

Urszula Olsińska

Wpływ konstrukcji komór kontaktowych na skuteczność ozonowania wody

Proces ozonowania wody prowadzony jest zazwyczaj w kolumnach lub komorach kontaktowych, w których gaz zawierający ozon wprowadzany jest za pomocą ceramicznych dyfuzorów i rozpraszany w fazie ciekłej w postaci drobnych pęcherzyków o średnicy 2-4 mm. Konwencjonalne komory kontaktowe wody z ozonem składają się z 2+6 szeregowo połączonych segmentów, napełnionych do wysokości 4-7 m. Poszczególne rozwiązania różnią się konstrukcją komór i konfiguracją przegród, wymuszających labiryntowy przepływ wody [1,2].

Ozonowanie wody jest procesem złożonym, którego efektywność zależy między innymi od warunków hydrodynamicznych wytworzonych w komorze kontaktowej. W teorii reaktorów wyróżnia się dwa zasadnicze ich rodzaje, tj. reaktory z przepływem tłokowym oraz reaktory z idealnym mieszanym. Komory kontaktowe stosowane w skali technicznej wykazują charakterystykę pośrednią, której znajomość jest bardzo ważna, ponieważ od rodzaju przepływu zależy rozkład rzeczywistego czasu przebywania elementów płynu w komorze reakcji, a więc i stopień konwersji zawartych w wodzie zanieczyszczeń oraz stopień inaktywacji mikroorganizmów [3]. Szczególną uwagę zwraca się na czas $T=t_{10}$, czyli czas, po którym 10% elementów płynu opuści reaktor. Czas ten jest nie tylko miarodajnym parametrem służącym do oceny warunków hydrodynamicznych panujących w komorze kontaktowej, ale stanowi również podstawę do wyznaczenia iloczynu $c \cdot T$ (c – stężenie rozpuszczonego w fazie ciekłej ozonu pozostałego), przyjętego przez Agencję Ochrony Środowiska Stanów Zjednoczonych (US EPA) jako kryterium kontroli skuteczności procesu dezynfekcji wody. W warunkach przepływu tłokowego wartość T jest zbliżona do teoretycznego czasu kontaktu (t_k), podczas gdy w reaktorze z idealnym mieszanym $T/t_k=0,1$.

Hydrodynamika przepływu dwufazowego przez komorę kontaktową w praktyce jest uzależniona głównie od jej konstrukcji i warunków eksploatacyjnych [4]. Spośród parametrów eksploatacyjnych decydujący wpływ mają objętościowe natężenie przepływu wody (Q_w), objętościowe natężenie przepływu gazu (Q_g) zawierającego ozon oraz wartość ich wzajemnego stosunku (Q_g/Q_w). W obecności gazu zmieniają się warunki hydrodynamiczne w komorze ze względu na wystąpienie wektora cyrkulacji cieczy, powodującego na ogół w miarę wzrostu Q_g , przy określonym natężeniu przepływu fazy ciekłej, zwiększenie intensywności mieszania, której miarą jest gradient prędkości (G). Prawidłowe wykorzystanie ozonu wymaga zachowania minimalnego gradientu prędkości na poziomie $G=50$ 1/s, przy czym wartość stosunku objętościowych natężeń przepływu Q_g/Q_w nie powinna być niższa

niż 5%, a obciążenie gazem powierzchni dna komory kontaktowej nie powinno być mniejsze niż $2,19 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ [5,6].

Mieszanie jest kluczowym parametrem projektowym dla systemów wykorzystujących ozon wytwarzany z tlenu, a wprowadzany do komory reakcji poprzez układ dyfuzorów. Wysokie stężenie ozonu w gazie wlotowym (8+15% wagowych), przy niskim zapotrzebowaniu na ozon i niedużym przepływie wody, może prowadzić do bardzo małych przepływów gazu, pogorszenia warunków mieszania i wystąpienia lokalnego gradientu stężeń substratów. Zmiana warunków hydraulicznych w komorach kontaktowych jest w pewnym zakresie możliwa, poprzez modyfikację konstrukcji, dobór odpowiedniej liczby segmentów, wprowadzenie przegród podwójnych w miejsce pojedynczych oraz wybór właściwej lokalizacji punktów wprowadzania gazu [1,7].

Ocena wpływu parametrów konstrukcyjnych na hydrodynamikę komór kontaktowych i skuteczność realizowanego w nich procesu utleniania bądź dezynfekcji była przedmiotem niniejszej pracy.

Metodyka badań

Badania przeprowadzono w modelu czterosegmentowej komory kontaktowej, w którym zapewniono możliwość doprowadzenia gazu do każdego segmentu. Połączone szeregowo segmenty oddzielono podwójnymi przegradami, przy czym po częściowym ich demontażu uzyskano układ z przegradami pojedynczymi. W kolejnych seriach badań zmieniono liczbę przegród od 0 do 3, uzyskując odpowiednio konfigurację jedno-, dwu- i czterosegmentowej komory kontaktowej. Całkowita pojemność komory wynosiła $0,259 \text{ m}^3$.

Badania wykonano dla trzech objętościowych natężeń przepływu wody, tj. $0,444 \text{ m}^3/\text{h}$, $0,777 \text{ m}^3/\text{h}$ i $1,036 \text{ m}^3/\text{h}$, osiągając czasy kontaktu odpowiednio równe 35 min, 20 min i 15 min. Pomiary powtórzone przy objętościowych natężeniach przepływu gazu $0,07 \text{ m}^3/\text{h}$ i $0,14 \text{ m}^3/\text{h}$. Wartości stosunku Q_g/Q_w mieściły się w granicach 7+18%. Gaz doprowadzono do trzech pierwszych segmentów modelu. Zakres badań rozszerzono o analizę wpływu miejsca wprowadzenia gazu na zmianę warunków hydraulicznych panujących w komorze. Zastosowano cztery warianty wprowadzenia gazu:

- całość gazu skierowano do I segmentu komory,
- strumień gazu rozdzielono proporcjonalnie pomiędzy I i II segment,
- strumień gazu rozdzielono proporcjonalnie pomiędzy I i III segment,
- strumień gazu rozdzielono równomiernie pomiędzy I, II i III segment.

Nie rozpatrywano konfiguracji z doprowadzeniem gazu do ostatniej komory, ze względu na znaczny wzrost stężenia ozonu resztkowego. Stopień wykorzystania ozonu nie przekraczał 70%.

Do opisu rodzaju przepływu w komorze zastosowano model kaskady zastępczej oraz model dyspersyjny. W celu wyznaczenia podstawowych parametrów hydraulicznych komór kontaktowych przeprowadzono badania znacznikowe dla fazy ciekłej, metodą impulsowego dawkowania znacznika [3,8,9]. Na podstawie znajomości rozkładu czasu przebywania wyznaczono średni rzeczywisty czas przebywania elementów płynu w komorze, czasy t_{10} i t_{50} , stopień kaskady zastępczej (N) i liczbę dyspersji $D_L/(uL)$ (D_L – współczynnik dyspersji wzdłużnej, u – średnia prędkość przepływu wody, L – długość drogi przepływu). Intensywność mieszania oceniono na podstawie wartości gradientu prędkości [10].

W tak określonym zakresie zmian warunków hydrodynamicznych w komorze kontaktowej wykonano badania technologiczne, których celem było ustalenie wpływu wymienionych parametrów hydraulicznych i wielopunktowego wprowadzania ozonu na stężenie ozonu pozostałego, efektywność wykorzystania ozonu, skuteczność dezynfekcji i utleniania.

Tę ostatnią oceniono na podstawie stężenia bromianów, powstających podczas ozonowania wód zawierających bromki. W celu wyeliminowania wpływu wahań stężenia bromków w wodzie poddawanej ozonowaniu na stężenie jonów BrO_3^- po procesie, we wszystkich wypadkach skorygowano ich zawartość, ustalając początkowe stężenie bromków na poziomie $0,500 \text{ gBr}^-/\text{m}^3$. Zachowano również stałą dawkę względną ozonu, tj. odniesioną do zawartości ogólnego węgla organicznego ($\text{O}_3:\text{OWO}=1:1$).

W badaniach hydraulicznych zastosowano powietrze, a w pozostałych mieszaninę tlenowo-ozonową, przygotowywaną za pomocą wytwornicy tlenu PSA typu As-12, połączonej szeregowo z generatorem ozonu EFFIZON® SWO 30/15 (Ozomatic GmbH, Germany).

Zawartość OWO w wodzie poddawanej ozonowaniu oznaczono za pomocą analizatora Pastel UV (Secomam) metodą spektroskopową. Analizę ilościową jonów Br^- i BrO_3^- przeprowadzono przy użyciu chromatografu jonowego DIONEX DX 500, sprzężonego z detektorem konduktometrycznym CD 20 [11]. Stężenie ozonu pozostałego w wodzie oznaczono metodą spektrofotometryczną ze wskaźnikiem indygo wg procedury 4500- O_3 (US EPA) przy długości fali $600 \pm 5 \text{ nm}$, natomiast stężenie ozonu resztkowego w gazie odprowadzanym z komory kontaktowej zmierzono metodą fotometryczną przy użyciu analizatora ozonu BMT 963 ($\lambda=254 \text{ nm}$) przystosowanego do pracy w układzie *on-line*.

Dyskusja wyników

Na podstawie wyników badań znacznikowych (tab.1–3) można stwierdzić, że w zaproponowanym zakresie zmian natężeń przepływu wody i gazu gradient prędkości był w każdym wypadku wyższy od wartości przyjmowanej za minimalną ($G \geq 58 \text{ l/s}$), a charakterystyka hydrodynamiczna modelu komory kontaktowej była prawidłowa. Wartości średniego rzeczywistego czasu przebywania (t) w przeważającej części testów były zbliżone do teoretycznego czasu kontaktu ($t/t_k \geq 0,90$). Na podstawie analizy rozkładu czasu przebywania, przebiegu zmian stosunku T/t i obserwacji wizualnych, również nie stwierdzono występowania obszarów stagnacji ani też zjawiska tunelowania. Wartość drugiego z analizowanych parametrów hydraulicznych, tj. stosunku T/t_k (gdzie T odpowiada czasowi t_{10} wyznaczonemu dla całej komory), w znacznej mierze uzależniona była od liczby i rodzaju zastosowanych przegród. Najniższe wartości T uzyskano dla komory jednosegmentowej. Zwiększenie liczby przegród umożliwiło osiągnięcie przepływu fazy ciekłej bardziej zbliżonego do przepływu tłokowego, zarówno w wypadku zastosowania przegród pojedynczych (tab.1), jak i podwójnych (tab.2). Wprowadzenie przegród podwójnych w miejsce pojedynczych doprowadziło do dalszego wzrostu udziału przepływu tłokowego.

Pewne zmiany w charakterystyce hydrodynamicznej komory kontaktowej zaobserwowano w wyniku zmiany miejsca wprowadzenia gazu. Wpływ lokalizacji dyfuzorów oraz stopnia rozdziału gazu pomiędzy poszczególne segmenty komory na dynamikę przepływu fazy ciekłej przedstawiono w tabeli 3. Podane wyniki dotyczą badań przeprowadzonych w modelu czterosegmentowej komory kontaktowej z podwójnymi przegradami. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że dla danego stosunku Q_G/Q_W najdłuższy czas T osiągnięto przy równomiernym rozdziale gazu pomiędzy pierwsze trzy segmenty. Wdrożenie pozostałych wariantów skutkowało skróceniem czasu T , co wiązało się z poprawą warunków mieszania obu faz. Zmiana lokalizacji i liczby punktów wprowadzenia gazu wpływała także na stężenie ozonu pozostałego w wodzie opuszczającej komorę kontaktową (tab.4).

Równomierny rozdział gazu do wszystkich segmentów był rozwiązaniem, w którym uzyskano nie tylko najdłuższy czas T , ale również największe stężenie rozpuszczonego w wodzie ozonu pozostałego (iloczyn $c \cdot T$ osiągnął najwyższe wartości). Można zatem przyjąć, że ten sposób wprowadzenia gazu był najkorzystniejszy do realizacji wstępnej dezynfekcji wody. W tym też wypadku zaobserwowano ograniczone powstawanie bromianów, aczkolwiek w układzie z proporcjonalnym rozdziałem gazu pomiędzy I i III segment komory kontaktowej ich stężenie w ozonowanej wodzie było niższe.

Tabela 1. Charakterystyka hydrauliczna modelu komory kontaktowej z pojedynczymi przegradami

Q_W m^3/h	Q_G m^3/h	Q_G/Q_W	t_k min	Liczba przegród/Liczba segmentów					
				0/1		1/2		3/4	
				t/t_k	T/t_k	t/t_k	T/t_k	t/t_k	T/t_k
0,444	0,00	0,00	35	0,99	0,25	0,98	0,36	0,99	0,44
0,444	0,07	0,16	35	0,96	0,30	0,97	0,38	0,97	0,45
0,444	0,14	0,32	35	0,95	0,27	0,97	0,33	0,98	0,42
0,777	0,00	0,00	20	0,96	0,28	0,98	0,32	0,98	0,43
0,777	0,07	0,09	20	0,94	0,33	0,99	0,40	0,97	0,49
0,777	0,14	0,18	20	0,93	0,29	0,98	0,36	0,95	0,44
1,036	0,00	0,00	15	0,95	0,39	0,99	0,33	0,99	0,41
1,036	0,07	0,07	15	0,94	0,43	0,99	0,43	1,00	0,50
1,036	0,14	0,13	15	0,99	0,41	0,98	0,40	0,98	0,47

Tabela 2. Charakterystyka hydrauliczna modelu komory kontaktowej z podwójnymi przegrodami

Q_W m^3/h	Q_G m^3/h	Q_G/Q_W	t_k min	Liczba przegród/Liczba segmentów					
				0/1		1/2		3/4	
				t/k	T/k	t/k	T/k	t/k	T/k
0,444	0,00	0,00	35	0,99	0,25	0,99	0,42	0,99	0,54
0,444	0,07	0,16	35	0,96	0,30	0,98	0,44	0,97	0,62
0,444	0,14	0,32	35	0,95	0,27	1,00	0,37	1,00	0,52
0,777	0,00	0,00	20	0,96	0,28	0,98	0,41	0,90	0,53
0,777	0,07	0,09	20	0,94	0,33	0,98	0,46	0,92	0,58
0,777	0,14	0,18	20	0,93	0,29	0,98	0,40	0,84	0,55
1,036	0,00	0,00	15	0,95	0,39	0,99	0,45	0,99	0,51
1,036	0,07	0,07	15	0,94	0,43	0,99	0,47	0,99	0,60
1,036	0,14	0,13	15	0,99	0,41	0,99	0,44	1,00	0,53

Ostatni z wymienionych schematów wprowadzania gazu można uznać za właściwe rozwiązanie techniczne (dla konstrukcji komór kontaktowych analogicznych do zastosowanej w badaniach), gdy celem jest ograniczenie powstawania niepożądanych w wodzie bromianów. Wzrost stężenia bromianów powstających w poszczególnych schematach wprowadzania gazu, przy stałej wartości Q_G/Q_W i stałej zawartości ozonu w gazie doprowadzanym do układu, wynikał ze zwiększenia dyspersji w reaktorze. Najkorzystniejsze warunki dla skutecznego i efektywnego utlenienia zanieczyszczeń stwarzał zatem wariant z wprowadzeniem całego strumienia gazu do I segmentu, gdzie intensywne mieszanie sprzyjało homogenizacji obu faz, poprawiło lokalny gradient stężeń substratów i podniosło sprawność rozpuszczania ozonu.

Wnioski

◆ Charakterystyka hydrodynamiczna tradycyjnych komór kontaktowych zależy w dużej mierze od jej konstrukcji. Zwiększenie liczby segmentów w komorze kontaktowej, przy określonym natężeniu przepływu wody i gazu, przyczyniło się

do wydłużenia czasu $T=t_{10}$, a więc do przesunięcia charakterystyki hydrodynamicznej od charakterystyki reaktora z mieszaniem w kierunku charakterystyki reaktora z przepływem tłokowym. Zastosowanie przegród podwójnych, w miejsce przegród pojedynczych, również doprowadziło do wzrostu udziału przepływu tłokowego w całkowitym przepływie fazy ciekłej.

◆ Równomierny rozdział gazu zawierającego ozon pomiędzy kolejne segmenty komory zapewnił osiągnięcie najwyższej wartości iloczynu $c \cdot T$. Rozwiązanie to jest preferowane do prowadzenia wstępnej dezynfekcji wody.

◆ Intensyfikację reakcji utleniania zanieczyszczeń zawartych w wodzie można osiągnąć poprzez zapewnienie odpowiednich warunków mieszania w komorze kontaktowej wody z ozonem.

Niniejsza praca, stanowiąca jeden z etapów badań nad wpływem parametrów hydraulicznych komór kontaktowych na powstawanie bromianów i THM w wyniku ozonowania wód zawierających bromki, została zrealizowana w ramach projektu badawczego nr 3 TO9C-106-14, sfinansowanego przez KBN w latach 1998–2000.

Tabela 3. Wpływ lokalizacji punktów wprowadzenia gazu na hydrodynamikę komory kontaktowej

Schemat	Q_W m^3/h	Q_G m^3/h	Q_G/Q_W	t_k min	t min	t/k	T min	T/k	G 1/s	N	D_t/uL		
–	0,444	0,00	0,00	35	34,8	0,99	18,8	0,54	–	7	0,083		
I, II, III					34,0	0,97	21,8	0,62	59	10	0,051		
I		0,07	0,16		35,0	1,00	19,5	0,56	58	8	0,066		
I, II					34,5	0,99	20,2	0,58	59	8	0,065		
I, III					34,0	0,97	20,8	0,59	59	9	0,053		
–					0,777	0,00	0,00	18,0	0,90	10,5	0,53	–	7
I, II, III	19,4	0,97	11,5	0,58				59	9	0,061			
I	0,07	0,09	19,3	0,97				11,1	0,56	59	8	0,070	
I, II			19,9	1,00				11,3	0,57	58	8	0,069	
I, III			19,8	0,99				11,5	0,58	58	9	0,062	
I, II, III			18,7	0,94				11,0	0,55	85	7	0,074	
I			0,14	0,18		18,4	0,92	9,7	0,49	86	5	0,112	
I, II						19,8	0,99	10,8	0,54	83	7	0,083	
I, III	18,7	0,94				11,2	0,56	85	8	0,064			
–	1,036	0,00				0,00	14,8	0,99	7,7	0,51	–	6	0,090
I, II, III							14,8	0,99	9,0	0,60	59	10	0,049
I							0,07	0,07	14,9	0,99	8,1	0,54	58
I, II			14,8	0,99	8,4				0,56	59	8	0,068	
I, III			14,9	0,99	8,8				0,59	58	9	0,050	
I, II, III			14,6	0,97	7,9				0,53	96	6	0,086	
I		0,14	0,13	13,8	0,92	7,5			0,50	99	6	0,091	
I, II				14,2	0,95	7,6			0,51	98	6	0,095	
I, III				14,8	0,99	7,8	0,52	96	6	0,086			

Tabela 4. Wpływ lokalizacji punktów wprowadzenia gazu na przebieg ozonowania wody

Schemat	Q_G m ³ /h	Q_W m ³ /h	t_{10} min	$c_{O_3}^o$ gO ₃ /m ³	$c_{O_3}^r$ gO ₃ /m ³	$c_{O_3}^{P=C}$ gO ₃ /m ³	R^a	$c \cdot T$ g·min/m ³	BrO ₃ ⁻ mg/m ³	α
I, II, III	0,07	0,444	21,8	5,55	0,56	0,33	0,90	7,12	18,2	0,023
I			19,5	5,55	0,90	0,11	0,84	2,15	43,5	0,054
I, II			20,2	5,55	0,46	0,28	0,92	5,66	31,2	0,039
I, III			20,8	5,55	0,52	0,30	0,91	6,24	11,5	0,014
I, II, III	0,07	0,777	11,5	8,55	1,89	0,81	0,78	9,31	14,4	0,018
I			11,1	8,55	2,30	0,67	0,73	7,44	19,2	0,024
I, II			11,3	8,55	0,31	0,78	0,96	8,81	21,5	0,027
I, III			11,5	8,55	0,45	0,80	0,95	9,20	9,5	0,012
I, II, III	0,14	0,777	11,0	6,10	0,86	0,28	0,86	3,08	9,8	0,012
I			9,7	6,07	1,10	0,10	0,82	0,97	39,9	0,050
I, II			10,8	6,05	0,71	0,17	0,88	1,84	27,6	0,034
I, III			11,2	6,03	0,61	0,21	0,90	2,35	5,0	0,006
I, II, III	0,07	1,036	9,0	16,2	1,96	0,94	0,88	8,46	8,3	0,010
I			8,1	16,2	2,35	0,62	0,85	5,02	17,4	0,022
I, II			8,4	16,2	1,40	0,80	0,91	6,72	10,3	0,013
I, III			8,6	16,2	1,25	0,86	0,92	7,57	3,5	0,004
I, II, III	0,14	1,036	7,9	12,4	2,67	1,38	0,78	10,90	26,8	0,033
I			7,5	12,2	2,14	0,24	0,82	1,80	33,5	0,042
I, II			7,6	12,4	2,29	0,65	0,82	4,94	39,4	0,049
I, III			7,8	12,0	2,16	1,07	0,82	8,35	26,2	0,032

$$R^a = (c_{O_3}^o - c_{O_3}^r) / c_{O_3}^o$$

α – stopień konwersji $Br^- \rightarrow BrO_3^-$

$c_{O_3}^o$ – stężenie ozonu w gazie doprowadzonym do komory kontaktowej

$c_{O_3}^r$ – stężenie ozonu resztkowego

$c_{O_3}^c$ – stężenie ozonu pozostałego

LITERATURA

- Cooperative research: Ozone in Water Treatment. Application and Engineering. Lewis Publishers, Chelsea 1991.
- A. BIŃ: Nowe tendencje w zakresie urządzeń do wprowadzania ozonu do fazy ciekłej. Informacja INSTAL, 2000, nr 5, ss. 3–8.
- O. LEVENSPIEL: Chemical Reaction Engineering. J. Wiley & Sons, New York 1999.
- U. OLSIŃSKA, K. KUŚ: Znaczenie hydrodynamiki komór reakcji w procesie ozonowania wody. Ochrona Środowiska, 2001, nr 2(81), ss. 15–20.
- C. R. SCHULTZ, W. BELLAMY: The role of mixing in ozone dissolution systems. Proc. of 14th Ozone World Congress, IOA, Dearborn 1999, pp. 575–595.
- C. R. SCHULTZ, P. W. PRENDIVILLE: Designing high concentration ozone contactors for drinking water treatment plants. Ozone Science & Engineering, 1993, Vol. 15, No. 4, pp. 245–266.
- E. ILLER: Badanie znacznikowe w inżynierii procesowej. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1992.
- J. SZARAWARA, J. SKRZYPEK, A. GAWDZIK: Podstawy inżynierii reaktorów chemicznych. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1991.
- T. R. CAMP, P. C. STEIN: Velocity gradients and internal work in fluid motion. Journal Boston Soc. Civ. Eng., 1943, Vol. 30, p. 209.
- Z. DO-QUANG, C. C. RAMIREZ, M. ROUSTAN: Influence of geometrical characteristics and operating conditions on the effectiveness of ozone contacting in fine-bubbles conventional diffusion reactors. Ozone Science & Engineering, 2000, Vol. 22, No. 4, pp. 369–378.
- U. OLSIŃSKA, A. OLSIŃSKI: Oznaczanie jonów bromianowych i bromkowych w wodzie metodą chromatografii jonowej. Archiwum Ochrony Środowiska, 2001, nr 3, ss. 85–97.

Influence of Contactor Configuration on the Efficiency of the Ozonation Process

The objective of the study was to relate the hydrodynamic performance of the multistage ozone contactor to some of the major geometrical parameters (e.g., the number and type of baffles), and the efficiency of oxidation and disinfection to the location of the diffusers. Experiments were carried out with a model of a 0.259 m³ volume four-stage ozone contactor. The application of single or double baffles allowed the contactor to act as a one-, two- or four-compartment model. When use was

made of double baffles, the hydraulic behaviour of the contactor shifted towards that of a plug-flow reactor. Total and partial aeration was tested in the four-stage ozone contactor. Total gas flow was either sent to the first compartment or was distributed into all or some of the diffusion chambers. The study evidenced a strong influence of the investigated parameters not only on the hydrodynamics of the contactor, but also on the efficiency of ozone transfer and effectiveness of oxidation/disinfection.