, № 3. — P. 218–221.

Надійшла до редакції 28.04.16

Вольчин І.А., докт. техн. наук, **Гапонич Л.С.,** канд. техн. наук
Інститут угільних енерготехнологій НАН України, Київ
 ул. Андреевская, 19, 04070 Киев, Украина, e-mail: volchyn@gmail.com, haponych@ukr.net

Расчет параметров дымовых газов угольных тепловых электростанций на основе характеристик твердого топлива

Разработан инженерный метод определения удельных выбросов сухих дымовых газов на угольных ТЭС Украины и ожидаемой концентрации диоксида серы в них на основе данных технического анализа при наличии механического недожога топлива q_4 . Разработанный метод предлагается использовать для высокорекреационных (марки Г, ДГ, Д) и низкорекреационных (марки А, Т) углей в диапазоне зольности A^d от 4,0 до 50,0 % и теплоты сгорания топлива Q_{i^r} от 14,5 до 32,0 МДж/кг для котлов с жидким и твердым шлакоудалением. Проведены расчеты удельных и валовых выбросов сухих дымовых газов на угольных ТЭС Украины и концентрации в них диоксида серы в 2012–2015 гг. Значение удельных выбросов серы в дымовых газах в последние годы находится на уровне 16–18 г/кВт·ч отпущенной электроэнергии. Предлагаемый метод позволяет сделать оценку ожидаемого выброса диоксида серы в дымовых газах и выбрать необходимую технологию десульфуризации для соблюдения требований экологического законодательства. *Библ. 12, рис. 1, табл. 5.*

Ключові слова: енергетика, екологія, теплоелектростанція, димові гази, забруднюючі речовини, діоксид сери.

Volchyn I.A., Doctor of Technical Sciences,
Haponych L.S., Candidate of Technical Sciences

Coal Energy Technology Institute of National Academy of Sciences, Kiev
 9, Andriyivska Str., 04070 Kiev, Ukraine, e-mail: volchyn@gmail.com, haponych@ukr.net

Calculation of the Parameters of Exhaust Gases Coal-fired Thermal Power Plants Based on Solid Fuel Characteristics

We have developed an engineering method of determining the specific emission of dry exhaust gases at the Ukrainian coal-fired thermal power plants (TPP) and the expected concentration of sulfur dioxide in them based on the data of the technical analysis in the presence of unburnt-carbon factor q_4 . We propose to use the developed method for high-reactive [G, DG, D] and low-reactive [A, SA (P)] coals in the range of the fuel ash content A^d from 4.0 to 50.0 % and low heat value Q_i^r from 14.5 to 32.0 MJ/kg for boilers with wet and dry slag removal. Calculations of the gross and specific emissions of dry exhaust gas and the concentration of sulphur dioxide in them at the Ukrainian coal-fired TPPs since 2012 to 2015 were carried out. The values of specific SO_2 emissions in exhaust gases during the recent years are at the level of 16–18 g/kWh of electricity supplied. The developed method allows to make an estimate of the expected sulphur dioxide emission in exhaust gases and to choose necessary desulphurization technology to meet the environment legislation requirements. *Bibl. 12, Fig. 1, Table 5.*

Key words: power industry, environment, thermal power plant, exhaust gas, emission, sulphur dioxide.

References

1. Nakaz Ministerstva okhorony navkolyshn'oho pryrodnoho seredovyshcha Ukrayiny vid 22.10.2008 r. # 541 «Pro zatverdzhennya Tekhnolohichnykh normatyviv dopustymykh vykydiv zabrudnyuyuchykh rehovyn iz teplosylovykh ustanovok, nominal'na teplova potuzhnist' yakykh perevyschuye 50 MVt» [The Order of the Ministry of the Environment of Ukraine No. 541 dated October, 22, 2008 «On approval of the technological norms of the permissible contaminants' emissions from TPPs, rated capacity of which exceeds 50 MW». — Access mode: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/z1110-08> (the accessed date 2.12.2015) — the screen name] (Ukr.).
2. The Directive 2001/80/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from large combustion plants, *Official Journal of the European Communities*, L 309/1, 27.11.2001.
3. Volchyn I., Dunayevska N., Haponych L., Chernytskyi M., Topal O., Zasyadko Ya. [Prospects for the implementation of clean coal technologies in the energy sector of Ukraine], Kiev : GNOZIS, 2013, 310 p. (Ukr.).
4. [GREEN BOOK. The emissions' reduction in thermal power of Ukraine by meeting the requirements of the European Energy Community], Kiev, 2011, 43 pp. — [Electronic resource]. — Access mode: [http://ua-energy.org/upload/files/Green%20](http://ua-energy.org/upload/files/Green%20book_TES_ICPS.pdf)
5. Strukova E., Golub A., Markandya A. Air Pollution Costs in Ukraine. — Access mode: <http://ideas.repec.org/p/fem/femwpa/2006.120.html> (the accessed date 1.02.2016) — the screen name.
6. HKD 34.02.305–2002. [«Emissions of air pollutants from power plants. The method of determination»], Kiev : OEP «GRIFRE», 2002, 42 p. — The access mode: (the accessed date 1.11.2015) — the screen name] (Ukr.).
7. [Thermal design of boiler units (The normative method), the 3-d edition, SPb. : Publishing House «NPO Central'nyj kotloturbinnyj institut», 1998, 256 p.] (Rus.).
8. Lipov Yu. M., Tretyakov Yu. M. [Boiler units and steam generators], Moscow; Izhevsk : NIC Regular and Chaotic dynamics, 2003, 592 p.] (Rus.).
9. Graham D.P. Stack Gas Flow Rate. Calculation for Emissions Reporting – A Guide to Current Best Practice for the Operators of Coal Fired Boilers / D. P. Graham, G. Salway & R. P. Stack – PT/07/LC422/R, 2007. — The access mode: (the accessed date 10.09.2015) — the screen name.
10. [The procedure of the gross contaminants' emissions from TPPs' boiler units. RD 34.02.305-98], Moscow : All-Russia Thermal Engineering Institute, 1998. (Rus.).
11. [The National plan to reduce emissions from large-scale combustion plants]. — The access mode: <http://mpe.kmu.gov.ua> (the accessed date 3.03.2016) — the screen name. (Ukr.).

12. Volchyn I., Haponych L. Estimate of the sulfur dioxide concentration at thermal power plants fired

by Donetsk coal, *Power Technology and Engineering*, 2014, 48(3), pp. 218–221.

Received April 28, 2016

УДК 628.162:628.3:621.359.7

Гомеля Н.Д.¹, докт. техн. наук, проф., **Грабитченко В.Н.¹**,
Трохименко Г.Г.², канд. биол. наук

¹ **Национальный технический университет Украины «КПИ»**, Киев
пр. Победы, 37, корп. 4, 03056 Киев, Украина, e-mail: shytnasya@mail.ru

² **Национальный университет кораблестроения, Николаев**
пр. Героев Сталинграда, 9, 54025, Николаев, Украина, e-mail: antr@ukr.net

Ионообменная очистка воды от нитратов в присутствии хлоридов и сульфатов

Изучены процессы ионообменной очистки воды от нитратов, хлоридов и сульфатов. Установлены зависимости по сорбции нитратов, сульфатов и хлоридов от формы иона, соотношения и уровня концентраций анионов в растворе. Показано, что при использовании анионита АВ-17-8 в основной, карбонатной или основно-карбонатной форме наряду с выделением из воды анионов происходит ее умягчение. При использовании ионита в основной форме умягчение происходит за счет преимущественного выделения магния, а в карбонатной форме за счет осаждения кальция. Установлено, что при разных соотношениях концентрации анионов при ионообменной очистке наблюдается пропуск нитратов. Концентрации нитратов в фильтрате возрастают с увеличением содержания сульфатов и хлоридов, а также по мере насыщения анионита нитратами и сульфатами. *Библ. 17, рис. 7, табл. 1.*

Ключевые слова: ионный обмен, нитраты, регенерация, умягчение воды, утилизация концентратов.

Постановка проблемы

Очистка природных и сточных вод от нитратов является весьма актуальной и сложной проблемой. Высокие концентрации нитратов в подземных и грунтовых водах существенно усложняют задачу обеспечения сельского населения, населения малых и средних населенных пунктов питьевой водой. Сброс нитратов со сточными водами приводит к усилению эвтрофикации поверхностных водоемов, сопровождающейся значительным вторичным загрязнением воды, что приводит к деградации водных экосистем.

Повышение концентрации нитратов в природных водоемах происходит за счет сброса сточных вод [1] и за счет природных факторов [2]. Наиболее изученными являются биологические методы очистки воды от соединений азота. Однако эти методы редко используются в водоподготовке, так как сопровождаются бактериальным загрязнением воды, протекают доволь-

но медленно и являются недостаточно эффективными [3]. Недостаточно эффективными являются также сорбционные методы [4] и электрохимические процессы [5–7]. Малоэффективны при выделении нитратов из воды нанофильтрация [8] и обратный осмос [9], где степень очистки не превышает соответственно 50 и 80 %. Наличие в воде хлоридов и сульфатов снижает эффективность баромембранных методов очистки воды от нитратов [10]. Кроме того, в этих процессах не решена проблема утилизации образующихся концентратов. Очистка воды от нитратов каталитическим восстановлением является дорогим методом и сопровождается вторичным загрязнением воды продуктами окисления [11].

Наиболее простым и эффективным методом очистки воды от нитратов является ионный обмен [12]. Этот метод позволяет не только эффективно очищать воду от нитратов при использовании анионитов, но и использовать выделенные нитраты при производстве жидких удобрений [13].