

## ZASTOSOWANIE CZUJNIKÓW PIEZOELEKTRYCZNYCH Z TYTANIANU BARU DO POMIARU SZYBKOZMIENNYCH CIŚNIEŃ W RURZE UDERZENIOWEJ

ZBIGNIEW A. PIETRZYK i ZBIGNIEW A. WALENTA

### 1. Wstęp

Zastosowanie czujników piezoelektrycznych do pomiaru zmian ciśnienia datuje się od dawna. Początkowo stosowano czujniki, w których elementem czułym były kryształy kwarcu. Zastosowanie czujników kwarcowych było jednak ograniczone trudnościami przy obróbce kwarcu i możliwością wykonania czujników tylko określonych kształtów.

Dopiero zastosowanie spieków ceramicznych z materiałów piezoelektrycznych rozwiązało te trudności. Obecnie najpopularniejszym materiałem stosowanym do produkcji czujników jest tytanium baru, a właściwie spieki ceramiczne, których głównym składnikiem jest tytanium baru. Prostota wykonania i możliwość osiągnięcia niemal dowolnych kształtów przy użyciu spieków z tytaniumu baru jako elementu czułego pozwoliło zastosować tak wykonane czujniki w bardzo wielu pomiarach.

Należy tutaj wspomnieć o jednej poważnej wadzie tytaniumu baru, mianowicie na mierzone napięcie na elektrodach czujnika wpływa zarówno zmiana naprężeń w czujniku, jak i zmiana jego temperatury. Jednak w wielu przypadkach zmiany temperatury czujnika są dostatecznie małe, aby można było je pominąć.

Obecnie wykonuje się czujniki dwóch rodzajów. Pierwsze, w których element czuły poddawany jest naprężeniu ściskającemu, oraz drugie, w których następuje zginanie elementu czułego. Z wymienionych rodzajów pierwsze mogą przenosić wyższe częstotliwości zmian ciśnienia, natomiast w czujnikach drugiego rodzaju przy tej samej zmianie ciśnienia otrzymujemy wyższe napięcie na elektrodach.

Do pomiarów aerodynamicznych element czuły w czujnikach wykonany jest przeważnie jako okrągła płytka o grubości od ułamków milimetra do kilku milimetrów. Stosowane są również czujniki rurkowe oraz kuliste jednak w dużo mniejszym zakresie.

Niniejsza praca ma zasadniczo charakter doświadczalny, jednak dla łatwiejszej interpretacji otrzymanych wyników w jej pierwszej części podano niektóre teoretyczne własności piezoelektryków oraz czujników z nich wykonanych.

Część doświadczalna pracy zawiera opis konstrukcji czujników wykonanych w Zakładzie Mechaniki Cieczy i Gazów Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN oraz wyniki wstępnych badań, jakie przy ich pomocy przeprowadzono.

Opisano dwie metody skalowania czujników i porównano wyniki otrzymane obiema metodami. Podano też sposoby mocowania czujników w rurze zapewniające minimalne zakłócenia pomiarów drganiami ścianek.

Wnioski z podanych doświadczeń mogą być wykorzystane nie tylko przy badaniu ciśnień w rurach uderzeniowych innych typów, ale również przy pomiarach szybkozmiennych ciśnień w innych warunkach niż opisane.

## 2. Ważniejsze własności materiałów piezoelektrycznych i czujników piezoelektrycznych

**2.1. Ogólne własności piezoelektryków.** W dielektrykach umieszczonych w polu elektrycznym pojawiają się naprężenia mechaniczne. Efekt ten nazywamy elektrostrykcją. Jeżeli naprężenia proporcjonalne są do pierwszej potęgi pola, będzie to efekt piezoelektryczny, który występuje w pewnych typach kryształów. W materiałach piezoelektrycznych występuje również zjawisko odwrotne, tzn. naprężenia mechaniczne powodują powstanie pola elektrycznego.

Wyrażenie na indukcję elektryczną w piezoelektryku ma postać

$$(2.1) \quad \bar{E}_j = g_{jk} p_k.$$

We wzorze powyższym zastosowano konwencję sumacyjną. Jest to wzór powszechnie stosowany w literaturze dotyczącej piezoelektryków [4,5].

**2.2. Własności spieków wielokrystalicznych.** Wytwarzanie dużych kryształów o własnościach piezoelektrycznych, jak również wycinanie z nich elementów o żądanym kształcie sprawia duże trudności. Obecnie kryształy zastępuje się spiekami wielokrystalicznymi, np. spiekami tytanianu baru  $BaTiO_3$ . Nadawanie im żądanego kształtu i wymiaru jest bardzo proste, jednak bezpośrednio po wykonaniu nie wykazują one własności piezoelektrycznych, gdyż kryształki, z jakich się składają, ustawione są chaotycznie.

Dla nadania spiekowi własności piezoelektrycznych należy go spolaryzować. Polaryzacja czujników polega na powolnym obniżaniu temperatury czujnika umieszczonego w polu elektrycznym od temperatury powyżej punktu Curie do temperatury pokojowej. Przyłożone pole elektryczne powoduje, że formujące się w temperaturze Curie komórki krystaliczne mają jednakową orientację, określoną kierunkiem pola. Po odjęciu pola orientację zachowuje tylko część komórek krystalicznych. Liczba komórek, które zachowują orientację po odjęciu pola, zależy od składu chemicznego spieku i sposobu chłodzenia w czasie polaryzacji.

Dla spieków z tytanianu baru temperatura Curie zawiera się zależnie od ilości domieszek w przedziale 100-120°C. Powyżej tej temperatury kryształki tytanianu baru posiadają siatkę regularną, poniżej tetragonalną. Czysty tytanian baru wykazuje po spolaryzowaniu bardzo słabe własności piezoelektryczne. Dla poprawienia ich stosuje się dodatki tytanianu ołowiu  $PbTiO_3$  (4-8%) lub cyrkonu (ok. 1%).

Tytanian baru polaryzuje się polem o natężeniu 500-100 V/mm (nie wyższym, gdyż może nastąpić przebicie, i nie niższym, gdyż uzyskuje się wówczas niższą czułość).

Czułość czujników z tytanianu baru maleje prawie proporcjonalnie do logarytmu czasu [2]. Zmiana ta jest stosunkowo niewielka, jednak czujnik wymaga okresowego cechowania.

2.3. Zastosowanie piezoelektryków do pomiarów ciśnienia. Jeżeli na podstawy płytki z materiału piezoelektrycznego, zorientowanej jak na rys. 1 podziałamy ciśnieniem  $p_3$ , to powstanie pomiędzy nimi różnica potencjałów

$$(2.2) \quad U = \int_0^h \bar{E}_3 dx_3,$$

gdzie  $h$  oznacza grubość płytki,  $\bar{E}_3$  składową pola elektrycznego równoległą do osi  $x_3$ , wywołaną działaniem ciśnienia  $p_3$ .

Zakładamy, że płytka jest jednorodna w całej objętości oraz że moduł Poissona płytki i części stykających się płytek jest taki sam (założenia te będą przyjęte we wszystkich dalszych rozważaniach).

Przy powyższych założeniach do wzoru (2.2) możemy podstawić wielkość  $\bar{E}_3$  ze wzoru (2.1). Po scałkowaniu otrzymamy

$$(2.3) \quad U = g_{33} p_3 h.$$

Zatem dla danego materiału piezoelektrycznego napięcie zależy tylko od ciśnienia i grubości płytki.

Jeżeli do podstaw płytki przyłożymy elektrody (np. przez napylenie srebra na płytkę), to zbierze się na nich ładunek elektryczny

$$(2.4) \quad Q = UC_T,$$

gdzie  $C_T = \epsilon \epsilon_0 S/h$  oznacza pojemność pomiędzy elektrodami,  $S$  pole powierzchni czynnej elektrod,  $\epsilon_0$  stałą dielektryczną próżni oraz  $\epsilon$  względną stałą dielektryczną materiału płytki. Wstawiając (2.3) do (2.4) otrzymamy

$$(2.5) \quad Q = \epsilon_0 \epsilon g_{33} p_3 S.$$

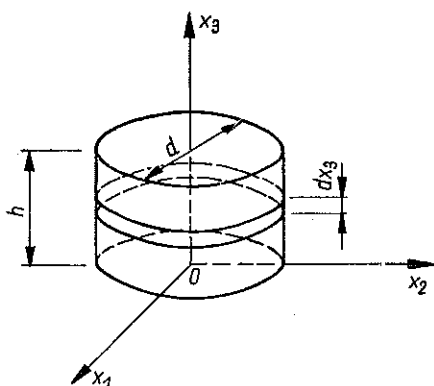
Ładunek na płytce dla określonego materiału zależy zatem od powierzchni płytki i od ciśnienia działającego na płytkę, nie zależy natomiast od grubości płytki.

Zbadajmy teraz, jak zachowuje się czujnik podłączony do oscyloskopu. Schemat zastępczy takiego układu przedstawiono na rys. 2. Indukcyjność i opór kabla w większości przypadków można pominąć. Zatem pojemności  $C_T$ ,  $C_k$  i  $C_{we}$  oraz oporności  $R_T$ ,  $R_k$ ,  $R_{we}$  można traktować jako połączone równolegle.

Jeżeli płytkę obciążymy skokowo ciśnieniem  $p_3$ , to powstanie na niej w chwili początkowej ładunek  $Q_0$ . Napięcie na elektrodach płytki będzie równe

$$(2.6) \quad U_0 = \frac{Q_0}{C_T + C_k + C_{we}},$$

gdzie  $Q_0$  jest dane za pomocą wzoru (2.5).



Rys. 1

Jeżeli ciśnienie zostanie stałe w czasie, to napięcie na elektrodach płytki będzie się zmieniać zgodnie z równaniem

$$(2.7) \quad C + \frac{dU}{dt} + \frac{1}{R} U = 0,$$

gdzie

$$(2.8) \quad C = C_T + C_k + C_{we}$$

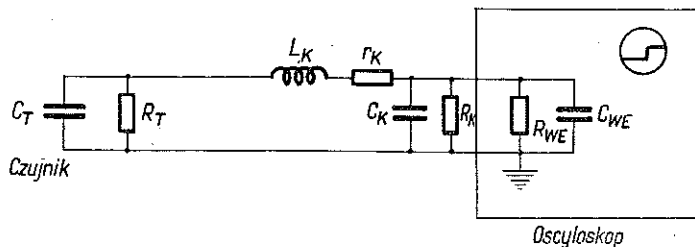
oraz

$$(2.9) \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{R_T} + \frac{1}{R_k} + \frac{1}{R_{we}}.$$

Rozwiązanie tego równania ma postać

$$(2.10) \quad U = U_0 e^{-\frac{t}{RC}},$$

czyli napięcie między elektrodami płytki maleje wykładniczo ze stałą czasu  $RC$ . Spowodowane jest to ucieczką ładunków przez upływności układu i ze względu na pomiar jest zjawiskiem niekorzystnym.



Rys. 2

Stałą czasu można podwyższyć zwiększając pojemność bądź zmniejszając upływność całego układu. Jednak zwiększanie pojemności przez włączanie kondensatora równoległe z czujnikiem powoduje, jak to widać ze wzoru (2.6), zmniejszenie czułości. Dlatego należy dążyć do jak najmniejszej pojemności przewodzących, natomiast w celu powiększenia stałej czasu należy usuwać szkodliwe upływności układu.

Przyłączeniu równoległym oporów o rzędzie wielkości oporu wypadkowego decyduje wielkość najmniejszego oporu. W tym przypadku jest to przy dobrze wykonanym czujniku opór wejściowy oscyloskopu. Wynosi on przeciętnie około  $10^6 \Omega$ , co przy łącznej pojemności czujnika i kabla około 100 pF daje stałą czasu  $10^{-4}$  sek. W bardzo niewielu przypadkach taka stała czasu jest zadowalająca. W celu powiększenia oporności wejściowej należy pomiędzy czujnik a oscyloskop wstawić separator opornościowy. Może być to układ na lampie elektrometrycznej lub układy typu wtórnika katodowego, na których można osiągnąć oporność wejściową rzędu  $10^{12} \Omega$ . Przy oporności rzędu  $10^{12} \Omega$  otrzymujemy stałą czasu około 100 sek, co w wielu przypadkach jest wystarczające.

2.4. Reakcja piezoelektryka na ciśnienie działające ze wszystkich stron. Jeżeli na płytkę (rys. 1) podziałamy ze wszystkich stron tym samym ciśnieniem  $p$ , to wtedy wewnątrz płytki wytworzą się wyłącznie naprężenia ściskające równe  $p$ . Na podstawie wzoru (2.1) mamy

$$(2.11) \quad \bar{E}_3 = p (g_{33} + g_{32} + g_{31}).$$

Wielkość pola elektrycznego powstającego w płytce zależy więc od poszczególnych wartości  $g_{ik}$ .

Dla tytanianu mamy (2.11)

$$(2.12) \quad g_{33} = 0,128 \frac{V_m}{kG},$$

$$g_{31} = g_{32} = -0,052 \frac{V_m}{kG} = -0,406 g_{33}.$$

Podstawiając do (2.11) otrzymujemy

$$(2.13) \quad \bar{E}_3 = 0,188 g_{33} p.$$

Widać stąd, że pole elektryczne wewnątrz płytki z tytanianu baru, obciążonej ze wszystkich stron jednakowym ciśnieniem, jest wielokrotnie słabsze, niż w analogicznej płytce obciążonej tylko na podstawach. Jak wynika ze wzoru (2.13) dla uzyskania maksymalnej czułości płytki należy w czasie pomiarów chronić boczne ścianki przed działaniem ciśnienia.

Właściwość tytanianu baru, wynikająca ze wzoru (2.13), może być wykorzystana do przybliżonego pomiaru ciśnienia dynamicznego w przepływie. Jeżeli wykonamy czujniki tak, aby na podstawy płytki działało ciśnienie całkowite (suma ciśnienia statycznego i dynamicznego  $p_{st} + p_{dyn}$ ), na ścianki zaś boczne tylko ciśnienie statyczne, to

$$(2.14) \quad p_3 = p_{st} + p_{dyn}, \quad p_1 = p_2 = p_{st}.$$

Podstawiając do (2.1) otrzymamy

$$(2.15) \quad \bar{E}_3 = g_{33} (p_{st} + p_{dyn}) + (g_{31} + g_{32}) p_{st} = g_{33} p_{dyn} + (g_{31} + g_{32} + g_{33}) p_{st}.$$

Gdyby  $(g_{31} + g_{32} + g_{33}) = 0$ , to mielibyśmy idealny miernik ciśnienia dynamicznego.

Dla tytanianu baru

$$(2.16) \quad \bar{E}_3 = g_{33} (p_{dyn} + 0,188 p_{st}).$$

Jeżeli  $p_{st} \ll p_{dyn}$ , czujnik będzie mierzył ciśnienie dynamiczne. Pomiar będzie tym dokładniejszy, im mniejsze będzie ciśnienie statyczne w porównaniu z dynamicznym. Wydaje się, że przez odpowiednią konstrukcję samego czujnika można by jeszcze polepszyć dokładność pomiaru ciśnienia dynamicznego.

2.5. Reakcja czujnika piezoelektrycznego na nagły wzrost ciśnienia. W dotychczasowych rozważaniach zakładaliśmy, że płytka reaguje natychmiast na przyłożone ciśnienie. W rzeczywistości przyjmując, że poszczególne kryształki reagują na impuls ciśnienia bez opóźnień, czas reakcji płytki zamocowanej sztywno na jednej z pod-

staw równy jest czasowi przejścia fali dźwiękowej przez grubość płytki (prędkość dźwięku w tytaniumie baru wynosi około 5000 m/sek).

Po przejściu fali zgęszczeniowej przez płytkę odbija się ona od przeciwległej powierzchni płytki, po czym następują dalsze odbicia i płytka zaczyna drgać. W przypadku sztywnego zamocowania jednej z podstaw częstotliwość drgań wynosi

$$(2.17) \quad f = \frac{2h}{C}$$

gdzie  $C$  jest prędkością dźwięku w płytce.

Drgania te są silnie tłumione przez tarcie wewnętrzne materiału tak, że po kilku okresach zanikają. Przedłuża to jednak czas reakcji czujnika.

Oprócz drgań płytki na pomiar ciśnienia wpływają silnie drgania jej obudowy. Zależą one od konstrukcji czujnika i dla każdej konstrukcji muszą być rozpatrywane oddzielnie.

**2.6. Reakcja czujnika na przyspieszenie.** Jeżeli czujnik piezoelektryczny zamocowany jest np. w drgającej ścianie modelu, to przyspieszenia, jakim ten czujnik podlega, mogą wywołać impulsy zakłócające pomiar.

Do rozważań ilościowych założymy, że płytka piezoelektryczna zamocowana jest sztywno w płaszczyźnie  $x_1 x_2$  (rys. 1) poruszającej się z przyspieszeniem  $a$ . Wewnątrz płytki wytwarzają się naprężenia

$$(2.18) \quad \begin{aligned} \sigma_{33} &= \rho (h - x_3) a_3, & \sigma_{31} &= \sigma_{13} = \rho (h - x_3) a_1, \\ \sigma_{32} &= \sigma_{23} = \rho (h - x_3) a_2, \end{aligned}$$

gdzie  $\rho$  oznacza gęstość materiału płytki,  $a_1, a_2, a_3$  składowe przyspieszenia wzdłuż odpowiednich osi.

Na podstawie (2.1) składowa pola elektrycznego w płytce równoległa do osi  $x_3$  wynosi

$$(2.19) \quad \bar{E}_3 = g_{33} \sigma_{33}.$$

Różnica potencjałów wywołana przyspieszeniem wyniesie

$$(2.20) \quad U_{\text{przysp.}} = \int_0^h \bar{E}_3 dx_3 = \rho g_{33} a_3 \int_0^h (h - x_3) dx_3 = \frac{1}{2} g_{33} \rho a_3 h^2,$$

skąd

$$(2.21) \quad \frac{U_{\text{przysp.}}}{a_3} = \frac{1}{2} \rho g_{33} h^2.$$

Natomiast ze wzoru (2.9) otrzymamy

$$(2.22) \quad \frac{U_{\text{ciśn.}}}{p_3} = g_{33} h.$$

Stosunek czułości na przyspieszenie do czułości na ciśnienie wynosi

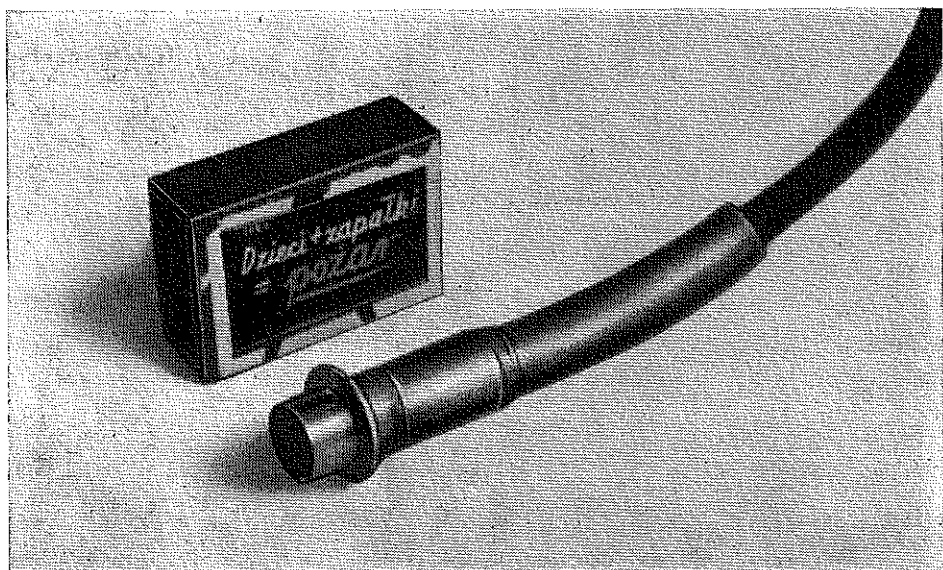
$$(2.23) \quad \frac{U_{\text{przysp.}}/a_3}{U_{\text{ciśn.}}/p_3} = \frac{1}{2} \rho h.$$

A zatem wpływ zakłóceń wywołanych działaniem przyspieszeń jest tym większy, im element piezoelektryczny jest grubszy.

Z powyższych rozważań wynika dodatkowo, że czujnik, w którym płytka przymocowana jest do obudowy tylko jedną z podstaw (powierzchnie boczne swobodne), jest czuły jedynie na przyspieszenia działające prostopadle do podstaw.

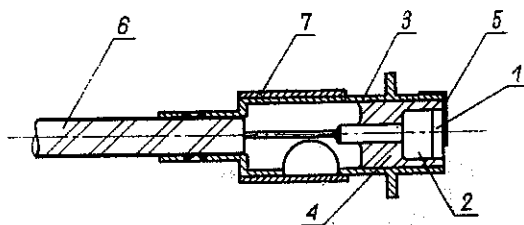
### 3. Konstrukcja badanych czujników

Jako elementu czułego do czujników użyto płytek o średnicy 6-12 cm i grubości 1-3 mm, wykonanych w Pracowni Elementów Piezoelektrycznych Zakładu Badania Drgań Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN. Elementy czułe przy-



Rys. 3

klejono do rdzenia mosiężnego tak, aby zapewnić dobry styk elektryczny pomiędzy rdzeniem i warstwą srebra napyłoną uprzednio na elemencie. Rdzeń ten stanowi niezerową elektrodę czujnika. Przymocowany jest on do obudowy przy pomocy żywicy epoksydowej. Drugą elektrodą czujnika jest sama obudowa połączona z elementem czułym mosiężną blaszką. Element czuły od strony przestrzeni pomiarowej powleczony jest cienką warstwą żywicy epoksydowej w celu zabezpieczenia go przed zniszczeniem. Na rys. 3 pokazano zdjęcie gotowego czujnika, a na rys. 4 schemat konstrukcyjny. Dokładniejszy opis konstrukcji oraz technologia montażu zamieszczona jest w pracy [12].

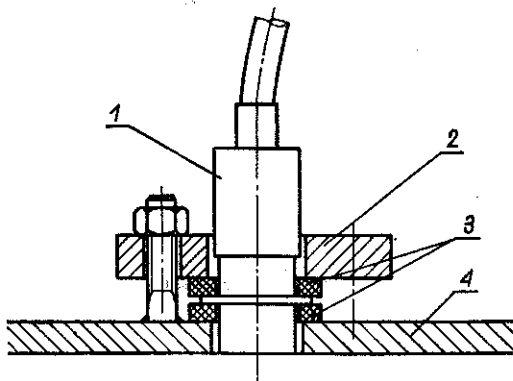


Rys. 4

#### 4. Sposób mocowania czujnika w rurze uderzeniowej

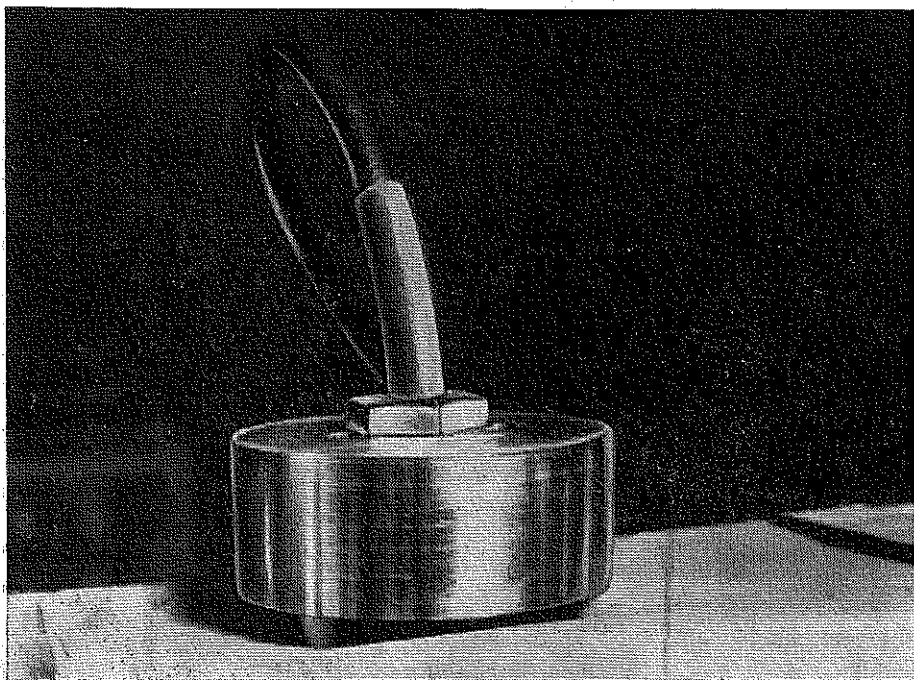
Sposób mocowania czujnika musi odpowiadać następującym warunkom:

- 1) konieczna jest dobra izolacja ścianek od drgań (por. p. 2.6),
- 2) zabezpieczenie bocznych powierzchni czujnika przed wpływem mierzonego ciśnienia,
- 3) dla rury uderzeniowej sposób mocowania czujnika powinien umożliwić zachowanie próżni wewnątrz rury.



Rys. 5

Początkowo zamocowano czujnik w sposób przedstawiony na rys. 5. Sposób ten nie nadaje się do pomiaru ciśnienia, ponieważ drgania ścianek przenoszą się

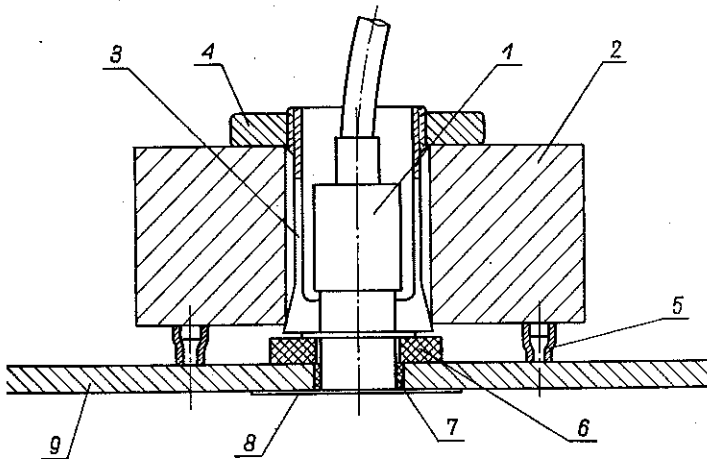


Rys. 6



tak silnie na czujnik, że uniemożliwiają prawidłowy pomiar. Okazał się jednak wystarczający przy używaniu czujników jako wskaźników przejścia fali uderzeniowej, impuls bowiem pochodzący od ciśnienia jest większy od impulsu wywołanego drganiami ścianek i możliwe jest takie dostrojenie układu elektronowego, żeby reagował tylko na impuls ciśnieniowy.

Idealnym wydaje się mocowanie czujnika na masywnej konstrukcji nie połączonej z rurą. Urządzenie takie byłoby jednak bardzo drogie. Poza tym okazało się, że tak wielka ostrożność nie jest potrzebna i zupełnie proste urządzenie daje dostatecznie dobre wyniki. Na rysunku 6 podano zdjęcie urządzenia do mocowania czujnika, które praktycznie nie daje zakłóceń pomiaru drganiami ścianek, a na rys. 7 podano



Rys. 7

jego schemat. Idea mocowania polega na sztywnym związaniu czujnika z dużą masą (około 1,5 kg) ustawioną na rurze na miękkich nóżkach. Czujnik uszczelniony jest podkładkami gumowymi oraz centrowany gumowym pierścieniem. Od wewnątrz rury całość zaklejona jest cienką folią uniemożliwiającą przedostanie się ciśnienia mierzonego do bocznych ścianek czujnika. Uzyskuje się dzięki temu wyższą czułość.

Jak wykazały badania, urządzenie to w pewnym stopniu przenosi drgania rury. Usunięcie pierścienia centrującego poważnie je zmniejsza, natomiast po usunięciu uszczelki gumowej drgania przestają być zupełnie widoczne.

## 5. Metody cechowania czujników

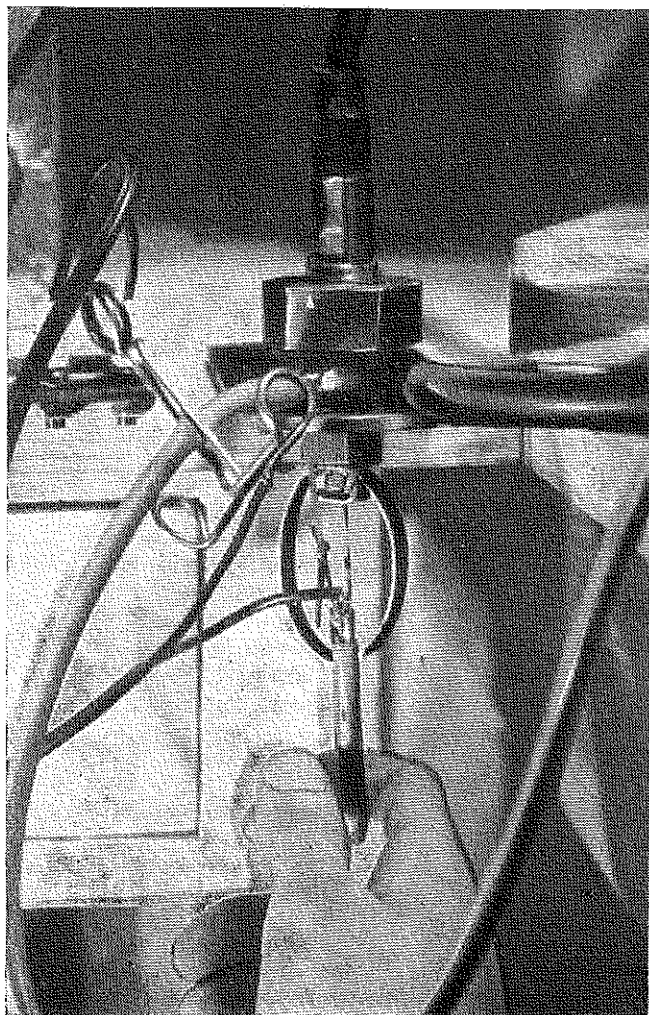
**5.1. Warunki jakim powinno odpowiadać cechowanie czujników.** Ze względu na skończone oporności wszystkich części czujników i urządzeń elektronowych, do których czujnik jest podłączony, czujniki piezoelektryczne nie mogą przenosić zerowej częstotliwości (por. p. 2 i 3). Z tego powodu skalowanie czujników musi być przeprowadzone sposobem dynamicznym. Ogólnie skalować można przez poddanie czujnika pulsującemu ciśnieniu o znanej amplitudzie, lub znanemu sko-

kowi ciśnienia. Odczytu dokonuje się na oscylografie. Należy pamiętać, że jeżeli oscylograf nie posiada dostatecznie dużej oporności wejściowej, należy pomiędzy niego i czujnik wstawić urządzenie separujące (por. p. 2 i 3).

Oporność wejściowa urządzenia separującego, jakiego należy użyć, zależy od najniższej mierzonej częstotliwości. Nie należy stosować zbyt dużych oporności separatora, ponieważ pociąga to za sobą długi czas ustalania się warunków jego pracy. Przy stosowanych dalej metodach skalowanie odbywało się przy stałej czasu 30 sek oraz 3 sek.

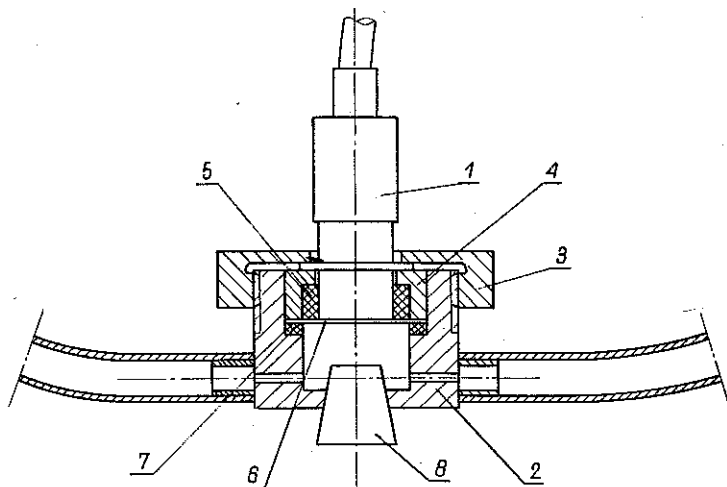
Wykonano również separator o oporności wejściowej ok.  $10^{12} \Omega$ , dający przy współpracy z badanymi czujnikami stałą około 200 sek. Z podanych jednak wyżej względów okazał się on kłopotliwy w użyciu.

**5.2. Quasi-statyczna metoda skalowania.** Metoda ta polega na poddaniu czujnika szybkiej zmianie ciśnienia, wywołanej gwałtownym opróżnieniem zbiornika

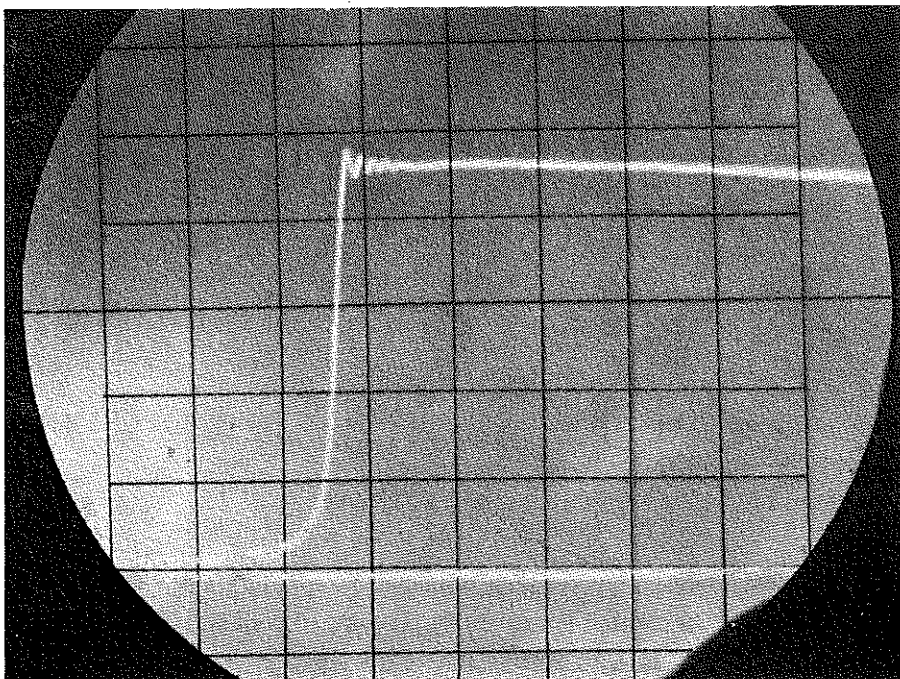


Rys. 8

gazu, do którego podłączony jest czujnik. Wielkość skoku ciśnienia określamy mierząc ciśnienie w zbiorniku zamkniętym i po jego opróżnieniu. Aby skalowanie było dokładne należy zapewnić szybkie opróżnienie zbiornika. Z tego powodu objętość zbiornika powinna być mała. Drugim warunkiem zapewniającym pra-



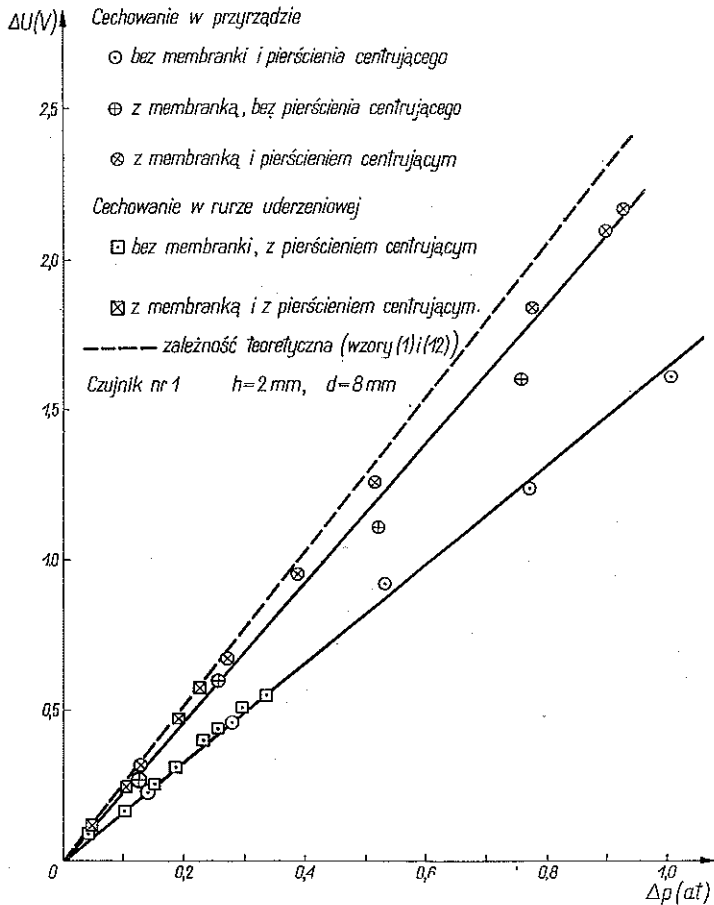
Rys. 9



Rys. 10

widlowość skalowania jest identyczny sposób zamocowania czujnika w przyrządzie do skalowania i w układzie pomiarowym. Na rysunku 8 pokazano zdjęcie, a na rys. 9 schemat użytego urządzenia do skalowania czujników.

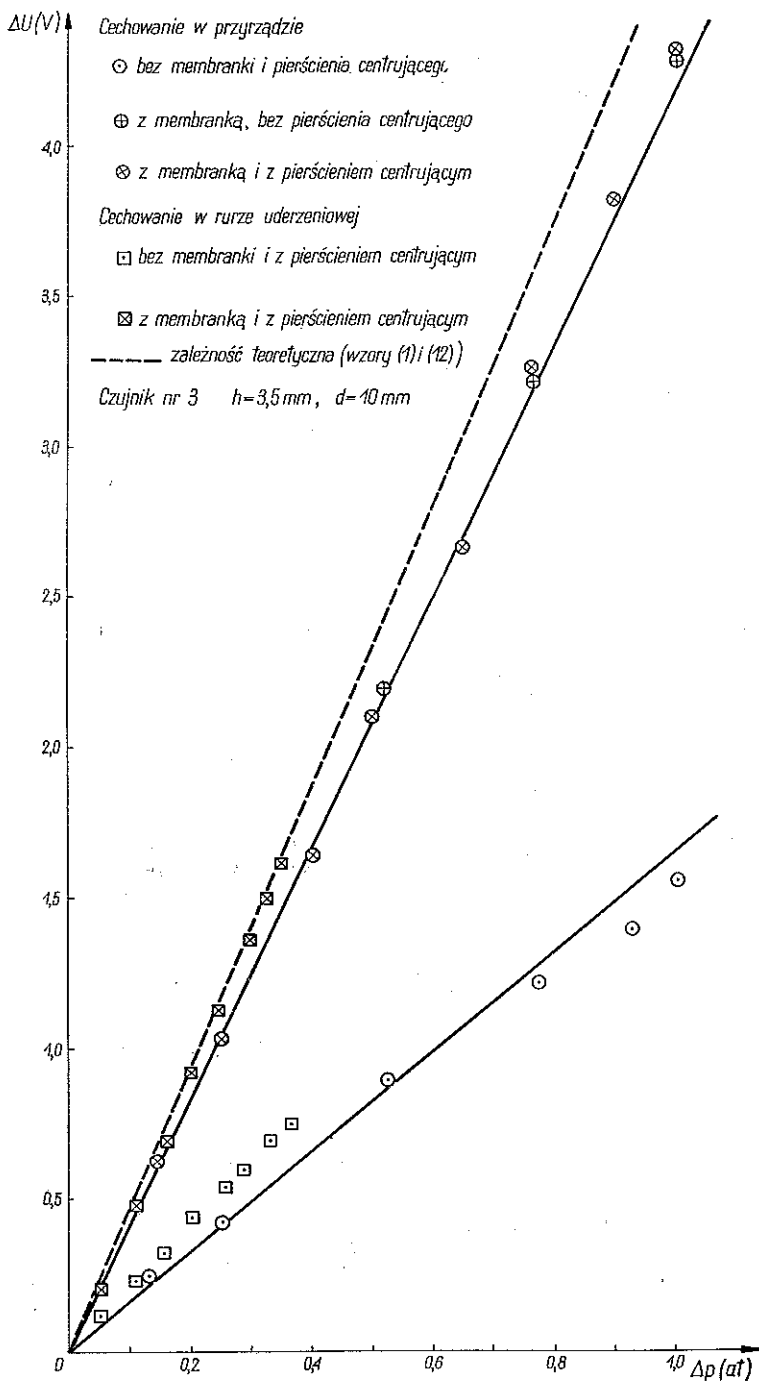
Skalowania dokonuje się wrywając korek ze zbiornika, w którym znajduje się gaz pod znanym ciśnieniem. Czas opróżnienia zbiornika wynosi około 3 sek. Po opróżnieniu zbiornika występują w nim szybko gasnące oscylacje o częstotliwości około 2,8 kHz, co odpowiada częstotliwości drgań słupa powietrza w zbiorniku. Widoczne dalej pochylenie oscylogramu wywołane jest tym, że wzmacniacz oscyloskopu nie przenosi napięcia stałego. Wpływ zmiany temperatury na odpowiedź czujnika,



Rys. 11

jak zostało stwierdzone przy pomocy wzmacniacza prądu stałego, jest pomijalny przy występujących tu czasach pomiaru. Na rysunku 10 podano typowy oscylogram skalowania, a na rys. 11 i 12 wyniki skalowania.

Łączna dokładność skalowania tą metodą wynosi  $\pm 8,5\%$ , przy czym największy wpływ na błąd skalowania ma błąd oscyloskopu  $\pm 5\%$ , a następnie błąd odczytu ze zdjęcia  $\pm 2,5\%$ . Przeprowadzając pomiar bardziej precyzyjnie można tą metodą osiągnąć dokładność skalowania do ok.  $\pm 4\%$ .



Rys. 12

5.3. Skalowanie czujników w rurze uderzeniowej. Metoda skalowania w rurze uderzeniowej polega na zdejmowaniu oscylogramu wskazań czujników umieszczonych w ścianie rury podczas przejścia fali uderzeniowej. Na oscylogramie widoczny jest skok potencjału spowodowany skokiem ciśnienia na fali. Znając parametry gazu przed falą i prędkość fali z podstawowych zasad zachowania można wyznaczyć skok ciśnienia na fali.

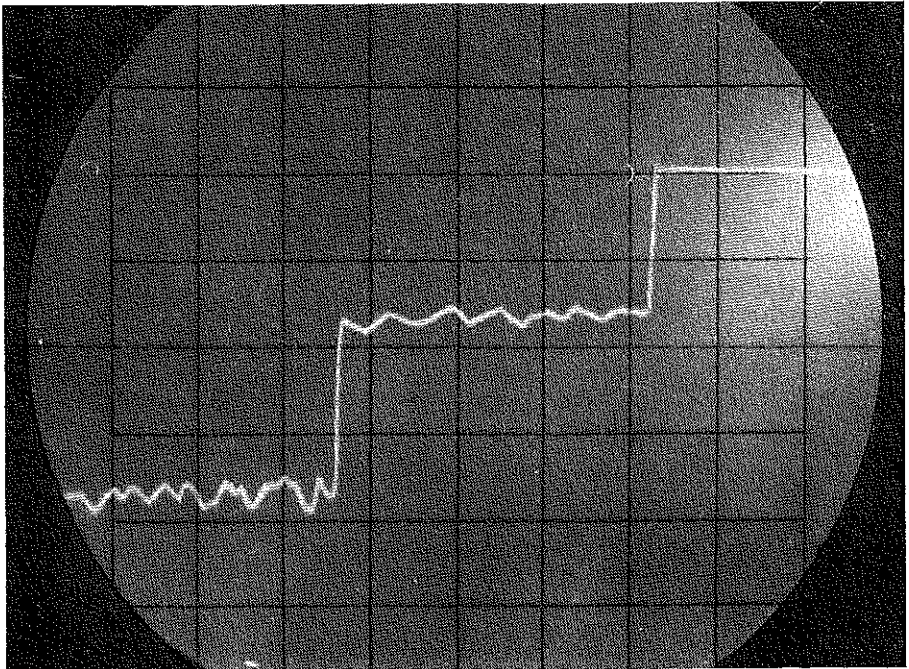
Po obliczeniach otrzymujemy (3)

$$(5.1) \quad \Delta p = p_1 \frac{7}{6} (M_s^2 - 1),$$

$$(5.2) \quad M_s = \frac{U_1}{a_1},$$

$$(5.3) \quad a_1 = \sqrt{\kappa RT_1},$$

gdzie  $\Delta p$  oznacza przyrost ciśnienia na fali,  $p_1$  ciśnienie przed falą,  $M_s$  liczbę Macha fali,  $U_1$  prędkość fali,  $a_1$  prędkość dźwięku przed falą,  $R$  stałą gazową oraz  $\kappa = c_p/c_v$  wykładnik adiabaty.



Rys. 13

Na rysunku 13 podano typowy oscylogram uzyskany z czujnika umieszczonego w ścianie rury uderzeniowej. Pierwszy skok ciśnienia spowodowany jest przejściem fali pierwotnej, drugi fali odbitej od tylnej ścianki rury. Zafalowania po przejściu fali należy tłumaczyć zaburzeniami przepływu za falą. Pierwszy mały impuls ujemny

(przed pojawieniem się właściwego impulsu od fali) powstaje, gdy fala uderza w obudowę ścianki czujnika (jak wynika ze stałych materiałowych tytanianu baru, impuls ten musi być przeciwnego znaku niż mierzony).

Błąd cechowania czujników w rurze uderzeniowej wynosił 11-26%. Składał się na niego głównie błąd określenia skoku ciśnienia na fali na podstawie jej prędkości (3,5-19%; błąd ten maleje ze wzrostem prędkości fali), niedokładności wskazań oscyloskopu oraz błędu odczytu ze zdjęcia. Błąd tej metody można również obniżyć do około 5% przeprowadzając pomiary bardziej precyzyjnie i dobierając odpowiednio prędkości fali uderzeniowej.

Metoda cechowania w rurze ma tę wyższość nad skalowaniem w przyrządzie, że można od razu znaleźć maksymalną częstotliwość przenoszoną przez czujnik, mierząc czas narastania impulsu zdejmowanego z czujnika, umieszczonego w tylnej ściance rury.

Wyniki cechowania czujników dla obu metod podano na rys. 11 i 12.

## 6. Zakończenie

Obie podane metody skalowania dają identyczne wyniki. Do szerszego zastosowania wydaje się lepsza metoda quasi-statyczna, ponieważ przyrząd do skalowania tą metodą jest bardzo prosty.

Natomiast w przypadku, kiedy dalsze badania z czujnikami mają być prowadzone w rurze uderzeniowej, można skalowanie przeprowadzić również w rurze. Jak już podano skalowanie w rurze ma tę wyższość nad metodą quasi-statyczną, że przez umieszczenie czujnika w tylnej ściance możliwy jest pomiar czasu jego odpowiedzi.

Wskazania czujnika w całym zakresie pomiarowym wykazują liniową charakterystykę. Zależność czułości czujników od ich grubości zgadza się całkowicie z teorią.

Podany stosunkowo prosty sposób mocowania czujników jest całkowicie zadowalający przy pomiarze ciśnień w rurze uderzeniowej. Przy innych pomiarach należy przed właściwymi badaniami wykonać wstępne prace nad prawidłowym zamocowaniem czujników.

## Literatura cytowana w tekście

- [1] L. LANDAU, E. LIJSZIC, *Elektrodynamika ośrodków ciągłych*, PWN, Warszawa 1958.
- [2] D. SCHOFIELD, R. F. BROWN, *An investigation of some barium titanate compositions for transducer applications*, Canadian J. Phys, 5, 35 (1957).
- [3] J. R. RUETENIK, *Development of miniature pressure transducers for application to airfoil studies in the shock tube*, WADC Techn., Rep. 58-628, ASTIA Document No 206529.
- [4] J. H. GARRARD, *Piezoelectric pressure gauges for use in a shock tube*, Acustica, 9 (1959), 17-23.
- [5] Н. В. Филипов, *Исследование давлений в мощном импульсном газовом разряде с помощью пьезоэлектрического измерителя*, Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций, том III, с. 231.

[6] D. W. HOLDER, D. L. SCHULTZ, *One the use of shock tunnels for research on hypersonic flow*, Presented at the Second International Congress International Council of the Aeronautical Sciences, Sept. 12-16, Zurich, 1960.

[7] W. W. WILLMARTH, *Small barium titanate transducer for aerodynamic or acoustic pressure measurements*, Rev. Sci. Instr., 3, 29 (1958).

[8] H. T. KNIGHT, *Piezoelectric detector for low pressure shock waves*, Rev. Sci. Instr., 2, 29 (1958), 174-175.

[9] E. PROCOPOVICI, L. DUMITRESCU, *Masurarea presiunilor aerodinamice in tubul de soc*, Studii si Cercetari de Mecanica Aplicata 1, Anul XII, Editura Academiei Republicii Populare Romine, 1961.

[10] W. BTEAKEEY, A. B. ARONS, *Article B 2 pressure measuring manometers and gauges. Physical measurements in gas dynamics and combustion*. High Speed Aerodynamics and Jet Propulsion, Vol. 9. Oxf, Univ. Press, 1955.

[11] J. MATUSCHEK, *Technika ultradźwięków*, Wyd. Nauk. Techn., Warszawa 1961.

[12] Z. A. PIETRZYK, Z. A. WALENTA, *Pewne uwagi na temat zastosowania czujników piezoelektrycznych z tytanianu baru do pomiarów w rurze uderzeniowej*, ZMGiG IPPT. PAN, Sprawozdanie nr 3, 1962.

#### Резюме

#### ПРИМЕНЕНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТИТАНОБАРИЕВЫХ ДАТЧИКОВ К ИЗМЕРЕНИЮ БЫСТРО ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ ДАВЛЕНИЙ

В работе представлены два вопроса, связанные с практическим применением пьезоэлектрических датчиков к изменению быстроизменяющихся давлений. Обсуждается влияние колебаний датчика на измерения давления и способы устранения или уменьшения вредных колебаний ящика прибора на измерительную величину. Даются два способа градуирования датчиков, а также их конструкция и характеристика.

Кроме экспериментальной части даются некоторые теоретические зависимости для пьезоэлектрических датчиков, а в особенности титанобариевых.

#### Summary

#### APPLICATION OF BARIUM TITANIATE PIEZOELECTRIC INDICATORS TO THE MEASUREMENT OF RAPIDLY VARYING PRESSURES IN A SHOCK TUBE

Two problems are discussed, both of them being connected with practical application of piezoelectric indicators to the measurement of rapidly varying pressures. The influence of vibration of the indicator on the measurement of pressure is discussed as well as methods for avoiding or reducing of the harmful influence of housing vibration on the measured quantity. The paper contains also a description of the design, characteristics and calibration of the indicators.

In addition to the experimental part the paper contains some theoretical relationships for piezoelectric indicators, those of barium titanate in particular.

ZAKŁAD MECHANIKI CIECZY I GAZÓW  
INSTYTUTU PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI PAN

Praca została złożona w Redakcji dnia 11 maja 1963 r.