

Jerzy BUZEK

Instytut Inżynierii Chemicznej PAN w Gliwicach

DOBÓR INSTALACJI ODSIARCZANIA SPALIN I PREZENTACJA MOKREJ METODY WAPNIAKOWEJ

Streszczenie. Przedstawiono krótko najważniejsze, typowe metody odsiarczania spalin i podano kryteria doboru instalacji odsiarczania dla konkretnych warunków. Zaprezentowano także badania dotyczące wariantu mokrej metody wapniakowej i dane ruchowe technicznej realizacji tego wariantu.

SELECTION OF FGD INSTALLATION AND PRESENTATION OF WET LIMESTONE METHOD OF DESULPHURIZATION

Summary. The most important, typical methods of flue gas desulphurization (FGD) were shortly presented and the criterions of selection of the installations for specific users conditions were given. The paper also presents the investigations concerning wet limestone method of desulphurization and compiles the data on technical examination of the installation.

AUSWAHL EINER ABGASENTSCHWEFELUNGSANLAGE UND PRÄSENTATION DES NABEN KALKSTEINVERFAHRENS

Zusammenfassung. Die wichtigsten, typischen Verfahren zur Abgasentschwefelung wurden kurz besprochen und die Kriterien der Anlagenauswahl für konkrete Bedingungen angegeben. Es wurden auch Untersuchungen des naßen Kalksteinverfahrens präsentiert und die Betriebsparameter einer technischen, auf Grund dieser Methode ausgelegten Anlage vorgestellt.

Inwestowanie w instalacje odsiarczania spalin wynika zasadniczo z prostego rachunku ekonomicznego: koszty oczyszczania spalin powinny być niższe niż wysokość kar ponoszonych z tytułu przekroczenia norm. W rachunku tym,

prowadzonym przez inwestora, istotne znaczenie ma więc z jednej strony wartość dopuszczalnych emisji SO_2 i wysokość kar za ich przekroczenie, a z drugiej – dobór odpowiedniej instalacji odsiarczania, która powinna gwarantować dotrzymanie tych norm, przy możliwie niskich sumarycznych kosztach odsiarczania.

Wartość dopuszczalnych emisji i wysokość kar ustalane są centralnie i obowiązują w całym kraju, ale przeliczenia dla konkretnych warunków dają rozmaite wyniki (jeśli idzie o wymaganą sprawność instalacji odsiarczającej) w zależności od terminu zabudowy kotła, jakości węgla, a także od stężenia zanieczyszczeń tła wokół komina. Podstawowe więc znaczenia dla inwestora nabiera problem doboru odpowiedniej metody odsiarczania, spośród wielu możliwych rozwiązań i dobrania takiego wariantu, aby warunek wymaganej w danych warunkach sprawności odsiarczania, przy niskich kosztach, był spełniony.

KRYTERIA WYBORU METODY ODSIARCZANIA SPALIN

Podstawowe znaczenie ma kryterium ekonomiczne, czyli koszt odsiarczania, definiowany jako sumaryczny koszt inwestycyjny i eksploatacyjny usunięcia 1 kg SO_2 z gazu spalinowego.

Kryterium to ma charakter uniwersalny. Oznacza ono na przykład, że jeśli jedna z instalacji jest dwukrotnie droższa inwestycyjnie i eksploatacyjnie od drugiej, ale odsiarcza z trzykrotnie wyższą sprawnością, to odsiarczanie tą droższą, ale sprawniejszą instalacją jest tańsze. Istotne jest również w tym kryterium stosowanie zawsze sumarycznych kosztów: instalacja tania w budowie może się bowiem okazać bardzo droga w eksploatacji, na przykład ze względu na duże zużycie surowców, częste wymiany zużywających się elementów, czy trudności ruchowe i związane z tym przerwy w działaniu i wzrost kar za przekroczenie norm emisji.

Analiza powyższego kryterium prowadzi do jeszcze jednego, oczywistego wniosku: najdroższe są instalacje, które łatwo się zatykają, wymagają częstszych przestojów konserwacyjnych lub wręcz ulegają całkowitemu unieruchomieniu wskutek błędów obsługi lub sterowania automatycznego – jeśli instalacja musi być szczególnie precyzyjnie obsługiwana. Przy budowie takich, niepewnych w ruchu, instalacji poniesiono bowiem koszty inwestycyjne, a nie wyłapuje ona SO_2 , lub wyłapuje go znacznie mniej niż założono.

W każdym więc przypadku szczegółowa analiza kosztowa instalacji odsiarczania byłaby najwłaściwszym sposobem doboru instalacji, przy czym analizę taką powinno się przeprowadzić dla wszystkich oferowanych metod i rozwiązań procesowych.

Przykład analizy i optymalizacji kosztowej jednej, arbitralnie wybranej metody dla konkretnego przypadku odsiarczania gazów odlotowych podano w

pracy [1]. Opracowano najpierw pełny model fizykochemiczny instalacji oraz uzupełniono – w pomiarach własnych – dane fizykochemiczne modelu, a następnie w oparciu o model sieci neuronowej dokonano optymalizacji instalacji dla założeń sprecyzowanych przez inwestora. Podobną, skomplikowaną analizę należałoby oczywiście przeprowadzić dla innych możliwych w tym przypadku rozwiązań procesu odsiarczania, a następnie wybrać, jako optymalne, rozwiązanie, dla którego koszty, z uwzględnieniem opłat za korzystanie ze środowiska, byłyby najmniejsze.

Stosowanie kryterium kosztów przy wyborze metody odsiarczania dla konkretnego obiektu jest więc trudne i pracochłonne. Wymagałoby bowiem wykonania szczegółowych założeń procesowych i oceny kosztów instalacji dla kilku metod i ich wariantów, a uzyskany wynik, ze względu na oczywiste przybliżenie kosztów, byłby i tak niepewny.

Zamiast takiej, liczbowej analizy, przy wyborze prowadzi się porównanie na bazie pewnych cząstkowych kryteriów, które w sumie składają się na ogólne kryterium kosztów. O kilku spośród tych cząstkowych kryteriów już wspomniano powyżej. Najważniejsze z nich to: *sprawność odsiarczania instalacji, wrażliwość na zmiany obciążenia, orientacyjne koszty budowy, zużycie surowców, energii i innych materiałów, ilość i rodzaj zrzuconego odpadu*, a wreszcie kryteria szczególnie ważne: *pewność ruchu oraz prostota obsługi i sterowania instalacją*. Tego rodzaju wskaźnikami posłużono się w niniejszej pracy przy ocenie metod.

Należy jeszcze dodać, że ogólne kryterium kosztów trudno wprawdzie stosować w odniesieniu do konkretnego, jeszcze nie rozwiązanego przypadku odsiarczania, można natomiast posłużyć się nim w odniesieniu do już pracujących instalacji i do praktyki wdrażania różnych metod odsiarczania. Doświadczenia ze stosowaniem różnych metod i analiza kosztów odsiarczania w przodujących krajach doprowadziły w ciągu 20 lat do sytuacji, w której jedne metody są zdecydowanie bardziej popularne niż inne. Z całą pewnością można stwierdzić, że te preferencje niektórych metod wynikały z niskich kosztów odsiarczania: w krajach tych kryterium kosztowe jest bowiem zawsze najważniejsze.

Nie ma powodów przypuszczać, że metody najlepsze gdzie indziej okażą się nieekonomiczne w warunkach polskich. Popularność metody za granicą uznać więc można za jedno z kryteriów doboru metody odsiarczania spalin dla warunków polskich.

CHARAKTERYSTYKA PRZYDATNOŚCI W WARUNKACH POLSKICH PODSTAWOWYCH METOD ODSIARCZANIA GAZÓW

Aby zaproponowany tutaj sposób postępowania przy doborze metody odsiarczania dla konkretnego przypadku nie budził wątpliwości, należało naj-

pierw scharakteryzować podstawowe metody, choćby ze względu na różne spotykane w literaturze nazwy dla poszczególnych metod, oraz poddać krytycznej analizie możliwości ich powszechnego stosowania. Należy tutaj zaznaczyć, że w pewnych specyficznych warunkach (dla niektórych gazów odlotowych w przemyśle chemicznym czy w metalurgii) najtańsze mogą się okazać pewne nietypowe metody odsiarczania, używające surowce odpadowe czy wykorzystujące istniejącą już aparaturę lub urządzenia; analiza możliwości stosowania takich nietypowych metod nie jest przedmiotem niniejszych rozważań.

Typowe metody odsiarczania dzieli się na *metody odpadowe* i *bezodpadowe*. Metody bezodpadowe prowadzą do wyodrębnienia, w trakcie odsiarczania, czystego SO_2 , który następnie skrapla się lub przerabia na kwas siarkowy, czyli produkty handlowe. Takie metody mają sens tylko dla bardzo dużych obiektów, jak bloki energetyczne dużej mocy, albo w specyficznych warunkach, np. jeśli istnieje na miejscu już gotowa fabryka kwasu siarkowego.

Metody odpadowe dzieli się zasadniczo na *metody suche*, *półsuche* i *mokre*. Surowcem w tych metodach, oprócz najpopularniejszych związków wapnia, mogą być związki sodu, magnezu i potasu. W warunkach polskich na szerszą skalę wchodzi w rachubę jedynie związki wapnia, a więc albo zmielony produkt kopalny – kamień wapienny (CaCO_3), zwany wapiakiem, albo też wapno palone (CaO) lub gaszone (Ca(OH)_2). Metody z zastosowaniem wapienka nazywane są *wapniakowymi*, metody z zastosowaniem wapna – *wapnowymi*; nazwy te często bywają mylone lub przekręcane w opisach. Metody półsuche opierają się prawie zawsze na wapnie palonym lub gaszonym, zaś metody suche i mokre zwykle na wapieniu. Wapno jest kilkakrotnie droższe od wapienka.

Metody suche charakteryzują się sprawnością odsiarczania w granicach 20 ÷ 60%. Polegają one na wdmuchiwanie wapienka do komory spalania lub w jej pobliżu, gdzie następuje reakcja i pochłanianie SO_2 , z wytworzeniem siarczynu wapnia i siarczanu wapnia, wyłapywanych w procesie odpylania. Stosunek stechiometryczny wapnia (Ca) w surowcu do wyłapywanego SO_2 wynosi w tych metodach 1,5 ÷ 3. Wyższe sprawności (40%) są możliwe do uzyskania tylko przy dużym nadmiarze surowca, co powoduje wzrost kosztów eksploatacyjnych i wzrost ilości odpadu. Wymagane jest także dobre wymieszanie sorbentu ze strumieniem spalin tuż w pobliżu płomienia o odpowiedniej temperaturze, co jest praktycznie możliwe jedynie przy kotłach pyłowych; w przypadku silnie zmiennego obciążenia kotła warunek dobrego wymieszania jest w każdym przypadku trudny do spełnienia. Duże trudności w tych metodach powoduje zabijanie się powierzchni wymiany ciepła w kotle przez produkty reakcji i nieprzereagowany wapienka, są też kłopoty z odpylaniem. Pomimo więc niskich kosztów inwestycyjnych w tych metodach odsiarczania, są one stosowane dość rzadko, i to praktycznie jedynie dla dużych jednostek,

o ustalonych parametrach przepływowych. Oferta tych metod na naszym rynku jest niewielka – proponuje je zaledwie kilka firm krajowych.

Istnieje wariant metody suchej, polegający na nawilżaniu mieszaniny spalin z sorbentem w pewnej odległości od miejsca wtrysku sorbentu, w celu poprawy sprawności odsiarczania. Ten obiecujący sposób odsiarczania stosuje się na razie wyłącznie do dużych kotłów pyłowych.

Metody półsuche wykazują sprawność w granicach $60 \div 80\%$, a w niektórych przypadkach technologii zagranicznych – nawet do 90% . W metodach tych stosuje się rozpylanie, za pomocą szybkoobrotowych głowic, zawiesiny wapna gaszonego do strumienia spalin przepływających przez aparat reakcyjny. Następuje reakcja pochłaniania SO_2 oraz odparowanie wody, a uzyskany odpad mieszaninę siarczynu i siarczanu oraz węglanu wapnia – wyłapuje się w specjalnych filtrach workowych. Proces prowadzi się w temperaturze ok. 80°C , wyższej o $20 \div 30$ od punktu rosy i zasadniczo w metodach tych gazy nie wymagają podgrzewu przed kominem. Stechiometryczny stosunek wapnia do usuwanego SO_2 wynosi zwykle $1,2 \div 1,6$.

Aby uzyskać wyższe sprawności w tych metodach należy stosować znaczny nadmiar surowca, co zwiększa koszty i ilość odpadu. Zmniejszenie nadmiaru surowca jest możliwe poprzez zastosowanie zawrotu odpadów, co grozi jednak przedwczesnym zużyciem kosztownych głowic rozpyłowych wskutek erozyjnego oddziaływania wyłapywanego w procesie pyłu ze spalania.

Można też zwiększyć sprawność poprzez obniżenie temperatury pracy w absorberze do kilku stopni powyżej punktu rosy. Wówczas jednak pojawia się problem z podgrzewem gazu przed kominem, a przede wszystkim – niebezpieczeństwo nieodparowania wody z sorbentu i zawilgocenia filtrów workowych, co prowadzi do ich zniszczenia. Jest to główna uciążliwość metody, gdyż zawilgocenie bardzo kosztownych filtrów może się pojawić w każdych warunkach prowadzenia procesu, gdy nie są dotrzymane i precyzyjnie sterowane główne parametry: ilość i temperatura spalin oraz ilość i skład rozpylanego sorbentu. W metodach tych bardzo kosztowna jest więc automatyzacja i sterowanie i są one mało elastyczne, jeśli idzie o ilość pobieranych spalin.

Dobra sprawność odsiarczania wymaga też doskonałego rozpylenia sorbentu; w Polsce nie produkuje się szybkoobrotowych głowic spełniających takie wymagania.

Metoda półsucha realizowana jest w dwu zasadniczych wariantach: opisanym powyżej wariantcie z zastosowaniem głowicy rozpyłowej i w wariantcie z zastosowaniem dysz wtryskujących sorbent do złoża fluidalnego. Zasadnicza idea obydwu procesów (np. zawrót odpadów, temperatura pracy, zastosowanie filtrów workowych itp.) oraz sprawność i koszty odsiarczania są w obu tych wariantach bardzo zbliżone.

Metody te mogą się okazać korzystne w wielu przypadkach, mają niezłe sprawności, a koszty inwestycyjne i eksploatacyjne – umiarkowane. Za grani-

cą są stosowane dla dużych jednostek energetycznych, posiadających praktycznie stałe parametry przepływu spalin. W Polsce instalacje pracujące wg dwu różnych wariantów metod półsuchych oferuje kilkanaście firm krajowych i zagranicznych. Dla obiektów ciepłowniczych małej i średniej mocy, pracujących przy bardzo zmiennej wydajności cieplnej w sezonie grzewczym i poza nim, metody te są kłopotliwe i zmuszają niekiedy do nieodsiarczenia części gazów w okresie szczytowego obciążenia lub też do wyłączenia instalacji w przypadku małych obciążeń.

Metody mokre mają sprawności odsiarczania 90% i powyżej, co gwarantuje spełnienie ostrych norm ochrony środowiska. Metody te polegają na pochłanianiu SO_2 w wodnej zawieszynie sorbentu w specjalnych aparatach – skruberach i kolumnach absorpcyjnych. Sorbentem jest zmielony kamień wapienny, a w wyjątkowych przypadkach – wapno. Produktem jest siarczan wapnia (gips), całkowicie obojętny dla środowiska naturalnego w trakcie składowania. Obieg wody jest zwykle zamknięty. Odsiarczone gazy, mające temperaturę punktu rosy (ok. 50°C), podgrzewa się przed kominem o 15 ± 20 lub też wyrzuca do atmosfery kominem mokrym.

Nadmiar wapieniaka w tych metodach jest niewielki, stosunek stechiometryczny Ca/SO_2 wynosi zwykle $1,03 \div 1,05$, a ilość podawanych spalin w konkretnej instalacji może się wahać w bardzo dużych granicach. Aparaturę zabezpiecza się przed korozją, dysze do rozpylania cieczy w skruberze czy kolumnie absorpcyjnej są już obecnie bardzo dobrej jakości i łatwo dostępne. Koszty inwestycyjne i eksploatacyjne są porównywalne z metodami półsuchymi.

Oprócz metody mokrej wapieniakowej istnieje także, dość popularna w kraju, metoda dwualkaliczna i jej modyfikacje oparte na wapnie jako surowcu lub też wykorzystujące alkaliczne popioły lotne; okazały się one jednak niepewne w eksploatacji. Poprawa pewności działania w metodzie dwualkalicznej prowadzi do bardzo rozbudowanego i drogiego układu technologicznego, co skłoniło większość renomowanych firm zachodnich do zrezygnowania z tej metody odsiarczania spalin.

WYBÓR OPTYMALNEJ METODY ODSIARCZANIA SPALIN

W celu ułatwienia wyboru optymalnej metody odsiarczania dla konkretnych warunków przedstawiono podstawowe cechy omawianych metod: suchej, półsuchej i mokrej, opartych na surowcach wapienowych.

W tabeli 1 zestawiono niektóre informacje o omawianych metodach.

Biorąc pod uwagę podstawowe kryterium doboru instalacji osiarczania, tzn. stosunek kosztów sumarycznych do ilości SO_2 oddzielonego od spalin, można stwierdzić, że *metoda sucha* ma zwykle wyższą wartość tego wskaźnika niż pozostałe metody. Koszty eksploatacyjne są bowiem znaczne (zużycie sorbentu, zagospodarowanie dużych ilości odpadów, kłopoty z powierzchnią wymia-

ny ciepła w kotle), a ilość usuwanego SO_2 – stosunkowo niewielka. Należy jednak podkreślić, że w metodzie tej koszty inwestycyjne są niskie, co w wielu przypadkach może przesądzić o zastosowaniu jej w praktyce. Warto jednak mieć na uwadze, że metoda sucha charakteryzuje się małą elastycznością na zmianę obciążeń (wydajności kotła), jeśli chce się osiągnąć sprawności odsiarczania rzędu $30 \div 40\%$.

Tablica 1
Zestawienie niektórych informacji o omawianych metodach

Lp.	Wyszczególnienie	Metoda sucha (wapniakowa)	Metody półsuche (wapnowe)	Metoda mokra wapniakowa
1	Surowiec	Węglan wapnia	Wapno gaszone	Węglan wapnia – produkt kopalny
2	Skuteczność odsiarczania	$25 \div 35\%$	ok. 70%	powyżej 90%
3	Stopień nadmiaru sorbentu (stosunek Ca/S)	$1,5 \div 3$	$1,2 \div 1,8$	do 1,1
4	Wzrost kosztów produkcji energii	ok. 4%	ok. 7%	ok. 8%
5	Odpad	Lotne, suche pyły CaSO_4 , CaSO_3 , CaCO_3	Lotne, suche pyły CaSO_3 , CaSO_4 , CaO	Obojętny dla środowiska półsuchy osad CaSO_4 – gips
6	Ścieki	brak	brak	zwykle brak
7	Wpływ zmian obciążenia	wrażliwa	bardzo wrażliwa	mało wrażliwa
8	Wpływ na pracę kotła	znaczny	brak	brak

Stosowanie tych metod dla nowo budowanych kotłów, tzw. grupy C z Rozporządzenia Ministra OŚZNiL z dn.12.11.1990r. dotyczącego norm dopuszczalnej emisji, daje zwykle niewystarczające efekty z punktu widzenia ochrony środowiska. Jednak dla kotłów starszych, pracujących przy ustabilizowanym obciążeniu, metoda sucha odsiarczania spalin może się okazać najwłaściwszym rozwiązaniem.

Metody półsuche mają wartość wskaźnika kosztów do ilości wyłapanego SO_2 na tym samym, lub nieco tylko wyższym poziomie niż metody mokre. W wielu przypadkach ich sprawność jest wystarczająca dla spełnienia norm ochrony środowiska nawet dla nowych kotłów. Należy jednak mieć na uwadze, że instalacja wg tej metody musi być bardzo dobrze dopracowana, bezbłędnie sterowana i obsługiwana, pod groźbą poważnych awarii, np. zawilgocenia filtrów, lub też radykalnego obniżenia sprawności, gdy sorbent za szybko

wysycha. Z tego też względu w instalacji półsuchej istnieje wąski margines zmiany parametrów przepływu spalin. Newralgicznym punktem instalacji jest wysokoobrotowa głowica, wymagająca stałej obsługi, kontroli drgań oraz dość częstej wymiany. W rozwiązaniu ze złożem fluidalnym pojawiają się natomiast znane problemy ruchowe z „utrzymaniem” takiego złoża i ze sterowaniem całością procesu.

Pewną niedogodnością w stosowaniu metod półsuchych jest składowanie odpadu, którym są lotne pyły o znacznej zawartości siarczynu wapnia (CaSO_3); siarczyn wapnia nie jest całkowicie obojętny dla środowiska.

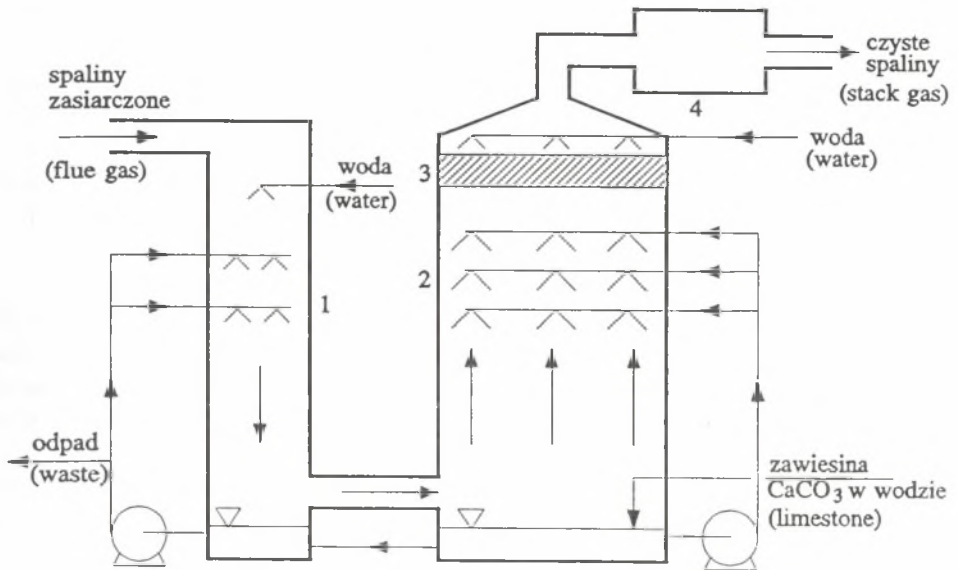
Metoda mokra wapniakowa ma zwykle niższy, w porównaniu z pozostałymi metodami, wskaźnik kosztów odsiarczania do ilości usuniętego SO_2 . Metoda ta charakteryzuje się możliwością zmiany obciążeń instalacji spalinami w bardzo dużych granicach, przy czym opłacalne jest przyjęcie zmian przepływu spalin w zakresie $40 \div 130\%$ obciążenia nominalnego; jako odpad produkowany jest – w zależności od przyjętego rozwiązania albo w postaci półsuchej albo w suchej – jedynie gips, obojętny dla środowiska. Metoda wapniakowa gwarantuje praktycznie w każdych warunkach uzyskanie wymaganych sprawności odsiarczania, wymaga niewielkiego nadmiaru taniego i łatwo dostępnego surowca, jakim jest mielony kamień wapienny. Metoda jest mało wrażliwa na ewentualne błędy i niedopatrzenia sterowania.

ODSIARCZANIE I ODPYLANIE SPALIN MOKRĄ METODĄ WAPNIAKOWĄ

Analiza podanych wyżej kryteriów doboru metody odsiarczania w odniesieniu do podstawowych metod doprowadziła do wniosku, że – podobnie jak w innych krajach – w warunkach polskich niezwykle atrakcyjna jest mokra metoda wapniakowa odsiarczania gazów odlotowych. Statystyki światowe wykazują, że od 80% (w USA) do 90% (np. w RFN) przemysłowych instalacji odsiarczania spalin to instalacje pracujące wg mokrej metody wapniakowej. Taka przewaga jednej metody nad innymi wynika bez wątpienia z faktu, że metoda ta, dla przeważającej liczby przypadków, ma niższe globalne (inwestycyjne i eksploatacyjne) koszty odsiarczania.

W Polsce mokra metoda wapniakowa jest oferowana jedynie przez firmy zachodnie (m.in. dla elektrowni Bełchatów, Opole i Jaworzno), lub też przez firmy rodzime, związane jednak poprzez umowy licencyjne z zagranicznymi. Należy zauważyć, że w przypadku stosowania polskiej technologii należałoby oczekiwać ok. 2 – 3 krotnie niższych kosztów inwestycyjnych, przy zbliżonych kosztach eksploatacyjnych, w porównaniu z technologiami zagranicznymi lub licencyjnymi.

Charakterystyka problemu opracowania własnej technologii. W instalacji odsiarczania spalin mokrą metodą wapniakową zachodzi równocześnie kilka



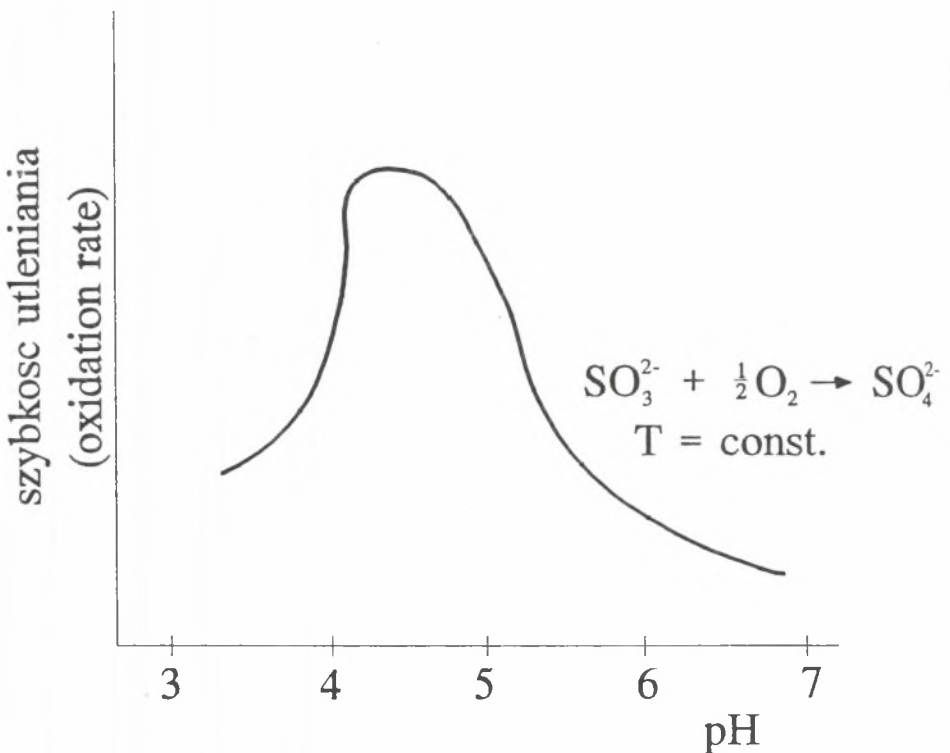
Rys. 1. Schemat ideowy instalacji odsiarczania spalin wg wariantu mokrej metody wapienkowej: 1 – skruber oczyszczania wstępnego (1 stopień) z napowietrzanym zbiornikiem zawiesiny, 2 – kolumna natryskowa (2 stopień) ze zbiornikiem zawiesiny, 3 – odkraplacz, 4 – podgrzewacz spalin

Fig. 1. Schematic diagram of the plant of the flue gas desulphurization due to wet limestone method: 1 – preliminary absorption scrubber (first stage) together with slurry tank with aeration, 2 – spray column (second stage) with slurry tank, 3 – demister, 4 – stack gas heater

procesów fizykochemicznych. W kolumnach zraszanych, pracujących współprądowo lub przeciwpądowo (rys. 1), następuje absorpcja SO_2 i innych kwaśnych gazów w kroplach zawiesiny sorbentu i produktów reakcji; równocześnie zachodzi tam proces schładzania gazu i odparowania wody oraz odpylania spalin, a więc łącznie cztery procesy cząstkowe. Reakcja między zaabsorbowanym dwutlenkiem siarki a zawiesiną sorbentu zachodzi w zbiornikach reakcyjnych, przy czym procesowi temu towarzyszy najpierw rozpuszczanie węglańca wapnia, a następnie utlenianie siarczynu wapnia do siarczanu oraz krystalizacja. Parametry procesowe w kolumnach, jak i panujące w zbiornikach reakcyjnych wpływają nawzajem na siebie i decydują o sprawności odsiarczania/odpylania, stopniu wykorzystania sorbentu, oporach przepływu czy zużyciu energii na mieszanie i tłoczenie zawiesiny. Pełny model teoretyczny całości tego złożonego procesu nie jest dotąd opracowany, a dla modeli procesów cząstkowych brak wielu danych fizykochemicznych, toteż procesy związane z mokrą metodą wapieniową są nadal przedmiotem badań [2].

Prawidłowy dobór parametrów i optymalizacja projektowa procesu wymagają więc dysponowania odpowiednimi, własnymi danymi doświadczalnymi.

Instalacje odsiarczania gazów stwarzają także liczne trudności eksploatacyjne. W przypadku mokrej metody wapniakowej należą do nich niebezpieczeństwo zarastania instalacji, problem właściwego odkraplania, dobór materiałów odpornych na korozję i erozję czy wreszcie optymalne rozwiązanie podgrzewu gazów przed kominem: poprzez mieszanie z częścią gorących nieodsiarczonych spalin, dodawanie gorącego powietrza czy też podgrzewanie przeponowe parą lub gorącymi spalinami. Osobne zagadnienie to łatwość uzdatnienia i zagospodarowania odpadów, które wiąże się m.in. z pełnym utlenieniem produktów i uzyskaniem gruboziarnistego gipsu ([3], [4]); dla przykładu dla samego tylko procesu utleniania pożądane jest dysponowanie zależnością przedstawioną poglądowo na rys. 2, aby stworzyć właściwe wa-



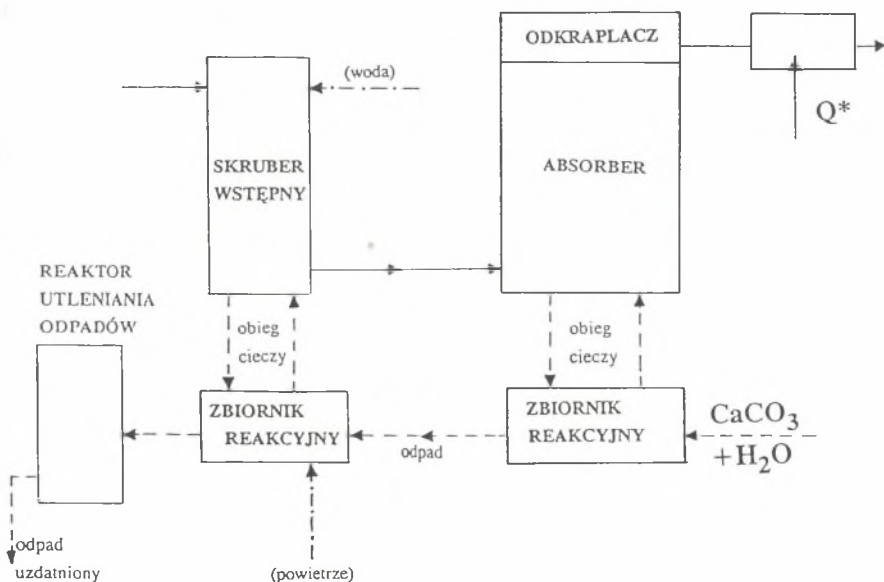
Rys. 2. Poglądowy przebieg zależności prędkości dotleniania siarczynu wapnia od pH zawiesiny

Fig. 2. Demonstrative dependence of oxidation rate of CaSO_3 on pH value of the slurry

runki pełnego utlenienia odpadu. Kolejny problem to reaktywność stosowanego zmielonego wapienia i sposób podniesienia jej do wymaganego poziomu. Wszystkie te problemy ruchowe wymagają analizy doświadczalnej, zanim przystąpi się do technicznej realizacji metody.

Badania własne. W oparciu o wstępne doświadczenia oraz studia literaturowe w Instytucie Inżynierii Chemicznej PAN w Gliwicach zbudowano aparaturę doświadczalną do badań metody wapniakowej, pracującą na rzeczywistych gazach spalinowych. Rys. 1 przedstawia schemat ideowy tej instalacji.

Badania dotyczyły w pierwszej kolejności doboru ogólnego schematu procesowego. Mokra metoda wapniakowa może być bowiem realizowana w kilku wariantach (rys. 3), a więc: bez skrubera wstępnego; z jednym zbiornikiem reakcyjnym dla skrubera i kolumny; z dotlenianiem odpadu w trakcie absorpcji lub też poza zbiornikami reakcyjnymi; z różnymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi skrubera i kolumny, a więc zraszanie dyszami, zraszane wypełnienie czy półki barbotażowe.



Rys. 3. Warianty procesowe mokrej metody wapniakowej na bazie schematu z rys. 1; dodano reaktor utleniania odpadów; — spaliny, - - - zawiesina wapieniaka i odpad, - - - media dodatkowe

Fig. 3. Processing variants of the wet limestone method on the basis of the diagram from Fig. 1; reactor of oxidation of the waste was added (left); — flue gas, - - - limestone slurry and waste, - - - additional stocks

Przeprowadzono badania optymalizacyjne parametrów procesowych oraz badania ruchowe dotyczące problemów eksploatacyjnych opisanych powyżej. Sformułowano także zależności teoretyczne pomiędzy parametrami procesu [5]. Przykładowe wyniki badań parametrów procesowych przedstawiono na rysunkach 4 i 5 [6].

Rozwiązanie techniczne wariantu mokrej metody wapniakowej. W oparciu o uzyskane w badaniach dane technologiczne, eksploatacyjne i sprawdzone rozwiązania konstrukcyjne opracowano kompletny schemat technologiczny i procesowy instalacji odsiarczania dla typowych kotłów węglowych. Na tej podstawie zaprojektowano i wykonano instalację w skali półtechnicznej, a następnie technicznej. Ten wariant mokrej metody wapniakowej wykazuje wskaźniki identyczne jak instalacje tego typu produkowane za granicą.

Przy opracowaniu omawianego wariantu metody wapniakowej uwzględniono także specyfikę lokalnych ciepłowni komunalnych. Pracuje tam zwykle kilka kotłów o zróżnicowanej wydajności cieplnej. Ilość spalin w okresach szczytowego, zimowego obciążenia przewyższa wielokrotnie ilość spalin w okresie letnim. Obsługa nie posiada doświadczenia w prowadzeniu tego typu instalacji i nie dysponuje zapleczem analitycznym.

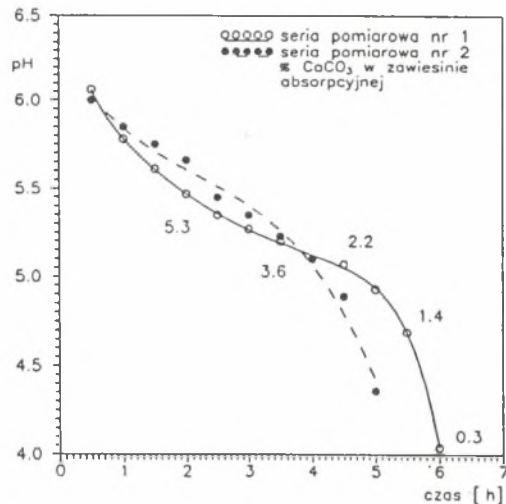
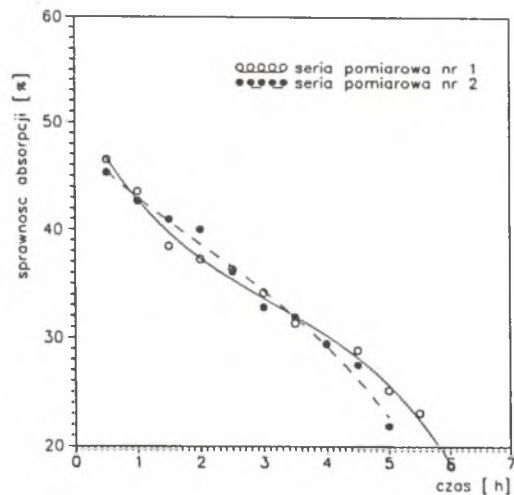
Podstawowe dane techniczne typowej instalacji wg omawianego wariantu mokrej metody wapniakowej są następujące:

– skuteczność odsiarczania i odpylania	> 90% i > 95%
– zużycie kamienia wapiennego (zmielonego)	1,6 kg/kg SO ₂
– zużycie wody	50 ÷ 80 dm ³ /1000 Nm ³ spalin
– ilość suchego odpadu	3 kg/kg SO ₂
– opory przepływu	24 kPa
– moc zainstalowana	2,5 ÷ 3 kW/1000 Nm ³ spalin/h

PODSUMOWANIE

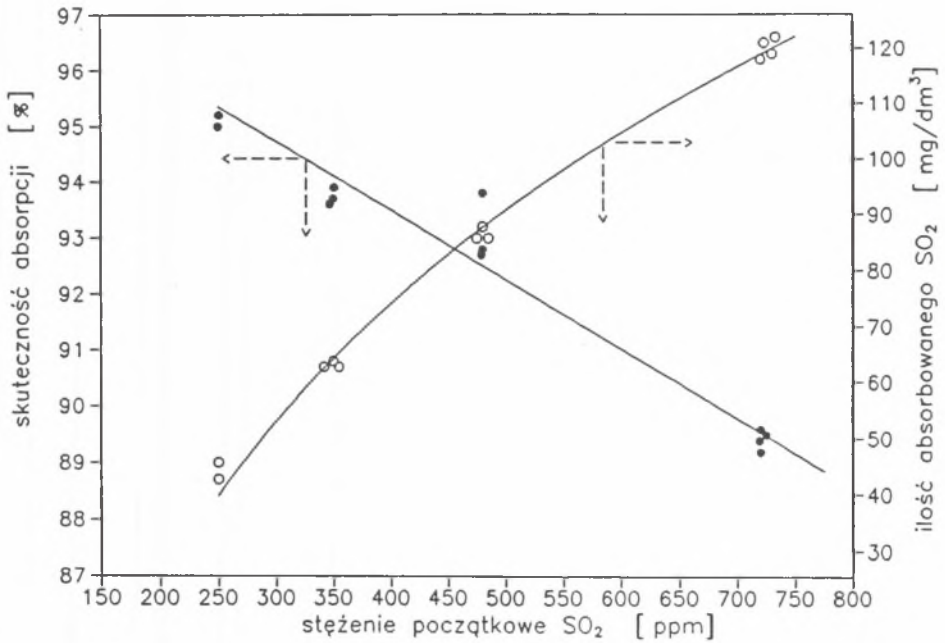
Znaczna ilość oferowanych rozwiązań instalacji odsiarczania spalin stwarza poważne trudności przy doborze metody czy jej wariantu dla konkretnego przypadku. Zasadniczym zaś celem doboru powinny być najniższe sumaryczne koszty odsiarczania, z uwzględnieniem spełnienia przez instalację norm ochrony środowiska.

Kryterium ekonomiczne doboru, bez wątplenia najważniejsze, wymaga jednak trudnych, pracochłonnych i niekiedy niepewnych obliczeń, toteż można je zastąpić kryteriami cząstkowymi, takimi jak sprawność odsiarczania instalacji, wrażliwość na zmiany obciążenia, orientacyjne koszty budowy, zużycie surowców, energii i innych materiałów, ilość i rodzaj zrzuconego odpadu, pewność ruchu oraz prostota obsługi i sterowania instalacją. Popularność metody w krajach, które rozwiązały już problem odsiarczania, jest dodatkowym, ważnym wskaźnikiem optymalności danego rozwiązania.



Rys. 4. Zmiany efektywności absorpcji w trakcie wyczerpywania zawiesiny; stężenie ciała stałego w zawieszynie: 100 g/dm^3 ; zraszania na 3 poziomach z natężeniem $4,5 \text{ dm}^3/\text{m}^3$ gazu, przy prędkości spalin 4 m/s ; początkowa zawartość CaCO_3 : 10 g/dm^3

Fig. 3. Dependence of the SO_2 reduction (%) and the slurry exhaustion (pH) on time (h) total concentration of solid in slurry: 100 g/dm^3 ; 3 spraying levels with the rate $4,5 \text{ dm}^3/\text{m}^3$ of gas; flue gas velocity: 4 m/s ; initial concentration of CaCO_3 : 10 g/dm^3 ; 1 and 2 denote the number of experimental run and the numbers in right figure denote the concentration of CaCO_3 in the slurry (%)



Rys. 5. Wpływ stężenia początkowego SO₂ na skuteczność absorpcji i ilość zaabsorbowanego SO₂ w 1 dm³ zawiesiny zraszającej, przy stężeniu zawiesiny 100 g/dm³, zraszaniu na 3 poziomach w każdej kolumnie, z natężeniem 6 dm³/Nm³ (I kolumna) i 10 dm³/Nm³ (II kolumna) oraz prędkości spalin ok. 2 m/s

Fig. 5. Dependences of the reduction rate of SO₂ (left, in%) and the amount of SO₂ absorbed (right, in mg/dm³ of slurry) on the initial SO₂ concentration in flue gas, for solid concentration in slurry 100 g/dm³, 3 spraying levels in each column, spraying rate 6 dm³/Nm³ (first column) and 10 dm³/Nm³ (second column), and flue gas velocity ca. 2 m/s

Analiza podstawowych metod odsiarczania pozwala ograniczyć zakres poszukiwań optymalnej metody dla odsiarczania spalin w warunkach polskich do trzech metod: suchej, półsuchej i mokrej, opartych na surowcach wapienych.

Opisano szerzej mokrą metodę wapieniową, najpopularniejszą obecnie metodą odsiarczania spalin oraz wariant tej metody opracowany na podstawie własnych badań i doświadczeń eksploatacyjnych.

LITERATURA

- [1] Buzek J.: Optymalizacja kosztowa instalacji odsiarczania gazów na przykładzie bezodpadowego procesu Wellman-Lorda. Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 1995, 34, nr 2. 4
- [2] Chem.Engng.Sci., wydanie specjalne, 1994, 49, No 24A.
- [3] Mittelbach G.: Desulphurization of flue gases on the basis of lime and limestone scrubbing-sulphur. Dioxide and Nitrogen Oxides in Industrial Waste Gases. 1991 ESCS, EEC, EAEC, Brussels and Luxemburg.
- [4] Hengel J.A. et al., FGD By-Product Disposal/Utilization. Tenth Symposium on FGD, Atlanta, November 1986.
- [5] Mrozowski J., Wpływ podstawowych parametrów procesowych na skuteczność odsiarczania gazów mokrą metodą wapieniową. Praca doktorska, w przygotowaniu.
- [6] Buzek J., Mrozowski J., Wasilewski W.: Badania mokrej metody wapieniowej odsiarczania spalin i wdrożenie wariantu tej metody. Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 1995, 34, nr 2.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Tadeusz CHMIELNIAK

Wpłynęło do Redakcji: 10. 03. 1995 r.

Abstract

The paper deals with the selection of the FGD plant that would suit the assumed users demands. The aim of the selection procedure is the minimization of costs of desulphurization when charges connected with the environmental protection are taken into account. Thus, the total cost (capital and operating) of the plant should be the most important criterion of the selection.

The example of the cost optimization of FGD plant was given in [1]. The procedure is very complicated unfortunately, and sometimes gives uncertain results. Instead of the overall criterion we can employ in the optimization procedure some partial criteria, as SO₂ reduction rate, sensitivity to flow-rate changes, quantity and type of wastes, reliability of operation, control problems, consumption of energy and other materials.

The typical FGD methods were compared one to another on the basis of those criteria. The detailed comparison of the results are presented in the Table 1 for some very popular methods: dry limestone, dry-scrubbing with lime slurry and wet limestone.

It should be pointed out that the present number of industrial applications of particular method, when compared with the number of applications of another method, reflects in some way the total costs of the employment of FGD method. Thus, the most popular one, the wet limestone FGD method, should probably give the lowest costs of desulphurization.

General description of different schemes of wet limestone method was given in the paper (Fig. 3) together with the description of particular processes (for example oxidation of sulfite – Fig. 2) accompanying the gas cleaning. Typical operating problems concerning the technical application of the method were also shortly discussed.

The investigations of the wet limestone method in large-scale laboratory apparatus (Fig. 1) were carried out in the Institut of Chemical Engineering - Polish Academy of Sciences, Gliwice. The results (the examples are given in Fig. 4 and 5) brought the possibility of elaboration, design and realization of the FGD plant in technical scale [5]. Examination of the plant (the SO₂ removal efficiency, operating and capital costs and the reliability of operation) clearly shows that the elaborated variant of the wet limestone FGD method is competitive in comparison with the typical offer of the wet limestone FGD installation (see also [6]).