

Wiesław Zymon
Andrzej Bielski

ANALIZA MOŻLIWOŚCI STABILIZACJI AGRESYWNYCH WÓD POWIERZCHNIOWYCH

Woda uzdatniona nie powinna zawierać agresywnego dwutlenku węgla, jak również nie powinna wydzielać osadów w trakcie magazynowania i transportu w sieci wodociągowej. W przypadku wód o niskiej zasadowości szczególnie niebezpieczna jest zawartość agresywnego dwutlenku węgla, który może powodować przyspieszoną korozję betonu i stali.

Dwutlenek węgla powoduje korozję charakteryzującą się powstawaniem wżerów w metalu. Procesy korozyjne tego typu nie muszą objawiać się pojawieniem większych stężeń żelaza w wodzie, świadczących o zachodzeniu niekorzystnych zjawisk. Korozja taka w krótkim czasie może spowodować zniszczenie stalowych elementów sieci wodociągowej. Powstające w wyniku korozji perforacje powodują nadmierne straty wody w sieci. Należy zwrócić większą uwagę na agresywność wody, ponieważ skutki, które mogą pojawić się po okresie kilku lub kilkunastu lat pociągną za sobą bardzo wysokie nakłady na naprawę, jak również na wymianę elementów sieci wodociągowej.

Jedną z metod odkwaszania wody jest desorpcja rozpuszczonego dwutlenku węgla w wodzie do powietrza. Proces ten prowadzony jest na stacjach uzdatniania wody dla celów bytowo-gospodarczych oraz podczas jonitowej dekarbonizacji i demineralizacji wody.

Metoda desorpcji dwutlenku węgla może znaleźć zastosowanie również w układach, w których prowadzi się proces koagulacji. W ostatnim okresie zwraca się wiele uwagi na usuwanie związków wywołujących barwę wody, będących prekursorami powstawania chlorowcopochodnych w trakcie chlorowania wody [1]. Usuwanie barwy wody w koagulacji efektywniej przebiega przy niższych wartościach pH [2]. Stosowanie do odkwaszania wody wapna w trakcie koagulacji podwyższa odczyn, prowadząc tym samym do obniżenia efektu usuwania zanieczyszczeń.

W niniejszej pracy przeanalizowano możliwości zastosowania desorpcji CO₂ w urządzeniach kolumnowych z wymuszonym przepływem powietrza, zawierających wysoko sprawne wypełnienie.

Zastosowanie wysoko sprawnych wypełnień kolumn desorpcyjnych

W kraju od kilkunastu lat produkowane są pierścienie Białeckiego. W badaniach stwierdza się kilkakrotny wzrost efektywności procesu wymiany masy,

w porównaniu z pierścieniami Raschiga o tych samych wymiarach i parametrach prowadzonego procesu. Zastosowanie wysoko sprawnego wypełnienia umożliwi obniżenie kosztów prowadzonego procesu. Parametry pracy urządzenia można określić na podstawie równania [3]:

$$h = (\text{HTU}) \cdot N_c \quad (1)$$

gdzie:

- h — wysokość wypełnienia [m],
- (HTU) — wysokość jednostkowa przenikania masy [m],
- N_c — liczba jednostek przenikania masy,

$$(\text{HTU}) = \frac{L}{M\beta k_c a} \quad (2a)$$

- L — gęstość zraszania wodą [kg/m²h],
- M — masa molowa składnika desorbowanego [kg/kmol],
- β — przelicznik, β = γ_w/M (2b)
- γ_w — gęstość wody [kg/m³],
- k_c — współczynnik wnikania masy odniesiony do cieczy [m/h],
- a — powierzchnia właściwa wypełnienia [m²/m³].

Liczbę jednostek przenikania masy dla procesu desorpcji można określić równaniem:

$$N_c = \frac{\ln \left[\left(1 - \frac{L}{mG} \right) \left(\frac{mX_p - Y_p}{mX_k - Y_p} + \frac{L}{mG} \right) \right]}{1 - \frac{L}{mG}} \quad (3)$$

gdzie:

- m — współczynnik proporcjonalności wynikający z prawa Henry'ego,
- G — natężenie przepływu powietrza na pusty przekrój aparatu [kg/m²h],
- X_p — stężenie początkowe CO₂ w wodzie [kgCO₂/kgH₂O],
- X_k — żądane stężenie końcowe CO₂ w wodzie [kgCO₂/kgH₂O],
- Y_p — początkowe stężenie CO₂ w powietrzu [kgCO₂/kg pow.],

$$m = \frac{M_A H}{M_B p} \quad (4)$$

- M_A — masa molowa wody [kg/kmol],
- M_B — masa molowa powietrza [kg/kmol],
- H — stała Henry'ego zależna od temperatury [mH₂O],
- p — ciśnienie całkowite panujące w układzie [mH₂O].

Wartość współczynnika wnikania masy dla pierścieni Białeckiego o wymiarach $25 \times 25 \times 0,5$ mm można określić na podstawie korelacji [4]:

$$Sh = 0,00538 Re_c^{0,916} Sc_c^{0,5} \quad (5)$$

gdzie:

- $Sh = k_c \delta / D_c$ liczba Sherwooda,
 $Re_c = 4 L / a \eta_c$ liczba Reynoldsa,
 $Sc_c = \eta_c / D_c \rho_c$ liczba Schmidta,
 k_c — współczynnik wnikania masy [m/h],
 δ — wymiar zastępczy [m],
 D_c — współczynnik dyfuzji [m²/h],
 ρ_c — gęstość cieczy [kg/m³],

$$\delta = \frac{\eta_c}{g \rho_c} \quad (6)$$

- g — przyspieszenie ziemskie [m/h²],
 η_c — dynamiczna lepkość cieczy [kg/mh],
 a — powierzchnia właściwa wypełnienia [m²/m³],
 L — gęstość zraszania cieczą [kg/m²h].

Powyższe zależności pozwalają na zwymiarowanie kolumnowych desorberów i podanie parametrów ich pracy, przy założeniu początkowego stężenia dwutlenku węgla w wodzie i żadanego stężenia końcowego, temperatury wody oraz objętości zużywanego powietrza na jednostkową objętość wody.

W tabeli 1 przedstawiono obliczone wartości współczynników wnikania masy i współczynników objętościowych wnikania masy oraz wysokości jednostkowe wnikania masy dla desorpcji dwutlenku węgla z wody, przy trzech gęstościach zraszania i trzech temperaturach wody. Na podstawie tych obliczeń można stwierdzić silny wpływ temperatury wody na współczynniki charakteryzujące kinetykę wymiany masy.

Przeprowadzone obliczenia dla klasycznego wypełnienia, jakimi są pierścienie Raschiga o podobnych wymiarach do pierścieni Białeckiego wykazały, że jednostkowe wysokości wnikania masy są dla pierścieni Białeckiego około sześciokrotnie niższe niż dla pierścieni Raschiga.

Na podstawie wzoru (1) można stwierdzić, że przy danej wartości liczby jednostek przenikania masy, czyli żadanego stężenia początkowego, żadanego stężenia końcowego i zużycia powietrza na jednostkę objętości wody, wysokość kolumny wypełnionej

pierścieniami Białeckiego będzie około sześciokrotnie mniejsza od wysokości kolumny wypełnionej pierścieniami Raschiga. Wynika z powyższego, że objętości wypełnienia również zmniejszą się sześciokrotnie.

W celu określenia możliwości zastosowania wysoko efektywnych wypełnień do odkwaszania wody przeprowadzono obliczenia wartości liczby jednostek przenikania masy N_c w zależności od stosunku ilości powietrza do wody i temperatury. Założono zmienne stężenie początkowe dwutlenku węgla wynikające między innymi z prowadzenia procesu koagulacji wody środkami chemicznymi o kwaśnej hydrolizie.

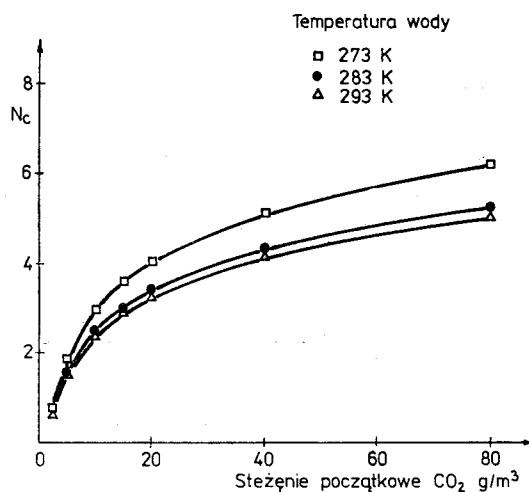
Żądane stężenie końcowe dwutlenku węgla w wodzie wynosiło 1,5 g CO₂/m³. Założono stosunek objętościowy powietrza do wody równy 5. Uzyskane wyniki przeprowadzonych obliczeń przedstawiono na rysunku 1. Na podstawie równania (1) określono konieczną wysokość wypełnienia dla najbardziej niekorzystnych warunków, tzn. dla temperatury 0°C. Wysokość ta wynosiła około 0,9 m dla przyjętego początkowego stężenia CO₂ w wodzie równego 20 g CO₂/m³. Całkowita wysokość, na którą należy podnieść wodę ze względu na doprowadzenie i odprowadzenie wody z urządzenia wyniesie około 1,8 m.

Istotnym zagadnieniem w procesie desorpcji są koszty eksploatacyjne. Na koszty prowadzonego procesu składa się koszt zużycia energii elektrycznej na podnoszenie wody oraz koszty energii na wymuszenie przepływu powietrza przez zraszane złożo. Szacunkowe zużycie energii elektrycznej netto na podniesienie 1000 m³ wody na wysokość 1 m wynosi 2,75 kWh. W przypadku konieczności powtórnego podnoszenia wody koszty wzrosną o sprawność układu pompowego.

Drugim elementem kosztów jest zużycie energii elektrycznej na tłoczenie powietrza przez zraszane złożo wypełnione pierścieniami Białeckiego. Opory przepływu powietrza na jednostkę wysokości wypełnienia, dla tego typu złoża można oszacować przy

Tabela 1
Wartości k_c , k_{ca} , (HTU) w zależności od gęstości zraszania wodą i temperatury wody dla pierścieni Białeckiego $25 \times 25 \times 0,5$ mm

Temp. wody K	Gęstość zraszania wodą, kg/m ² h								
	50 000			75 000			100 000		
	k_c m/h	k_{ca} 1/h	(HTU) m	k_c m/h	k_{ca} 1/h	(HTU) m	k_c m/h	k_{ca} 1/h	(HTU) m
273	1,03	233	0,21	1,50	338	0,22	1,95	440	0,22
283	1,72	387	0,13	2,50	563	0,13	3,27	736	0,13
293	2,66	599	0,08	3,86	870	0,08	5,03	1133	0,08



Rys. 1. Zależność liczby jednostek przenikania masy N_c od początkowego stężenia CO₂ w wodzie, dla różnych temperatur wody

założeniu, że opory te przy takich samych wymiarach wypełnienia i parametrach pracy są około dwa razy mniejsze niż dla pierścieni Raschiga [5].

W poniższym przykładzie określono jednostkowe opory przepływu przy żądanych parametrach dla pierścieni Raschiga [5], natomiast dla pierścieni Białeckiego zmniejszono wartość oporów dwukrotnie. Przykładowo, przy założeniu gęstości zraszania równej $100 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ oraz przyjęciu 5 objętości powietrza na jedną objętość wody, oszacowane jednostkowe opory przepływu wynoszą $6 \text{ mm H}_2\text{O}/\text{m}$. Zużycie energii elektrycznej na tłoczenie powietrza, przy założeniu sprawności wentylatora około 0,5 wynosi $0,16 \text{ kWh}$ na uzdatnienie 1000 m^3 wody przepływającej przez warstwę wypełnienia o wysokości 1 m. Koszty związane z tłoczeniem powietrza są bardzo małe w stosunku do kosztów związanych z podniesieniem wody. Zużycie energii elektrycznej na podniesienie 1000 m^3 wody na wysokość 1,8 m w rozpatrywanym przypadku wyniesie około $5,5 \text{ kWh}$.

Analiza porównawcza usuwania dwutlenku węgla

Pełna analiza porównawcza powinna być oparta o koszty budowy i koszty eksploatacji. W obecnym okresie przy gwałtownych zmianach cen jest to zagadnienie trudne do jednoznacznego określenia. Dlatego też przeprowadzono szacunkową analizę kosztów eksploatacyjnych usuwania agresywnego dwutlenku węgla.

Zastosowanie metody stabilizacji wody przy użyciu wapna w omawianym przykładzie wymagałoby dawki rzędu $10 \text{ g CaO}/\text{m}^3$. Szacunkowe koszty zużywanego energii elektrycznej w metodzie desorpcyjnej są porównywalne z kosztami zakupu wapna. Ponadto metoda wapienna posiada wiele niedogodności eksploatacyjnych, do których należą: składowanie oraz transport wewnątrz zakładu uzdatniania wody, transport mleka wapiennego oraz wody wapiennej w wyniku odkładania się osadów w rurociągach, konieczność precyzyjnego dawkowania w celu uniknięcia wydzielenia się osadu węglanu wapnia (np. na filtrach), obniżenie efektów koagulacji przy równoczesnej stabilizacji wody wapnem lub podwyższenie dawki koagulantu w celu utrzymania efektów koagulacji na zadanym poziomie na skutek alkaliczacji wody wapnem. Z tych względów rzadko prowadzi się stabilizację wody przy użyciu wapna, nawet gdy istnieją na terenie zakładu uzdatniania urządzenia przeznaczone do tego celu.

Zastosowanie metody desorpcyjnej na wysoko sprawnych wypełnieniach posiada wiele zalet, do których można zaliczyć m.in.: brak użycia środków chemicznych, łatwe sterowanie procesem przez zmianę natężenia przepływu powietrza przez złoże oraz możliwość skierowania części wody uzdatnionej na złoże, małe niebezpieczeństwo wydzielenia się osadów wapiennych przy niskich zasadowościach (w procesie desorpcji trudno jest uzyskać stężenia CO_2 w wodzie

bliskie równowagowym). Ponadto zastosowanie desorpcji gazowej po procesie koagulacji może spowodować zwiększenie jej efektywności, obniżenie koniecznych dawek koagulantu oraz umożliwić prowadzenie procesu przy optymalnym odczynie. Napowietrzanie wody może również obniżyć stężenie zanieczyszczeń lotnych obecnych w wodzie.

Parametry procesu desorpcji

Stosowanie procesu desorpcji powinno być poprzedzone dokładną analizą technologiczną pod kątem zawartości agresywnego dwutlenku węgla w wodzie oraz wymaganego jego stężenia końcowego. Na tej podstawie można określić konieczną wysokość złoża oraz powierzchnię przekroju kolumny. Ze względu na szybkie zalewanie kolumny i związany z tym szybki wzrost oporów przepływu powietrza, występuje ograniczenie w gęstości zraszania. Dla pierścieni Białeckiego o wymiarach $25 \times 25 \times 0,5 \text{ mm}$, maksymalne gęstości zraszania powinny wynosić ok. $125 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$, a wartości stosunku powietrza do wody nie powinny przekraczać 5. Parametry konstrukcyjne urządzenia i prowadzenia procesu można optymalizować z uwagi na koszty inwestycyjne i eksploatacyjne.

Wnioski

1. Zastosowanie pierścieni Białeckiego zamiast pierścieni Raschiga w urządzeniach kolumnowych do desorpcji dwutlenku węgla w projektowanych, jak również modernizowanych stacjach uzdatniania wody pozwoli na znaczne obniżenie kosztów budowy i eksploatacji.
2. Przeprowadzona analiza wykazała, że jest możliwa i ekonomicznie uzasadniona stabilizacja agresywnych wód powierzchniowych na wysoko sprawnych wypełnieniach na drodze desorpcji przy użyciu powietrza. Metoda stabilizacji agresywnych wód w procesie desorpcji na wysoko sprawnych wypełnieniach jest łatwa w eksploatacji oraz możliwe jest sterowanie tym procesem.

LITERATURA

1. A. L. KOWAL, J. MACKIEWICZ: Wpływ odczynu na niektóre procesy oczyszczania wody. *Gospodarka wodna*, nr 7, 1976.
2. S. BIŁOZOR: Badania nad obniżaniem zawartości trójhalemetanów w wodzie do picia. *Ochrona Środowiska*, nr 2—3 (24—25), 1985.
3. J. CIBOROWSKI: Inżynieria procesowa. WNT, Warszawa 1973.
4. A. KUBASIEWICZ: Nowe rozwiązania konstrukcyjne urządzeń do absorpcji. Najnowsze rozwiązania konstrukcyjne w budowie aparatury chemicznej 1969/70. WNT, Warszawa 1971.
5. T. HOBLER: Dyfuzyjny ruch masy i absorberzy. WNT, Warszawa 1976.

ANALYZING THE STABILIZATION POTENTIALITY FOR AGGRESSIVE SURFACE WATERS

In conventional technological systems aggressive carbon dioxide is removed by lime treatment. The application of lime to the coagulation process has the inherent disadvantage of increasing the pH of the solution and, consequently, abating the removal efficiency. To eliminate this drawback

a method is proposed for calculating the parameters of carbon dioxide desorption from water in packed columns. Technological calculations have shown that desorption columns with high-efficiency packings provide an economic stabilization of aggressive surface waters even at low alkalinity levels. The desorption process can be run at an arbitrary point of the technological system — both in new water treatment plants under design and in those under modernization.