

Władysław WALCZAK, Władysław CZYŻAK

Politechnika Łódzka

ZASTOSOWANIE METODY REZYSTANCYJNEJ DO POMIARU STOPNIA  
NAPOWIETRZENIA CIECZY PRZEMYSŁOWYCH

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono koncepcję zastosowania metody rezystancyjnej do pomiaru stopnia napowietrzenia cieczy przemysłowych. Omówiono także podstawy teoretyczne oraz zasadę działania specjalnej sondy i układu pomiarowego. Przedstawiono również wyniki badań wstępnych.

1. Wstęp

Jednym z etapów procesu technologicznego oczyszczania i odnowy wody w stacjach oczyszczania ścieków przemysłowych i komunalnych jest tzw. proces aeracji głębokiej. Polega on na tłoczeniu powietrza przez specjalne dyfuzory, umieszczone na dnie zbiornika, do objętości wody podlegającej oczyszczaniu. Powietrze w postaci pęcherzyków, unoszących się swobodnie ku górze w całej objętości wody, tworzy układ dwufazowy ciecz-gaz, którego struktura określona jest jako "bełkotka". Podstawowym parametrem technicznym wspomnianego procesu technologicznego jest współczynnik stopnia napowietrzenia mieszaniny dwufazowej: ciecz-gaz, określający średnią, procentową zawartość powietrza w jednostce objętości tej mieszaniny. W pracy przedstawiono zastosowanie rezystancyjnej metody pomiaru procentowej zawartości powietrza w oczyszczanej wodzie, w procesie aeracji głębokiej, w stacjach oczyszczania i odnowy wody.

Istnieje wiele przemysłowych procesów technologicznych, w których występuje zjawisko "bełkotki". W procesach tych elementy układu dwufazowego, tj. gazu i cieczy mogą być różne. Jeżeli jednak parametry elektryczne zastosowanej cieczy będą porównywalne z parametrami wody, zanieczyszczonej ściekami przemysłowymi i komunalnymi, tj. przewodność elektryczna cieczy będzie porównywalna lub większa od przewodności zanieczyszczonej wody, to omówiona metoda rezystancyjna może mieć również zastosowanie do pomiaru procentowej zawartości gazu w takiej mieszaninie dwufazowej. Metoda rezystancyjna może więc mieć zastosowanie w przypadku dowolnej cieczy przewodzącej prąd elektryczny i będącej składnikiem mieszaniny dwufazowej: ciecz-gaz.

## 2. Zasada pomiaru.

Zastosowanie metody rezystancyjnej do pomiaru procentowej zawartości gazu w mieszaninie dwufazowej ciecz-gaz przedstawione zostanie na przykładzie pomiaru stopnia napowietrzenia wody w stacjach oczyszczania i odnowy wody. Koncepcja zastosowania tej metody we wspomnianych pomiarach oparta jest na wykorzystaniu własności elektrycznych hipotetycznego prostopadłościanu pomiarowego /rys. 1/ zawierającego w swej objętości mieszaninę wody i powietrza. Rozpatruje się przy tym tylko tę część powietrza, która unosi się w wodzie w postaci pęcherzyków. Nie uwzględnia się natomiast powietrza rozpuszczonego w wodzie.

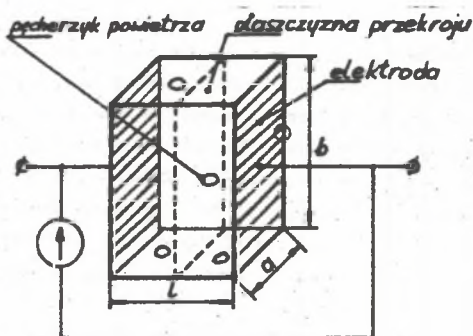
Stopień napowietrzenia  $K$  wody zdefiniowany jest wyrażeniem:

$$K = \frac{V_p}{V} \cdot 100\% \quad (1)$$

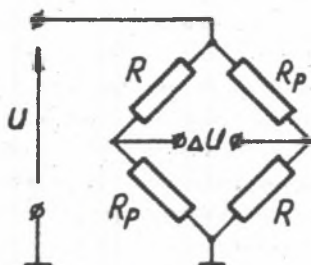
gdzie:

$$V = l \cdot a \cdot b = l \cdot s$$

jest objętością rozpatrywanej mieszaniny wody i powietrza, zaś  $V_p$  - sumą objętości wszystkich pęcherzy powietrza, znajdujących się w objętości  $V$ .



Rys.1. Hipotetyczny prostopadłościan pomiarowy.



Rys.2. Schemat elektryczny mostka pomiarowego.

Jeżeli zakreskowane ściany prostopadłościanu /rys. 1/ będą elektrodami metalowymi, a objętość  $V$  prostopadłościanu będzie wypełniona wodą o niezerowej przewodności, to w przypadku przyłożenia napięcia do elektrody przez prostopadłościan popłynie prąd elektryczny. Prostopadłościan będzie zachowywał się wówczas jak opornik o oporności określonej wzorem:

$$R = \varrho \cdot \frac{l}{a \cdot b} = \varrho \cdot \frac{l}{S} \quad (2)$$

gdzie:  $\varrho$  - oporność właściwa wody.

Przyjmuje się, że w objętości prostopadłościanu znajdują się pęcherzyki powietrza różnej wielkości, równomiernie rozłożone w całej objętości i

swobodnie unoszące się do góry w zawartej tam wodzie.

Ich wymiary są małe w porównaniu z wymiarami prostopadłościanów. Jeżeli przez prostopadłościan - z zawartą w nim wodą i pęcherzykami - poprowadzić myślową, dowolną płaszczyznę, równoległą do płaszczyzn elektrod, to przetnie ona szereg pęcherzy o różnej wielkości. Sumaryczna powierzchnia przekrojów pęcherzyków w poprowadzonej płaszczyźnie będzie zależała od ich liczby oraz rozmiarów. Przy założeniu, że pęcherzyki są równomiernie rozłożone w całej objętości prostopadłościanów, można przyjąć, że suma powierzchni przekrojów pojedynczych pęcherzyków w poprowadzonym przekroju prostopadłościanów będzie niezależna od miejsca poprowadzenia tego przekroju.

W przypadku przepływu prądu elektrycznego przez prostopadłościan, zawierający przewodzącą wodę oraz pęcherzyki powietrza, prąd będzie przepływał tylko przez obszar, zawierający wodę. Prostopadłościan będzie zatem stanowił opór, którego wielkość - zgodnie ze wzorem /2/ - określona będzie zależnością:

$$R_p = \xi \frac{l}{S_w} = \xi \frac{l}{S - S_p} \quad (3)$$

gdzie:  $S_w$  - ta część powierzchni przekroju, która znajduje się w obszarze zawierającym wodę,

$S_p$  - ta część powierzchni przekroju, która znajduje się w obszarze zawierającym pęcherzyki,

$S = S_w + S_p = a \cdot b$  - całkowite pole powierzchni poprowadzonego przekroju.

W podsumowaniu można powiedzieć, że - z elektrycznego punktu widzenia - prostopadłościan pomiarowy pokazany na rysunku 1 i wypełniony jedynie wodą przedstawia sobą opornik o oporności  $R$ , a taki sam prostopadłościan wypełniony mieszaniną wody i powietrza - opornik o oporności  $R_p$ .

Koncepcja budowy sondy pomiarowej do pomiaru stopnia napowietrzenia wody oparta jest na wykorzystaniu własności elektrycznych czterech takich prostopadłościanów, z których dwa wypełnione są jedynie wodą /oporniki  $R$ /, a dwa pozostałe - mieszaniną wody i powietrza /oporniki  $R_p$ /.

Wszystkie cztery prostopadłościany połączone zostały w układ pełnego mostka Wheatstone'a /rys. 2/. W przypadku pobudzenia takiego mostka napięciem  $U$ , tak jak to pokazano na rysunku 2, na przekątnej mostka pojawi się napięcie  $\Delta U$ , którego wartość można przedstawić zależnością:

$$\Delta U = U \frac{R_p - R}{R_p + R} \quad (4)$$

Wstawiając wyrażenia /2/ i /3/ w prawą stronę zależności /4/, otrzymuje się:

$$\Delta U = U \cdot \frac{S_p}{2 \cdot S - S_p} = U \cdot \frac{S_p \cdot l}{2 \cdot S \cdot l - S_p \cdot l} = U \cdot \frac{V_p}{2 \cdot V - V_p}$$

Ponieważ na ogół  $v_p \ll v$ , zatem powyższą zależność można przedstawić w następującej przybliżonej postaci:

$$\Delta U \approx U \cdot \frac{1}{2} \frac{v_p}{v}$$

skąd:

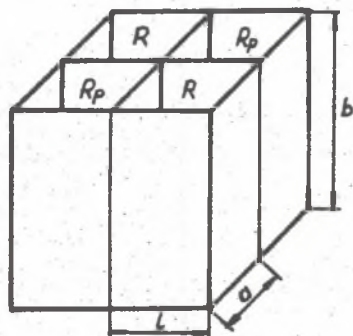
$$\frac{2 \cdot \Delta U}{U} \cdot 100\% = \frac{v_p}{v} \cdot 100\% = K. \quad (5)$$

Reasumując, można stwierdzić, że rezystancyjna metoda pomiaru stopnia napowietrzenia wody opiera się na:

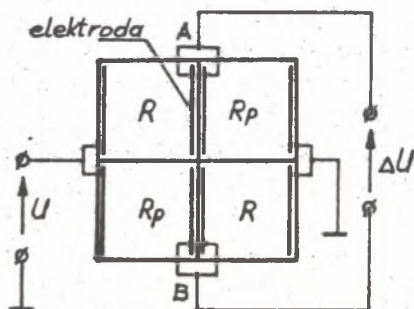
- wydzieleniu czterech jednakowych prostopadłościennych obszarów pomiarowych, z których dwa wypełnione będą jedynie wodą /oporniki  $R$ /, a dwa pozostałe będą wypełnione mieszaniną powietrza i wody /oporniki  $R_p$ /,
- połączeniu prostopadłościennych pomiarowych w układ mostkowy,
- pomiarze napięcia na przekątnej mostka, które - zgodnie z zależnością /5/ - jest proporcjonalne do stopnia napowietrzenia wody w prostopadłościennych pomiarowych, zawierających mieszaninę powietrza i wody.

### 3. Opis sondy pomiarowej

Zgodnie z wyżej opisaną zasadą rezystancyjnej metody pomiaru stopnia napowietrzenia wody, sonda pomiarowa została tak skonstruowana, aby zawierała cztery jednakowe, prostopadłościenne obszary pomiarowe. Przedstawiony na rysunku 3 schemat, stanowiący bazę konstrukcyjną sondy, jest zatem układem czterech jednakowych prostopadłościennych komór, których ściany wykonane zostały z płyt - z nieprzewodzącego i wodoodpornego materiału. Wszystkie prostopadłościenną mają nieprzesłonięte wierzchy, a dwa z nich, oznaczone symbolem  $R$ , mają przesłonięte dna. Gdy taką konstrukcję zamurzy się w mieszaninie wody i powietrza, to woda wypełni wszystkie cztery prostopadłościenną, natomiast unoszące się w wodzie pęcherzyki powietrza, które przesuwają się w kierunku od dołu do góry, będą mogły wejść tylko w obszar tych prostopadłościenną, które nie mają przesłoniętych den.



Rys.3. Schemat konstrukcyjny sondy pomiarowej.

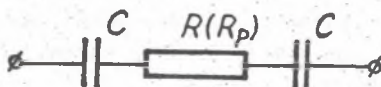


Rys.4. Schemat elektryczny sondy pomiarowej.

Podstawowym układem pomiarowym sondy jest układ elektryczny, którego istotnymi elementami są elektrody, umieszczone na dwóch przeciwległych ścianach każdej z prostopadłościennych komór sondy /rys. 4/. Zastosowano połączenie tych elektrod /rys. 5/ zapewnia połączenie w układ mostka Wheatstone'a oporników, którymi są media zapewniające poszczególne prostopadłościanny pomiarowe sondy. Przy zasilaniu takiego układu napięciem  $U$ , między punktami A i B /rys. 4/ pojawi się napięcie  $\Delta U$  proporcjonalne do stopnia napowietrzenia wody, znajdującej się w prostopadłościennych z oznaczeniem  $R_p$ .

#### 4. Zasilanie sondy pomiarowej.

Pomiar stopnia napowietrzenia wody metodą rezystancyjną jest pomiarem elektrycznym, w którym występuje przepływ prądu elektrycznego przez obszar cieczy. W związku z tym należy liczyć się z występowaniem takich elektrochemicznych zjawisk, jak pasywacja i korozja elektrod sondy pomiarowej. Można tych szkodliwych zjawisk uniknąć poprzez pokrycie powierzchni elektrod warstwą izolacyjną i zastosowanie zasilania sondy pomiarowej prądem przemiennym. W tym przypadku elektryczny schemat zastępczy pojedynczego prostopadłościannu pomiarowego ulegnie modyfikacji /rys. 5/.



Rys.5. Schemat zastępczy pojedynczego prostopadłościannu pomiarowego.

Pojawi się bowiem pojemność  $C$  będąca kondensatorem, który łączy powierzchnię elektrody, pokrytej warstwą izolacji z powierzchnią cieczy - stykającą się z elektrodą. Wpływ tej pojemności  $C$  na działanie mostka pomiarowego, utworzonego z oporników  $R$  i  $R_p$  będzie pomijalnie mały, jeżeli

będzie spełniony warunek:

$$\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \ll R (R_p), \quad (6)$$

gdzie:  $f$  - częstotliwość prądu zasilającego sondę pomiarową.

Wielkość pojemności  $C$  w istotny sposób zależy od grubości izolacji na elektrodach. Im, mianowicie izolacja będzie cieńsza, tym pojemność  $C$  będzie większa, a zatem jej wpływ na działanie mostka pomiarowego będzie odpowiednio mniejszy.

Sonda pomiarowa powinna być podłączona do toru pomiarowego, który odpowiednio wzmoćni i przekształci zmienne napięcie  $\Delta U$ , otrzymane z przekątnej mostka pomiarowego. Praktyczne rozwiązanie tego toru może mieć wiele wariantów. Przykładowy zatem schemat elektryczny zastosowanego toru pomiarowego został przedstawiony na rysunku 6, gdzie:

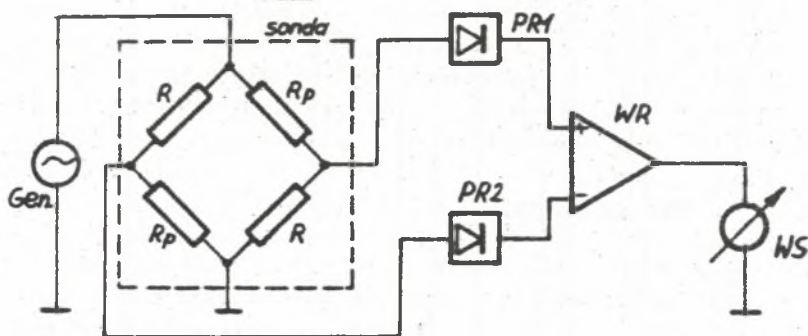
Gen. - generator zasilający sondę,

PR1, PR2 - układy prostownikowe, prostujące napięcie pobierane z prze-

Łącznej mostka pomiarowego sondy,

WR - wzmacniacz różnicowy,

WS - wskaźnik wychyłowy.



Rys.6. Przykładowy schemat toru pomiarowego.

#### 5. Wady i zalety zastosowanej metody rezystancyjnej.

Podstawową zaletą opisanej metody pomiarowej jest jej niewrażliwość na zmiany przewodności właściwej cieczy. Cecha ta jest wynikiem połączenia prostopadłościaków pomiarowych w układ mostkowy. Ponadto układ ten jest korzystny z tego względu, że zapewnia kompensację różnych innych wpływów i wzajemnych sprzężeń prostopadłościaków pomiarowych.

Natomiast podstawową wadą tej metody jest konieczność stosowania powłok izolacyjnych na powierzchniach elektrod, co wprowadza pewien błąd przy wyznaczaniu wartości współczynnika napowietrzenia  $K$  na podstawie wzoru /5/ - o ile nie jest spełniony warunek /6/. Zapewnienie spełnienia warunku /6/ jest możliwe przy stosowaniu cienkich powłok izolacyjnych. W praktyce przemysłowej spotyka się jednak wiele cieczy bardzo agresywnych chemicznie i wówczas mogą być wymagane materiały izolacyjne, przy zastosowaniu których warunek /6/ nie będzie spełniony. W takim przypadku zależność napięcia  $\Delta U$  pobieranego z przekątnej mostka pomiarowego od stopnia napowietrzenia będzie bardziej złożona, niż to podaje wzór /5/. Jednocześnie ze wzrostem wpływu pojemności  $C$  będzie malała czułość sondy.

Uwzględniając powyższe należy stwierdzić, że opisana metoda pomiaru stopnia napowietrzenia cieczy może być stosowana we wszystkich tych procesach technologicznych i stosowanych cieczach, gdy warunek /6/ jest spełniony. W każdym jednak przypadku należy indywidualnie dobrać odpowiednią konstrukcję sondy oraz toru pomiarowego.

#### 6. Praktyczne zastosowanie metody rezystancyjnej.

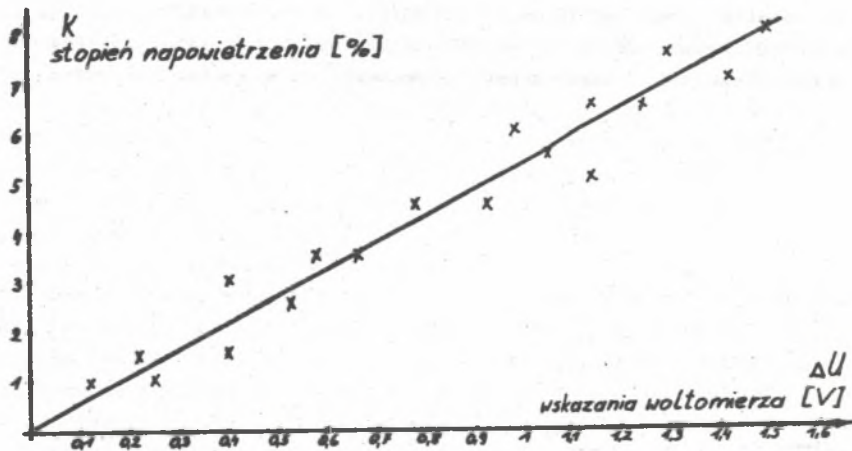
W celu praktycznego sprawdzenia przydatności zaproponowanej metody.

wykonany został model sondy pomiarowej, który zastosowano do pomiaru stopnia napowietrzenia wody w modelowym stanowisku do aeracji wstępnej. W próbach stosowano wodę o właściwościach chemicznych i fizycznych zbliżonych do wody powszechnego użytku. Parametry konstrukcyjne sondy zostały tak dobrane, aby warunek /6/ był spełniony. Należało więc oczekiwać proporcjonalnej zależności napięcia  $\Delta U$ , pobieranego z przekątnej mostka pomiarowego, od stopnia napowietrzenia wody.

Zbiornik modelowego stanowiska aeracji wstępnej wykonano w postaci prostopadociąca, którego wysokość była kilkakrotnie większa od jego wymiarów poprzecznych. Istniała zatem możliwość oszacowania stopnia napowietrzenia na podstawie pomiaru zmiany  $\Delta h$  poziomu napowietrzonej wody. Stopień napowietrzenia był bowiem w tym przypadku proporcjonalny do stosunku  $\Delta h/h_0$  - gdzie  $h_0$  jest wysokością poziomu wody w zbiorniku przed procesem napowietrzenia.

Wyniki prób przedstawiono w postaci wykresu podającego zależność napięcia  $\Delta U$ , mierzonego na przekątnej mostka, w funkcji stopnia napowietrzenia  $K$  wody.

Badania wykazały, że rozrzut punktów pomiarowych /rys. 7/ jest tym mniejszy, im bardziej stabilna jest praca dyfuzorów napowietrzających. Ponadto tor pomiarowy powinien mieć odpowiednio dobraną stałą czasową, ponieważ proces "bełkotki" nie jest stabilny w czasie i w przestrzeni.



Rys.7. Wykres zależności  $\Delta U$  od stopnia napowietrzenia  $K$ .

**ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗИСТИВНОГО МЕТОДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СТЕПЕНИ  
АЭРАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЖИДКОСТЕЙ**

**Резюме**

В работе представлено концепция применения резистивного метода для измерения степени аэрации промышленных жидкостей. Обсуждено теоретические основы измерения, а также основу действия специального зонда и измерительной системы. Представлено также результаты вступительных исследований.

**APPLICATION OF THE RESISTANCE MEASUREMENT METHOD  
OF BUBBLE AERATION GRADE OF INDUSTRIAL LIQUIDS**

**S u m m a r y**

In the paper an application of the resistance measurement method of bubble aeration grade of industrial liquids is presented. Theoretical basis and principle of operation of special probe and meter circuit is discussed. Results of exploratory investigations are also presented.