

Krzysztof Wilmański

## Symulacja pracy filtrów węglowych z uwzględnieniem sezonowych zmian ich aktywności biologicznej

Firma AQUACOMP od wielu lat zajmuje się badaniami technologicznymi prowadzonymi dla potrzeb modernizacji lub budowy zakładów wodociągowych. Szczególnie dużo prac wykonano dla potrzeb Górnośląskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów, które jako jedno z niewielu w Polsce bardzo skutecznie realizuje program poprawy jakości wody pitnej w swoim regionie. Prace badawcze prowadzone są w skali pilotowej na dwóch stacjach modelowych – w Imielinie (dla potrzeb wodociągu "Dzieńkowice") i w Goczałkowicach (dla potrzeb wodociągu "Goczałkowice"). Badania obejmowały między innymi prace nad zastosowaniem węgla aktywnego do uzdatniania wody. Technika stosowania filtrów węglowych do uzdatniania wody nie jest jeszcze zadowalającą znaną w kraju. Brak przede wszystkim doświadczeń ze stosowania tego typu filtrów w pełnej skali technicznej. Jednym z podstawowych kryteriów oceny opłacalności stosowania filtru węglowego w danych warunkach jest czas jego eksploatacji pomiędzy kolejnymi regeneracjami węgla. Czas ten zależy od właściwości adsorpcyjnych węgla, rodzaju i stężenia występujących w wodzie zanieczyszczeń oraz parametrów operacyjnych procesu (czas kontaktu wody z węglem). W ostatnim czasie dużą uwagę przywiązuje się również do zwiększenia efektywności pracy filtrów węglowych poprzez wytworzenie wysokiej aktywności biologicznej złoża węglowego. Dzięki temu możliwa jest biodegradacja części zanieczyszczeń organicznych w oczyszczanej wodzie. Proces ten może przynieść w efekcie znaczne wydłużenie czasu eksploatacji filtru i przez to obniżyć koszty uzdatniania wody.

Procesy mikrobiologiczne zachodzące w złożu węgla aktywnego zależą od wielu czynników, do których należą:

- ilość i jakość rozkładalnych biologicznie zanieczyszczeń organicznych obecnych w wodzie lub zaadsorbowanych wcześniej na węglu aktywnym,
- obecność substancji biogenych (azot, fosfor),
- ilość tlenu rozpuszczonego w wodzie,
- obecność substancji toksycznych (metale ciężkie, pestycydy, chlor itp.),
- temperatura wody.

Aktywność mikrobiologiczna jest najwyższa, kiedy warunki panujące w filtrze węglowym są najbardziej korzystne. Zmiana temperatury wody w ciągu roku może w wielu przypadkach znacząco wpłynąć na przebieg procesów mikrobiologicznych w złożu filtru węglowego. Wieloletnie doświadczenia uzyskane w trakcie badań prowadzonych na stacjach modelowych przynio-

sły wiele istotnych spostrzeżeń odnośnie wpływu biologicznej aktywności złoża węgla aktywnego na uzyskiwane efekty oczyszczania wody. Stwierdzono między innymi występowanie wyraźnego wpływu temperatury wody na stopień usuwania zanieczyszczeń organicznych w filtrach węglowych (rys.2).

W okresach letnich, kiedy temperatura wody jest wysoka (w warunkach krajowych osiąga ona wartość 20+25 °C) stwierdzono, że efektywność obniżenia absorpcji w UV (254 nm) lub utlenialności może zwiększyć się nawet o 100 %. Jest to wynikiem wzmożonej aktywności mikroorganizmów występujących w złożu węgla aktywnego w tych warunkach. Zjawisko to może mieć bardzo istotny wpływ na ocenę czasu pracy filtrów węglowych pomiędzy regeneracjami węgla. Dlatego celowe jest uwzględnienie efektów sezonowości pracy filtru węglowego przy modelowaniu procesu oczyszczania wody na tych filtrach. W tym celu opracowano prosty model matematyczny o charakterze empirycznym dla opisu pracy filtrów węglowych, uwzględniający wpływ aktywności biologicznej (temperatury) na efekty oczyszczania wody.

### Opis modelu matematycznego

W ostatnich latach opracowano bardzo wiele modeli matematycznych opisujących pracę filtrów węglowych stosowanych do usuwania zanieczyszczeń organicznych z roztworów wodnych [1]. Jednakże istnieje bardzo niewiele modeli uwzględniających aktywność biologiczną w złożu węgla aktywnego [2]. Modele takie były głównie tworzone i weryfikowane do opisu procesu oczyszczania ścieków [3]. W przypadku procesów uzdatniania wody modele te wykazują jednak niewielką przydatność ze względu na duży stopień złożoności i komplikacji układów adsorpcyjnych w tych warunkach. Zarówno rodzaj jak i stężenie związków organicznych występujących w wodzie surowej ulega ciągłej zmianie, której zakres jest trudny do przewidzenia. Ponadto na procesy zachodzące w złożach węglowych duży wpływ ma obecność niektórych substancji nieorganicznych oraz temperatura wody.

Z tych powodów proponowany model matematyczny ma charakter empiryczny, czyli uwzględniający parametry nie mające bezpośredniego znaczenia fizykochemicznego. Model ten ma postać następującego równania:

$$C/C_0 = K_1/[1+K_2 \cdot \exp(-K_3 \cdot t)+K_4 \cdot T]$$

gdzie:

$K_1+K_4$  - parametry empiryczne,

$C$  - absorpcja w UV na odpływie z filtru węglowego, 1/m,

$C_0$  – absorbancja w UV na dopływie do filtru węglowego, 1/m,  
 $t$  – czas pracy filtru węglowego, tyg.,

$T$  – temperatura wody w filtrze węglowym, °C.

Prezentowany model przedstawia równanie z dwiema zmiennymi niezależnymi, którymi są czas pracy i temperatura wody. Parametry  $K_1+K_4$  mają co prawda charakter empiryczny, lecz można określić ich rolę w prezentowanym modelu. Współczynnik  $K_1$  stanowi wielkość korygującą wartość stężenia względnego  $C/C_0$ , jaka zostałaby osiągnięta po nieskończonej długim czasie eksploatacji filtru węglowego. Współczynniki  $K_2$  i  $K_3$  reprezentują wielkości wskazujące na pojemność adsorpcyjną węgla i szybkość adsorpcji. Ich wielkości zależą ponadto od stężenia adsorbentu w dopływie do filtru węglowego oraz parametrów operacyjnych pracy filtru. Współczynnik  $K_4$  określa wpływ temperatury wody na efektywność oczyszczania wody w filtrze węglowym, czyli pośrednio wskazuje na aktywność mikrobiologiczną w złożu.

Opisywany model był weryfikowany w badaniach pilotowych wykonanych dla kilkudziesięciu różnych układów technologicznych obejmujących różne wody surowe (powierzchniowe i gruntowe), różne procesy wstępnego uzdatniania oraz różne węgle aktywne [4]. Parametry modelu wyznaczone były metodą regresji nieliniowej, opartej na kryterium minimum sumy kwadratów różnic pomiędzy zmierzonymi i obliczonymi wartościami stężenia względnego ( $C/C_0$ ).

## Wyniki badań

W niniejszym opracowaniu skupiono uwagę na wybranych pracach badawczych wykonanych dla potrzeb okręgu Górnośląskiego. Przeanalizowano dziesięć cykli badawczych: siedem prowadzonych na stacji modelowej w Imielinie (IM1+IM7) i trzy na stacji modelowej w Goczałkowicach (GC1+GC3). W badaniach prowadzonych na stacji w Imielinie woda surowa pochodziła ze zbiornika retencyjnego "Dzieńkowice", który jest zasilany wodą z Soły. W badaniach prowadzonych na stacji w Goczałkowicach woda surowa pochodziła głównie ze zbiornika "Goczałkowice". Opis parametrów technologicznych oraz procesów wstępnego uzdatniania wody przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry operacyjne filtrów węglowych i procesów wstępnego uzdatniania wody dla poszczególnych cykli badawczych ( $v_f=8$  m/h,  $h_{z1}=2$  m)

Cykl badawczy – węgiel aktywny	Procesy wstępnego uzdatniania wody
IM1 – A	koagulacja kontaktowa filtracja
IM2 – A	
IM3 – B	
IM4 – C	
IM5 – D	
IM6 – F	
IM7 – F	
GC1 – B	ozonowanie, koagulacja, filtracja, ozonowanie
GC2 – C	
GC3 – E	

Ponieważ stosowane w badaniach węgle aktywne były w większości sorbentami komercyjnymi, dlatego też zostały one oznaczone symbolami A+F aby niniejszy artykuł nie mógł być wykorzystywany do prowadzenia kampanii promocyjnej przez firmę produkującą węgle. We wszystkich cyklach badawczych czas kontaktu wody i węgla aktywnego był jednakowy i wynosił 15 minut. Czas ten powinien być w większości przypadków wy-

starczający do uzyskania istotnych efektów mikrobiologicznych w złożu węgla aktywnego. W sześciu cyklach badawczych w ramach wstępnego uzdatniania wody stosowano proces ozonowania. Proces ten sprzyja rozwojowi biologicznej aktywności w filtrach węglowych, ponieważ związki organiczne występujące w wodzie po utlenieniu ozonem stają się łatwiej przyswajalne przez bakterie. Cykle badań prowadzonych na stacji w Imielinie, w których prowadzono wstępnie koagulację kontaktową lub ozonowanie, określono jako procesy z pełnym uzdatnianiem wstępnym, a pozostałe jako procesy z uproszczonym uzdatnianiem wstępnym.

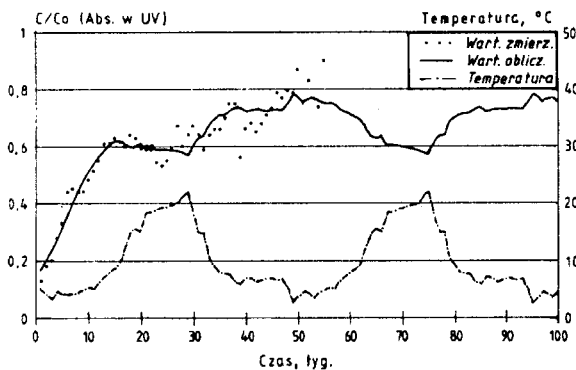
Tabela 2. Wartości stopni adsorpcji oraz współczynników modelu aproksymowane dla poszczególnych cykli badawczych

Cykl badań	$C_0^r$ 1/m	$Q_e(C_0)$ dm <sup>3</sup> /g·m	Współczynniki modelu			
			$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$
IM1	4,88	350	0,87	2,53	0,16	0,017
IM2	5,44	440	0,90	3,16	0,08	0,018
IM3	3,89	655	0,82	4,77	0,22	0,020
IM4	4,88	450	0,88	3,30	0,15	0,023
IM5	3,09	240	0,83	1,40	0,09	0,011
IM6	3,91	550	0,89	6,36	0,11	0,032
IM7	5,13	700	0,83	10,63	0,20	0,017
GC1	3,15	130	1,47	1,87	0,013	0,006
GC2	3,08	180	1,49	2,94	0,02	0,008
GC3	2,93	260	0,69	11,35	0,12	0,005

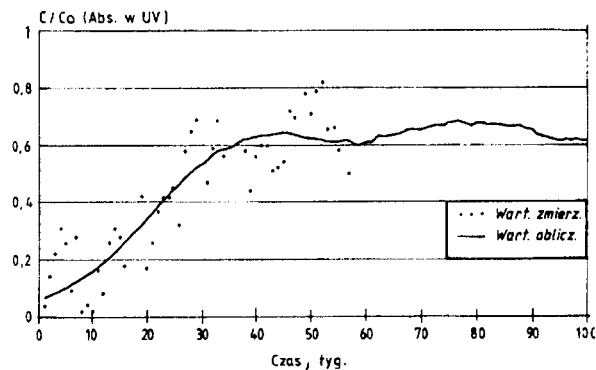
W tabeli 2 przedstawiono średnie wartości absorbancji w UV dla wody zasilającej filtry węglowe oraz obliczone dla tego stężenia wielkości równowagowego stopnia adsorpcji ( $Q_e(C_0)$ ) na podstawie równań izotermi Freundlicha wyznaczonych dla badanych układów. Przedstawione w tabeli 2 wartości absorbancji w UV w dopływie do filtrów węglowych odpowiadają poziomowi ogólnego węgla organicznego w granicach 2+5 gC/m<sup>3</sup>. Wielkości równowagowego stopnia adsorpcji ( $Q_e(C_0)$ ) wskazują na pojemność adsorpcyjną użytych węgla aktywnych w stosunku do zanieczyszczeń organicznych badanych wód. Przedstawione w tabeli 2 wyniki wskazują, że w stosunku do zanieczyszczeń organicznych wody badanej na stacji w Imielinie najwyższą pojemność adsorpcyjną wykazuje węgiel "C", a najniższą węgiel "D". Wyniki uzyskane w badaniach filtrów węglowych wykazują w przybliżeniu zgodność z danymi uzyskanymi z izoterm adsorpcji. W tabeli 2 przedstawiono również wartości parametrów modelu matematycznego, wyznaczone dla poszczególnych cykli badawczych.

Na rysunkach 1+5 przedstawiono wyniki obniżania absorbancji w UV uzyskane dla 5 wybranych cykli badań filtrów węglowych oraz krzywe obliczone w oparciu o proponowany model i wyznaczone wartości współczynników. Obliczone z modelu krzywe ekstrapolowano poza zakres wykonanych do chwili obecnej pomiarów doświadczalnych przy założeniu, że temperatura wody będzie miała w przyszłości taki sam przebieg jak w czasie badań.

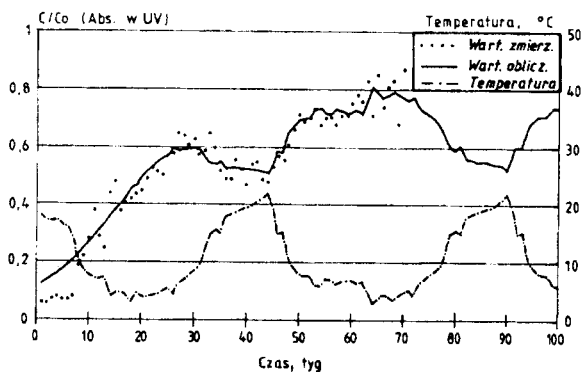
Uzyskane wyniki wskazują, że bardziej wrażliwy na temperaturę jest proces oczyszczania wody na stacji w Imielinie niż w Goczałkowicach. Jest to również widoczne w postaci niższych wartości współczynnika  $K_4$  dla badań prowadzonych w Goczałkowicach, w stosunku do badań w Imielinie. Świadczy to o obecności w wodzie surowej badanej na stacji w Imielinie znacznych ilości substancji rozkładalnych biologicznie. Ponadto woda surowa w Imielinie zawierała większe stężenia związków organicznych niż woda w Goczałkowicach, co mogłoby sugerować, że dla wytworzenia korzystnych warunków rozwoju mikrobiologicznego w filtrze węglowym potrzebna jest pewna niezbędna ilość substancji organicznych doprowadzanych z wodą surową.



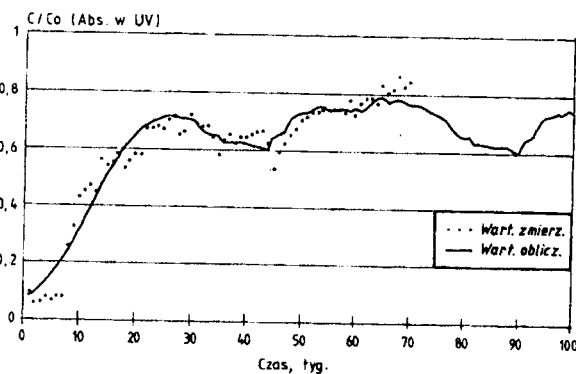
Rys. 1. Przebieg zmian absorpcji w UV i temperatury wody dla filtru z węglem aktywnym "B" (Imielin, pełne uzdatnienie wstępne)



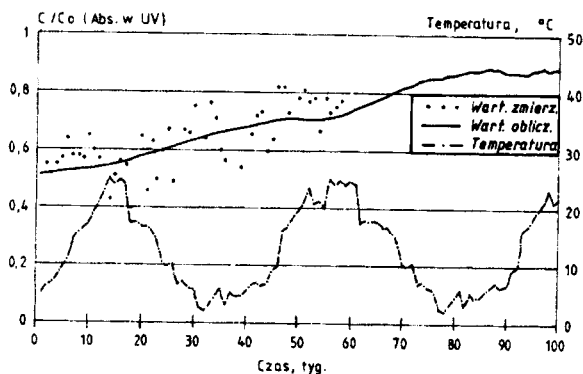
Rys. 5. Przebieg zmian absorpcji w UV dla filtru z węglem aktywnym "E" (Goczałkowice)



Rys. 2. Przebieg zmian absorpcji w UV i temperatury wody dla filtru z węglem aktywnym "F" (Imielin, pełne uzdatnienie wstępne)



Rys. 3. Przebieg zmian absorpcji w UV dla filtru z węglem aktywnym "F" (Imielin, uproszczone uzdatnienie wstępne)



Rys. 4. Przebieg zmian absorpcji w UV i temperatury wody dla filtru z węglem aktywnym "B" (Goczałkowice)

Różne węgle aktywne stosowane do oczyszczania tej samej wody wykazują również znaczne zróżnicowanie pod względem wpływu temperatury na efektywność oczyszczania wody. Przykładowo filtr z węglem "B" pracujący na stacji w Imielinie (rys.1) wykazuje mniejszy zakres fluktuacji efektywności obniżenia absorpcji w UV w porównaniu z węglem "F" (rys.2). Świadczy to o istnieniu bardziej ustabilizowanego poziomu aktywności biologicznej w filtrze z węglem "B" przez cały rok. W przypadku badań prowadzonych na stacji w Goczałkowicach filtr z węglem "B" wykazywał tendencję do szybkiego wyczerpania (rys.4), co świadczyłoby o niskim poziomie aktywności biologicznej istniejącej w tym złożu. Węgiel "E" badany na stacji w Goczałkowicach (pod względem właściwości zbliżony do węgla "F") wykazywał znacznie lepsze efekty oczyszczania wody od węgla "B" (rys.5). Pod względem zdolności adsorpcyjnych najlepsze właściwości w badaniach na stacji w Imielinie wykazał węgiel "F". Świadczą o tym wysokie wartości parametrów  $K_2$  i  $K_3$  wyznaczone dla tego węgla. Stosunkowo niska wartość parametru  $K_4$  może świadczyć o niższej niż w innych filtrach aktywności biologicznej.

Przy uproszczonym sposobie uzdatniania wstępnej wody filtry węglowe zasilane były wodą zawierającą wyższe ilości substancji organicznych. W takich warunkach można się spodziewać szybszego wyczerpania filtrów węglowych. Jednakże wyniki uzyskane na stacji modelowej w Imielinie wskazują, że przy odpowiednio wysokiej aktywności biologicznej, istniejącej w złożu węgla aktywnego, możliwe jest długotrwałe eksploataowanie filtrów w obu przypadkach. Wyższe stężenie związków organicznych w wodzie zasilającej filtry węglowe daje w rezultacie wyższą wartość współczynnika  $K_2$ . Wartość tego współczynnika jest również proporcjonalna do wartości równowagowego stopnia adsorpcji  $Q_e(C_0)$ , odpowiadającego stężeniu wlotowemu do filtru węglowego. Potwierdza to założenie, że współczynnik  $K_2$  reprezentuje pojemność adsorpcyjną węgla aktywnego. Zależność pomiędzy  $K_2$  i  $Q_e(C_0)$  może być wykorzystana do przewidywania wartości współczynnika  $K_2$  w celu uproszczenia procedury wyznaczania parametrów proponowanego modelu matematycznego.

W przypadku badań prowadzonych na stacji w Goczałkowicach najlepsze wyniki uzyskano dla filtru z węglem "E", jednakże przypuszczalnie wysoka efektywność usuwania zanieczyszczeń organicznych w tym filtrze związana była głównie z dużą pojemnością adsorpcyjną tego węgla, a w mniejszym stopniu z biologiczną aktywnością złoża. Świadczą o tym między innymi wartości wyznaczonych współczynników (wysokie wartości  $K_2$  i  $K_3$  oraz niska wartość  $K_4$ ).

## Podsumowanie

Opis przebiegu obniżania absorbancji w UV dla wody uzdatnionej na filtrach węglowych przy użyciu proponowanego modelu jest zadowalający, o czym świadczą wyniki przedstawione na wykresach. Może być on więc wykorzystany do interpretacji wyników badań efektywności pracy filtrów węglowych oraz przewidywania efektów oczyszczania wody.

Przedstawione wyniki badań doświadczalnych obejmują okres do czerwca br. Oczekuje się, że wyniki dalszych badań w okresie lata 1993 przyniosą potwierdzenie prawidłowości przewidywań odnośnie efektywności pracy filtrów węglowych, jakie zostały dokonane przy użyciu zaprezentowanego modelu matematycznego.

## LITERATURA

1. W. C. van LIER: Mass transfer to activated carbon in aqueous solutions. PhD-thesis, Delft University of Technology, Delft 1989.
2. G. E. SPEITEL Jr. et.al.: Mathematical modeling of bioregeneration in GAC columns. Journal of Env. Engng., 1987, Vol. 113, No. 1, pp. 32:48.
3. SUNG-HYUN KIM, M.P IRBAZARI: Bioactive adsorber model for industrial wastewater treatment. Journal of Env. Engng., 1989, Vol. 115, No. 6, pp. 1235:1256.
4. J. SZUMIELEWICZ, K. WILMAŃSKI: Zastosowanie węgla aktywnego w wodociągach. IMGW, Warszawa 1991 (praca nie publikowana).

---

### SIMULATION OF ACTIVATED CARBON FILTER PERFORMANCE BY INCLUDING SEASONAL VARIATIONS IN BIOLOGICAL ACTIVITY

*Many years' investigations on the use of activated carbon in water treatment have revealed a seasonal pattern in the performance of activated carbon beds. Thus, the efficiency of organic matter (UV absorbance, TOC or COD) removal increased in the summer season and decreased in the winter season (with the rise and drop in water temperature, respectively). To simulate the performance of the activated carbon bed an empirical mathematical model incorporating the seasonal behaviour pattern was developed. The model was verified by experiments which involved a varie-*

*ty of water samples, pretreatment processes and activated carbons. The agreement between calculated and measured results is satisfactory. Attempts were made to establish simple relationships between model parameters and removal efficiency. It was found that the measured results might be interpreted in terms of estimated model parameter values. Moreover, it was possible to extrapolated the carbon filter efficiency beyond the range of measured results, thus shortening the duration of expensive experiments.*