

Охрана окружающей среды

УДК 628.5:519.6

Вольчин І.А., докт. техн. наук, **Коломієць О.М.,** канд. техн. наук,
Ясинецький А.О.

Інститут вугільних енерготехнологій НАН України, Київ
вул. Андріївська, 19, 04070 Київ, Україна; e-mail: ceti@i.kiev.ua

Числове дослідження процесу сіркоочищення за напівсухим амонійним методом

Наведено результати числового дослідження тепломасообмінних процесів у хімічному реакторі, який працює за технологією напівсухого амонійного сіркоочищення зі спільною й роздільною подачею води для зрошення газу та водного розчину амоніаку. Виявлено вплив способу подачі рідини у робочу зону, витрати води та додаткового повітря на ефективність процесу десульфуризації та температури газу на виході реактора крапельного типу. Встановлено, що через десорбцію значна кількість амоніаку переходить з розчину у газове середовище. Таким чином, хімічне зв'язування сірчистого ангідриду у реакторі відбувається в результаті гомогенних реакцій не тільки у рідині, але й у газі. Це призводить до зменшення утворення сульфіту й сульфату амонію у краплях рідини та до збільшення утворення аддуктів у газовому об'ємі робочої зони хімічного реактора. Визначено, що напівсухий амонійний метод дозволяє хімічно зв'язувати понад 97 % сірчистого ангідриду, що знаходиться у відхідних димових газах котельного агрегату. *Бібл. 14, рис. 6, табл. 1.*

Ключевые слова: діоксид сірки, амоніак, напівсухе амонійне сіркоочищення, аддукт.

За останні роки впровадження установок очищення димових газів на теплоелектростанціях набуло великого значення. Одним з головних напрямів газоочищення на ТЕС є видалення SO_2 , який є продуктом високотемпературного окислення сірки при спалюванні палива [1]. Директива 2010/75/EU про промислові викиди [2] вимагає дотримання граничного значення викиду діоксиду сірки, який для великих існуючих пилувугільних котлів становить 200 мг/м^3 . В угоді про Асоціацію з ЄС Україна зобов'язалася поступово впроваджувати вимоги Директиви 2010/75/EU у національне екологічне законодавство [3], зокрема, починаючи з 01.01.2018 р. для ТЕС.

У світі розроблено багато методів та технологій десульфуризації відхідних газів з ефективністю не менше 96 %, що дозволяють виконувати вимоги Директиви 2010/75/EU [4]. У найбільш поширеній технології мокрої вапнякової десульфуризації з примусовим окисленням проміжних продуктів хімічних реакцій основними чинниками впливу на ефективність технологічної установки, в якій використовується водна суспензія твердого реагенту, є процеси абсорбції забруднюючої речовини та розчинення твердого реагента [5]. Для усунення впливу другого чинника можна використовувати як сорбент водний розчин амоніаку NH_3 [6, 7]. Крім

того, застосування напівсухого методу сіркоочищення, коли на виході отримується сухий субпродукт, дозволить усунути проблему обробки стічних вод та суттєво зменшити капітальні та експлуатаційні витрати [4, 7, 8].

У даній роботі розглядається процес десульфуризації димових газів у хімічному реакторі крапельного типу, який працює за напівсухим амонійним методом зв'язування діоксиду сірки. Як реагент використовується амоніак у вигляді водного розчину, відомого як амонійна вода. Кінцевим субпродуктом хімічного процесу є сухий сульфат амонію $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, більш відомий як азотне мінеральне добриво.

Для зниження температури та підвищення вологості димових газів у робочу зону реактора додатково вводиться зрошувальна вода. Зниження температури сприяє збільшенню розчинності діоксиду сірки. При збільшенні вологості газу зменшується швидкість випаровування води з крапель, таким чином, збільшується час їх існування у реакторі. Для запобігання хімічної корозії стінок газового тракту кількість води визначається у відповідності з технологічною умовою, а саме: температура газу на виході з хімічного реактора має бути вище на 10–15 °С за температуру точки водяної роси [9]. За додатковими умовами вологість субпродукту не має перевищувати 5 %, концентрація амоніаку у відхідному газі не має перевищувати гранично допустиму концентрацію 20 мг/нм³.

Дослідження процесів проведено для хімічного реактора промислового масштабу, робоча зона якого циліндричної форми з висотою 38,7 м та внутрішнім діаметром 7,01 м. Димові газу подаються у реактор знизу та відводяться зверху. Форсунки, через які впорскуються зрошувальна вода та розчин амоніаку, розташовані у нижній частині робочої зони хімічного реактора. Рідина (водний розчин амоніаку та зрошувальна вода) у хімічний реактор може подаватися одним або декількома потоками, рівні вводу яких рознесені по ходу газів у робочій зоні реактора. Для інтенсифікації процесу окислення при утворенні сульфату амонію потрібно підвищити вміст кисню у газі, тому до димових газів додається атмосферне повітря і на вході реактора створюється відповідна газова суміш.

Процес поглинання діоксиду сірки за напівсухою технологією з використанням амоніаку як реагента відбувається у краплях розчину сорбента, у газовому середовищі з утворенням амонійних аерозолів та у шарі продуктів десульфуризації, які накопичуються на стінках каналів тканинного фільтра, що вико-

ристовується для уловлення субмікронних твердих частинок, в умовах підвищеної вологості димових газів [7]. Завдяки трьом механізмам хімічного зв'язування діоксиду сірки загальна ефективність десульфуризації може перевищувати 97 %.

У даній роботі основна увага приділяється процесу абсорбції діоксиду сірки краплями рідини, які вводяться у потік гарячих димових газів та поступово висихають. При проведенні числових досліджень прийнято такі значення вихідних параметрів. Витрата димових газів становить 74 нм³/с. Процес сіркоочищення має відбуватися після пилоочищення, наприклад, у електрофільтрі, тому вхідну температуру газу перед хімічним реактором обрано 150 °С. Об'ємний вміст діоксиду сірки у димових газах становить 849 млн⁻¹, кисню – 5,52 % (об.). Питома загальна витрата води з температурою 20 °С, яка складається з води на зрошення та води у розчині сорбенту, варіюється у діапазоні 39,5–53,5 г/нм³. Для зрошення використовується технічна вода з початковим рівнем водневого показника рН 5,8. Питома витрата амоніаку визначається у відповідності з заданим мольним співвідношенням $\text{NH}_3/\text{SO}_2 = 1,8$. Початкова концентрація розчину амоніаку змінюється від 25 % до значень на порядок менших. На вході у реактор з температурою 20 °С додається повітря у кількості до 10 % від об'ємної витрати димових газів.

У таблиці наведені значення початкових параметрів газової суміші на вході у робочу зону хімічного реактора при різних витратах доданого повітря.

Для проведення числових досліджень використовували комп'ютерну програму, складену за математичною моделлю [10]. Відповідність використаної математичної моделі реальному процесу визначена порівнянням розрахованих робочих параметрів хімічного реактора з експериментальними даними, які отримані при проведенні фізичних експериментів на науко-

Параметри газової суміші

Показник	Додаткове повітря, %		
	0	5	10
Витрата повітря, нм ³ /с	0	5,34	10,68
Витрата суміші, нм ³ /с	73,99	79,33	84,67
Температура, °С	150	141	134
Вміст вологи, %	8,06	7,63	7,25
Вміст кисню, %	5,52	6,54	7,43
Вміст діоксиду сірки, млн ⁻¹	849	792	742
Питома витрата амоніаку, г/нм ³	1,161	1,083	1,015

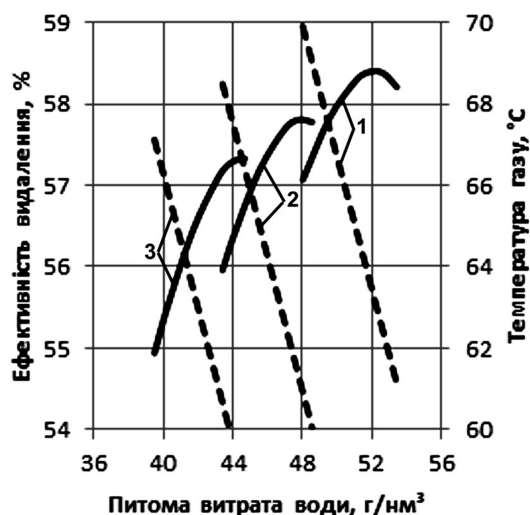


Рис.1. Ефективність видалення SO₂ (суцільна лінія) та температура газу (штрихова) при витраті повітря, %: 1 – 0; 2 – 5; 3 – 10.

во-дослідній установці, що реалізує напівсухий метод десульфуризації газу. За програмою було зроблено низку розрахунків, об'єднаних у серії за декількома параметрами.

У першій серії розрахунків визначався вплив витрати води та додаткового повітря на кінцеві параметри газу. Особлива увага приділялася ефективності видалення діоксиду сірки та температурі газу на виході з реактора. Вода для зрошення та 25 %-й розчин амоніаку подаються у реактор разом одним потоком у вигляді слабкого розчину реагенту (2,13–2,51 %) на вході у робочу зону реактора. У розрахунках змінювалися загальна витрата води та кількість повітря.

На рис.1 показано ефективність видалення діоксиду сірки й температуру газу на виході з хімічного реактора.

Розрахунки показали, що водневий показник розчину реагента на початку процесу становить близько 11,8, в основній частині процесу рН тримається на рівні приблизно 6,1. Таким чином, процес видалення SO₂ відбувається при слабкій кислотності розчину. У залежності від кількості води краплі розчину існують від 3,6 до 6,4 с. Без додаткового повітря ефективність видалення діоксиду сірки становить близько 58 %, температура газів на виході з реактора – 61–70 °C. При заданому співвідношенні NH₃/SO₂ ефективність «крапельної» абсорбції мала б бути не менше 90 %, але через десорбцію амоніаку з розчину у газове середовище вона значно нижче. При подачі розчину вміст амоніаку у газі відразу різко зростає, а далі, при абсорбції SO₂, дещо знижується й тримається на одному рівні.

Концентрація NH₃ у газі на всіх режимах становить приблизно 560–680 мг/м³, причому вона менша при більшій витраті води, коли концентрація амоніаку у розчині менше, що знижує десорбцію. Упродовж процесу ефективність видалення діоксиду сірки спочатку зростає, а потім знижується. Її максимум 52–62 % у залежності від кількості додаткового повітря знаходиться у точці процесу, коли вода з крапель випаровується на 81–83 %. Спад ефективності відбувається через те, що при випаровуванні води з краплі збільшується концентрація сірчистого ангідриду у розчині, але він не повністю хімічно зв'язується та випадає в осад у складі сульфїту й сульфату амонію. Зі зростанням концентрації у розчині речовини SO₂ й NH₃ переходять у газову фазу, тим самим збільшуючи свій вміст у газі.

На рис.1 видно, що збільшення витрати води призводить до підвищення ефективності видалення діоксиду сірки та зниження температури газу на виході з робочої зони хімічного реактора. Збільшення витрати повітря при фіксованій витраті води також позитивно впливає на ефективність, але рівень її максимуму поступово знижується. Підвищення вмісту кисню в газі сприяє утворенню (NH₄)₂SO₄.

Встановлено, що при збільшенні витрати повітря на 1 % утворення сульфату амонію зростає приблизно на 0,1 моль/л, кінцева температура газу знижується приблизно на 0,8 °C. У залежності від витрати води та повітря ефективність видалення діоксиду сірки коливається від 55 до 59 %, температура газу на виході з хімічного реактора знаходиться у діапазоні 60–70 °C. Максимальна ефективність досягається тоді, коли температура газу на виході з реактора перевищує водяну точку роси на 10–12 °C.

У другій серії розрахунків застосовується багатопоточна подача розчину. Вода для зрошення та 25 %-й розчин амоніаку вводяться у реактор разом декількома потоками у вигляді слабкого розчину реагенту з концентрацією 2,19 %. Загальну витрату води 51,9 г/м³ задано постійною. Розчин розподілено між потоками рівномірно. Додаткове повітря у реактор не подається.

На рис.2 показано ефективність видалення діоксиду сірки при різній кількості рівнів подачі розчину. Відстань між рівнями форсунок, через які впорскується розчин у газовий потік, задано 1 або 2 м.

Розрахунки показали, що подача розчину декількома потоками позитивно впливає на ефективність видалення діоксиду сірки, але їх

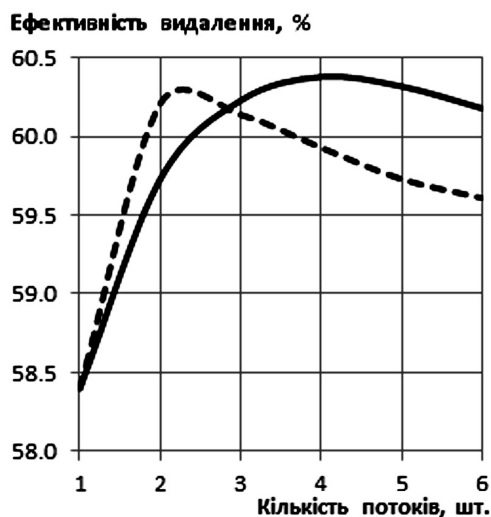


Рис. 2. Ефективність видалення діоксиду сірки при багатопоточній подачі розчину при відстані між рівнями форсунок 1 м (суцільна лінія), 2 м (штрихова лінія).

оптимальна кількість залежить від відстані між рівнями форсунок.

На рис. 2 видно, що при відстані 1 м краще застосовувати чотири потоки, а при відстані 2 м — два. У порівнянні з однопоточною подачею у першому випадку ефективність підвищується на 2 %, у другому — на 1,8 %. Багатопоточна система подачі, з одного боку, потребує попереднього приготування розчину, але з іншого — дозволяє спростити регулювання витрати розчину при зменшенні навантаження відключенням одного-двох рівнів форсунок.

Оскільки розчинність газів у воді зменшується при зростанні температури рідини, то у наступній серії розрахунків подачу рідини розділено на два потоки. Спочатку на вході у реактор подається зрошувальна вода для зниження температури газу, потім на відстані 1–5 м вводиться водний розчин амоніаку (система подачі рідини «вода — розчин»). Загальну витрату води задано постійною 51,9 г/нм³; частина її йде на зрошення, решта — у розчин. Додаткове повітря у реактор не подається.

На рис. 3 показано ефективність видалення діоксиду сірки при різній відстані між рівнями форсунок для впорскування води та розчину з різною концентрацією NH₃.

З двома потоками крапель рідини процеси у робочій зоні хімічного реактора відбуваються таким чином. На початку процесу водневий показник зрошувальної води дорівнює 5,8, водного розчину амонію — 12,3–11,8. Після впорскування крапель зрошувальної води у них абсорбується сірчистий ангідрид, водневий показник падає до значення 2,9, яке тримається через насичення діоксидом сірки на цьому рівні доки не

буде введено розчин амоніаку. Після вводу в реактор амонійної води частина амоніаку з неї переходить у газове середовище та абсорбується краплями зрошувальної води. З появою у ній амоніаку водневий показник дорівнює приблизно 6,1. Разом з цим у краплі розчину також абсорбується SO₂, водневий показник розчину реагенту знижується до 6,2. Надалі водневі показники в обох типах крапель поступово вирівнюються на позначці рН 6,1, що відповідає умовам слабкокислого середовища, коли основним сульфідним компонентом у розчині є аніон гідросульфїту HSO₃⁻ [11]. Розрахунки показали, що краплі води висихають за 1,5–4,3 с, краплі розчину — за 4,9–13,5 с. У залежності від кількості зрошувальної води та відстані до місця подачі розчину температура газу перед подачею розчину коливається від 80 до 140 °С. Температура газу на виході з реактора не перевищує 64 °С, що на 12 °С більше за температуру точки водяної роси.

На рис. 3 видно, що збільшення відстані призводить до зменшення кінцевої ефективності видалення через зростання втрат реагента. Перерозподіл амоніаку через десорбцію-абсорбцію відбувається слабо, його концентрація у краплях зрошувальної води менша, ніж у краплях розчину. Діапазон концентрацій амоніаку у газі на всіх режимах — 670–790 мг/нм³. При більшій відстані між точками впорскування рідини вміст NH₃ у газі зростає через те, що краплі зрошувальної води менше абсорбують амоніак, бо їх питома маса у газі зменшується з випаровуванням, тому знижується ефективність зв'язування діоксиду сірки у рідині. У процесі видалення SO₂ також є максимум ефективності при ступеню випаровування води з крапель на

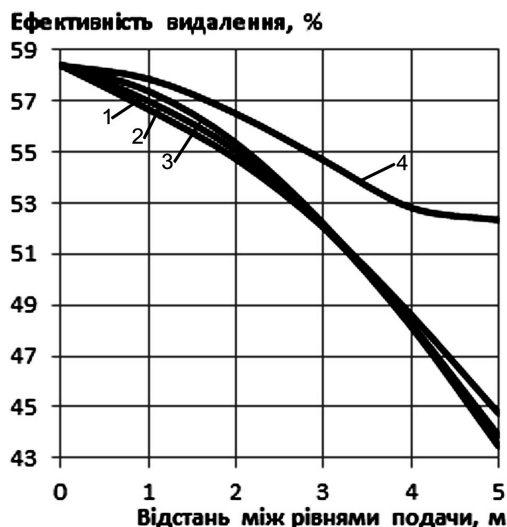


Рис. 3. Ефективність видалення SO₂ при концентрації NH₃ у розчині, %: 1 — 25; 2 — 12,5; 3 — 6,3; 4 — 3,1.

80–85 %, але його рівень знижується при збільшенні відстані між точками подачі рідини. Зі зменшенням концентрації амоніаку у розчині зменшується його вміст у газі, відповідно збільшується ефективність видалення діоксиду сірки. Розрахунки показали, що найвища ефективність досягається при концентрації розчину приблизно 3 %.

На відміну від попередньої у даній серії розрахунків змінено послідовність подачі рідини. Спочатку на вході у реактор впорскується водний розчин амоніаку з різними концентраціями, потім на відстані 1–7 м подається додаткова вода (система подачі рідини «розчин – вода»). Вода подається не стільки для зниження температури газу, скільки для уловлення газоподібного амоніаку. Ця стадія процесу може розглядатися як додатковий ступінь сіркоочищення. Загальну витрату води 51,9 г/м³ задано постійною; частина її йде на приготування розчину, решта – на зрошення. Додаткове повітря у реактор не подається.

На рис.4 показано ефективність видалення діоксиду сірки при різних відстанях між рівнями форсунок для впорскування розчину з різними концентраціями амоніаку та води.

Розрахунки показали, що процес видалення діоксиду сірки протилежний попередній серії. На початку процесу водневий показник розчину амоніаку становить 11,7–11,8, зрошувальної води – 5,8. Після впорскування крапель розчину у них абсорбується сірчистий ангідрид, водневий показник падає до 6,2. Одночасно амоніак з розчину переходить у газове середовище. Після впорскування додаткової води амоніак та діоксид сірки абсорбуються краплями води. З появою у них SO₂ та NH₃ водневий показник наближається до 6,1. Надалі водневі показники в обох типах крапель поступово вирівнюються на позначці 6,1. За розрахунками, краплі розчину висихають за 6,9–12,1 с, краплі води – за 2,2–4,3 с. У залежності від кількості води у розчині та відстані до місця подачі додаткової води температура газу перед подачею води коливається від 77 до 120 °С. Температура газу на виході з реактора не перевищує 64 °С, що на 12 °С більше за температуру точки водяної роси.

На рис.4 видно, що збільшення відстані призводить до зростання кінцевої ефективності видалення через зменшення втрат реагента. Перерозподіл амоніаку через десорбцію-абсорбцію відбувається слабо, його концентрація у краплях додаткової води менша, ніж у краплях розчину. Так, концентрація амоніаку у газі на всіх режимах перебуває у діапазоні 610–650 мг/м³. При більшій відстані між точками впорскуван-

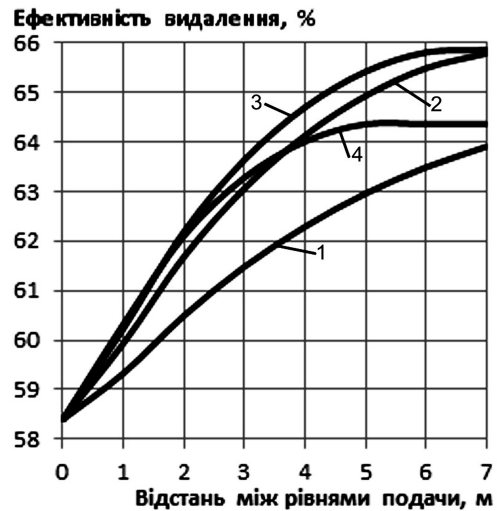


Рис.4. Ефективність видалення SO₂ при концентрації NH₃ у розчині, %: 1 – 2,4; 2 – 2,8; 3 – 3,1; 4 – 4,3.

ня рідини вміст NH₃ у газі зменшується через те, що краплі додаткової води більше абсорбують амоніак, тому зростає ефективність зв'язування діоксиду сірки у рідині.

У процесі видалення SO₂ також є максимум ефективності при ступеню випаровування води з крапель на 80–85 %, але його рівень знижується при збільшенні відстані між рівнями подачі рідини. Зі зменшенням концентрації амоніаку у розчині зменшується його вміст у газі та збільшується ефективність видалення діоксиду сірки. Розрахунки показали, що найвища ефективність досягається при концентрації розчину приблизно 3 %. При подальшому збільшенні концентрації ефективність стає меншою на відстані понад 3–4 м (див. рис.4, крива 4).

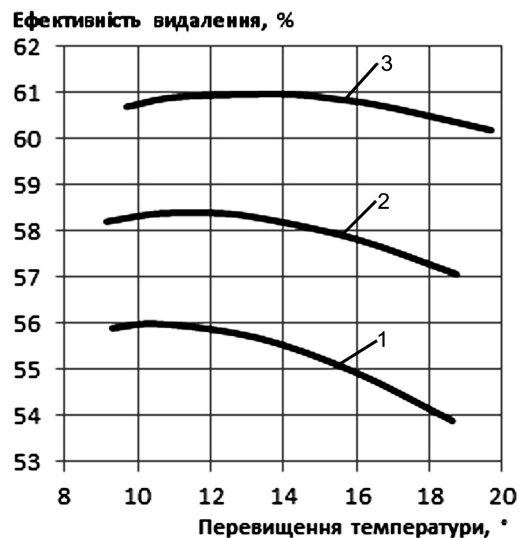


Рис.5. Ефективність видалення SO₂ при температурі газу на вході, °С: 1 – 130; 2 – 150; 3 – 180.

У наступній серії розрахунки спрямовано на виявлення впливу перевищення температури газу на виході хімічного реактора відносно температури точки водяної роси при різних початкових температурах газу. Весь розчин амоніаку подається у реактор одним потоком. Загальна витрата води коливається від 36,9 до 70,5 г/нм³. Додаткове повітря не подається. Розрахунки проведено при температурі газу на вході у реактор 130, 150 та 180 °С. У цьому діапазоні знаходиться температура димових газів, що надходять з котельного агрегату.

На рис.5 показано ефективність видалення діоксиду сірки у залежності від перевищення температури газу на виході реактора відносно температури точки водяної роси, а також від температури газу на вході реактора.

Розрахунки показали, що існує максимум ефективності видалення діоксиду сірки з газу. При різних початкових температурах газу максимум знаходиться у відповідній точці перевищення водяної точки роси Δt . Причому більший температурі газу відповідає більше значення Δt . Так, при температурі газу 130 °С максимуму відповідає $\Delta t = 10,5$ °С, при 150 °С – $\Delta t = 12$ °С, при 180 °С – $\Delta t = 14$ °С. Така різниця температур відповідає рекомендації про перевищення Δt на 10–15 °С для запобігання хімічної корозії стінок газового тракту. Таким чином, цей діапазон Δt важливий не тільки з точки зору збереження теплотехнічного обладнання, а ще й з точки зору ефективності видалення діоксиду сірки з димових газів.

Усі попередні розрахунки було проведено з метою визначення частки SO₂, що хімічно зв'язується у розчині амоніаку. Розрахунки показали, що близько 40 % амоніаку переходить у газове середовище через десорбцію. У роботах [12, 13] показано, що у присутності водяної пари між газоподібними NH₃ та SO₂ відбуваються хімічні реакції приєднання, продуктами яких є аддукти NH₃·SO₂ та (NH₃)₂·SO₂ у вигляді аерозолів. Також утворюються й інші сполуки (NH₄SO₃NH₂, NH₃SO₃, (NH₄)₂S₂O₇, NH₄N₃ та N₃H₇SO₄), але їх частка не перевищує 3 %.

На рис.6 показано змінення ефективності процесу видалення діоксиду сірки у хімічному реакторі з урахуванням утворення аддуктів у газовому середовищі. Температура газу на вході становить 150 °С. Загальну витрату води задано 51,9 г/нм³. Система подачі рідини «розчин – вода». Відстань між рівнями подачі дорівнює 7 м. Додаткове повітря у реактор не подається.

Розрахунки показали, як впродовж процесу вміст SO₂ й NH₃ у газі змінюється через аб-

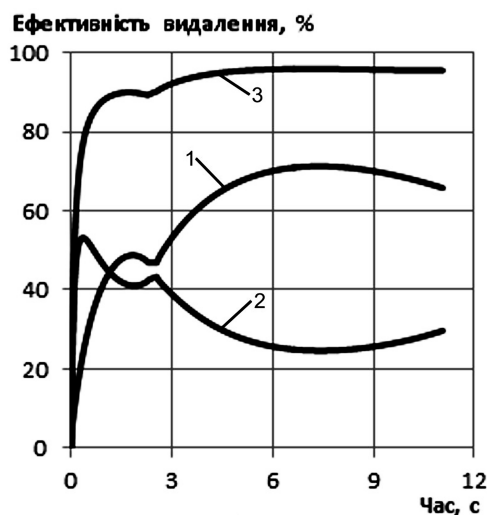


Рис.6. Ефективність видалення SO₂ у різних середовищах: 1 – рідина; 2 – газ; 3 – разом.

сорбцію та десорбцію. Спочатку, коли вміст діоксиду сірки не менше вмісту амоніаку, утворюється NH₃·SO₂. Згодом їх співвідношення змінюється на протилежне, тоді утворюється переважно (NH₃)₂·SO₂. Кінцева стадія процесу зв'язування SO₂ характеризується утворенням NH₃·SO₂.

На рис.6 видно, що з урахуванням гомогенних хімічних реакцій у газовому середовищі додатково на різних етапах процесу зв'язується 25–55 % діоксиду сірки від його початкової кількості у залежності від вмісту у газі та мольного співвідношення між NH₃ та SO₂. У результаті на виході реактора концентрація амоніаку не перевищує 58 мг/нм³.

За відповідних умов вказані вище аддукти можуть перетворюватися у сульфід та сульфат амонію [14]. Конверсія аддуктів відбувається відносно повільно. При використанні тканинних фільтрів для уловлення твердих частинок та аерозолів, які надходять з хімічного реактора, час перебування газу у фільтрі перевищує 20 с, частинок – майже на порядок більше, тому часу для утворення сульфїту та сульфату амонію має вистачити з запасом. У тканинному фільтрі додатково може зв'язуватись до 5 % цих речовин. Таким чином, загальна ефективність уловлення діоксиду сірки перевищуватиме 97 %.

Висновки

Напівсуха амонійна технологія дозволяє хімічно зв'язати до 66 % діоксиду сірки у краплях рідини, введеної у потік гарячих димових газів. Основною причиною низької ефективності є десорбція значної кількості амоніаку з крапель розчину у газове середовище.

У краплях розчину основне реагування між амоніаком та сірчистою кислотою проходить при водневому показнику близько 6,1. Це свідчить про переважне утворення у розчині аніону гідросульфїту, який при наявності кисню легко окислюється до аніону сульфату. Кількість утворення сульфату амонію у розчині збільшується при підвищенні концентрації кисню у розчині завдяки подачі додаткового повітря у робочу зону хімічного реактора, але можливості такого способу обмежені.

Роздільна подача зрошувальної води та 25 %-го водного розчину амоніаку не потребує попереднього приготування розчину, дозволяє регулювати температуру димових газів та концентрацію діоксиду сірки, але не дозволяє досягти приросту ефективності видалення діоксиду сірки у краплях рідини у порівнянні зі спільною подачею рідини.

Найбільша ефективність зв'язування діоксиду сірки у хімічному реакторі відбувається при подачі спочатку 3 %-го розчину амоніаку, а потім додаткової води після того, як краплі розчину висихають.

У газовому середовищі мають місце реакції зв'язування діоксиду сірки та амоніаку в присутності водяної пари з утворенням аерозолів. Додатково реакції абсорбції діоксиду сірки та перетворення аддуктів можуть відбуватися на стінках каналів тканинних фільтрів. Це дозволяє стверджувати про потенційно високу загальну ефективність технології напівсухого амонійного сіркоочищення, яка перевищуватиме 97 %.

Список літератури

1. Zevenhoven R., Kilpinen P. Control of pollutants in flue gases and fuel gases. — Espoo : Helsinki University of Technology. Nordic Energy Research Programme. Solid Fuel Committee. — February 2004. — Espoo/Turku, Finland.
2. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) (Recast) // Official Journal L334. — 2010. — P. 17–119.
3. Розпорядження Кабінету Міністрів України Про імплементацію Угоди про Асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони, від 17 вересня 2014 р. № 847-р // Урядовий кур'єр. — 08.10.2014. — № 185.
4. Integrated pollution prevention and control. Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants. European Commission. Institute for Prospective Technological Studies (Seville). — July 2006. — 607 p. — Access mode: <http://www.ipts.jrc.ec.europa.eu>.
5. Kohl A.I. Gas purification. — Houston : Gulf Publishing Company, 1997. — 1403 p.
6. Evans A.P., Miller C., Pouliot S. Operational Experience of Commercial, Full Scale Ammonia-Based Wet FGD for Over a Decade // Coal-Gen 2009, Charlotte, North Carolina, USA, 2009 — 19 p.
7. Volchyn I., Iasynetskyi A., Przybylski W., Maicher M. Semy-Dry Delsulphurisation for Coal Boilers // Proc. of Seventh International Conference on Clean Coal Technologies (CCT-15), Krakow, Poland, 17–21 May, 2015. IEA Clean Coal Centre. — Access mode: <http://www.cct2015.org>.
8. Srivastava R.K., Jozewicz W. Flue gas desulphurisation: the state of the art // Journal of the Air & Waste Management Association. — 2001.
9. Вольчин І.А., Карацуба А.С., Коломієць О.М. Математичне моделювання напівсухого методу сіркоочищення // Енергетика та електрифікація. — 2005. — № 8. — С. 45–49.
10. Коломієць О.М., Ясинецький А.О. Моделювання напівсухого аміачного методу видалення діоксиду сірки // Енерготехнології та ресурсосбереження. — 2014. — № 5–6. — С. 69–77.
11. Volchyn I., Karatsuba A., Rudenko L. Features of use of limestone and lime in wet desulphurisation technology // Research Journal of Engineering Sciences. — 2014. — Vol. 3. — Iss. 8. — P. 1–6.
12. Vance J.L., Peters L.K. Aerosol Formation Resulting from the Reaction of Ammonia and Sulfur Dioxide // The Journal of Industrial & Engineering Chemistry. — 1976. — Vol. 15, № 3. — P. 202–214.
13. Hartley E.M., Matleson Sulfur Dioxide Reactions with Ammonia in Humid Air // The Journal of Industrial & Engineering Chemistry. — 1975. — Vol. 14, № 1. — P. 67–78.
14. Landreth R., de Pena R.G., Helcklen J. Thermodynamics of the Reaction of Ammonia and Sulfur Dioxide in the Presence of Water Vapor // The Journal of Physical Chemistry. — 1975. — Vol. 79, № 17. — P. 1785–1796.

Поступила в редакцію 22.06.15

Вольчин И.А., докт. техн. наук, **Коломиец А.М.,** канд. техн. наук,
Ясинецкий А.А.

Институт угольных энерготехнологий НАН Украины, Киев
ул. Андреевская, 19, Киев 04070, Украина; e-mail: ceti@i.kiev.ua

Численное исследование процесса сероочистки полусухим аммиачным методом

Изложены результаты численного исследования тепломассообменных процессов в химическом реакторе, который работает по технологии полусухой аммиачной сероочистки при совместной и отдельной подаче воды для орошения газа и водного раствора аммиака. Выявлено влияние способа подачи жидкости в рабочую зону, расхода воды и дополнительного воздуха на эффективность процесса десульфуризации и температуры газа на выходе реактора капельного типа. Установлено, что из-за десорбции значительное количество аммиака переходит из раствора в газовую среду. Таким образом, химическое связывание сернистого ангидрида в реакторе происходит в результате гомогенных реакций не только в жидкости, но и в газе. Это приводит к уменьшению образования сульфита и сульфата аммония в каплях жидкости и к увеличению образования аддуктов в газовом объеме рабочей зоны химического реактора. Определено, что полусухой аммиачный метод позволяет химически связать более 97 % сернистого ангидрида, который находится в выходных дымовых газах котельного агрегата. *Библ. 14, рис. 6, табл. 1.*

Ключевые слова: диоксид серы, аммиак, сероочистка, полусухой метод, капля, аддукт.

Volchyn I.A., Doctor of Technical Sciences,

Kolomiets A.M., Candidate of Technical Sciences, **Yasinetskiy A.A.**
Coal Energy Technology Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev
19, Andriyvs'ka Str., 04070 Kiev, Ukraine, e-mail: ceti@i.kiev.ua

Numerical Study of Desulphurization Process by the Ammonium Semi-Dry Method

The paper presents the results of numerical investigation of heat and mass transfer processes in the drip-type chemical reactor. The reactor is operated by the semi-dry method of desulphurization with ammonia technology. Water for irrigation gas and aqueous ammonia solution fed to the reactor either together or separately. Studies have shown that the efficiency of desulfurization process and the gas temperature at the outlet of the reactor depends on the method of supplying the liquid into the working zone, flow of water and additional air. It is found that a significant amount of ammonia from the solution passes into the gaseous medium due to desorption. Thus, the chemical binding of sulfur dioxide in the reactor is due to homogeneous reactions in a liquid medium and gas. Firstly, this reduces the formation of ammonium sulfite and ammonium sulfate in the liquid droplets. Secondly, it leads to increased formation of adducts in the gas volume of the working zone of a chemical reactor. It has been determined that the ammonium semi-dry method allows chemically bind more than 97 % of sulfur dioxide, which is output with flue gases of the boiler unit. *Bibl. 14, Fig. 6, Table 1.*

Key words: sulfur dioxide, ammonia, desulfurization, semi-dry method, drop, adduct.

References

1. Zevenhoven R., Kilpinen P. Control of pollutants in flue gases and fuel gases. — Espoo : Helsinki University of Technology. Nordic Energy Research Programme. Solid Fuel Committee, February 2004. — Espoo/Turku, Finland.
2. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) (Recast), *Official Journal L334*, 2010, pp. 17–119.
3. Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy Pro implementatsiiu Uhody pro Asotsiatsiiu mizh Ukrainoiu ta Yevropeiskym Soiuzom, Yevropeiskym spivtovarystvom z atomnoi enerhii i yikhnimy derzhavamy-chlenamy vid 17 veresnia 2014 r. № 847-r, *Uriadovi kurier*, 08.10.2014 (185). (Ukr.)
4. Integrated pollution prevention and control. Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants. European Commission. Institute for Prospective Technological Studies (Seville), July 2006, 607 p. — Access mode: <http://www.ipts.jrc.ec.europa.eu>.
5. Kohl A.I. Gas purification. Houston : Gulf Publishing Company, 1997, 1403 p.
6. Evans A.P., Miller C., Pouliot S. Operational Experience of Commercial, Full Scale Ammonia-Based Wet FGD for Over a Decade, Coal-Gen 2009, Charlotte, North Carolina, USA, 2009, 19 p.
7. Volchyn I., Iasynetskyi A., Przybylski W., Maicher M. Semy-Dry Delsulphurisation for Coal Boilers, *Proc. of 7-th International Conference on Clean Coal Technologies (CCT2015)*, Krakow, Poland, 17–21 May, 2015. IEA Clean Coal Centre. — Access mode: <http://cct2015.org/ibis/CCT2015/home>
8. Srivastava R.K., Jozewicz W. Flue gas desulphurisation: the state of the art, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2001.
9. Volchyn I.A., Karatsuba A.S., Kolomiets A.M. Matematychnie modeliuvannia napivsuchoho metodu sirkoochyshchennia [Mathematical Modeling of Semi-Dry Method for Desulfurization], *Jenerhetyka ta elektryfikatsiia [Energetics and Electrification]*, 2005, (8), pp. 45–49 (Ukr.)
10. Kolomiets O.M., Yasynetskyi A.O. Modeliuvannia napivsuchoho amiachnoho metodu vydalennia dioksydu sirky [Modeling of Semi-Dry Ammonia Method of Removing of Sulfur Dioxide], *Jenerhotekhnologii i resursozberezhennia [Energy Technologies and Resource Saving]*, 2014, (5–6), pp. 69–77. (Ukr.)
11. Volchyn I., Karatsuba A., Rudenko L. Features of use of limestone and lime in wet desulphurisation technology, *Research Journal of Engineering Sciences*, 2014, 3, Iss. 8, pp. 1–6.
12. Vance J.L., Peters L.K. Aerosol Formation Resulting from the Reaction of Ammonia and Sulfur Dioxide, *The Journal of Industrial & Engineering Chemistry*, 1976, 15 (3), pp. 202–214.
13. Hartley E.M., Matleson Sulfur Dioxide Reactions with Ammonia in Humid Air, *The Journal of Industrial & Engineering Chemistry*, 1975, 14 (1), pp. 67–78.
14. Landreth R., de Pena R.G., Helcklen J. Thermodynamics of the Reaction of Ammonia and Sulfur Dioxide in the Presence of Water Vapor, *The Journal of Physical Chemistry*, 1975, 79 (17), pp. 1785–1796.

Received June 22, 2015

УДК 621.436.2

Пылёв В.А., докт. техн. наук, **Клименко А.Н.,** аспирант**Национальный технический университет «ХПИ», Харьков**ул. Фрунзе, 21, 61002 Харьков, Украина, e-mail: dvs@kpi.kharkov.ua**Улучшение эколого-экономических показателей дизеля с учетом модели эксплуатации транспортного средства**

Проведен анализ возможности комплексного улучшения показателей токсичности и топливной экономичности автомобильного и тракторного дизелей при одновременном поддержании достаточного уровня надежности их конструкции за счет использования систем автоматического регулирования теплового состояния. На основе данных проведенного моторного эксперимента решена компромиссная задача по оптимизации эколого-экономических показателей на каждом режиме заданной модели эксплуатации двигателей. В качестве управляющих факторов предложено использовать режимные параметры — частоту вращения коленчатого вала и нагрузку двигателя, в качестве управляемых — угол опережения подачи топлива и температурное состояние поршней. Выполнена оценка экологического эффекта от предложенных мероприятий за период эксплуатации дизеля. Предложены характеристические карты управления системой автоматического регулирования теплового состояния поршней дизеля 4ЧН12/14. *Библ. 17, рис. 2, табл. 3.*

Ключевые слова: автоматическое регулирование, экономичность двигателя, дымность, твердые частицы, оксиды азота, модель эксплуатации, оптимизация.