

CZUJNIKI DO DETEKЦИИ FALI UDERZENIOWEJ W RURZE UDERZENIOWEJ

Z. A. WALENTA I W. W. HARASIMOWICZ (WARSZAWA)

Praca zawiera zestawienie wyników doświadczeń związanych z detekcją fal uderzeniowych w rurach uderzeniowych. Przebadano następujące typy czujników: ciśnieniowe, jonizacyjne, temperaturowe i czujniki z wiązką jonową. Podano parametry (kształt i amplitudę sygnału) i zakres stosowalności poszczególnych typów czujników ze szczególnym uwzględnieniem przepływów przy niskich gęstościach.

1. WSTĘP

Celem niniejszej pracy jest zestawienie wyników doświadczeń wykonanych w Zakładzie Mechaniki Cieczy i Gazów Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN na temat metod detekcji fal uderzeniowych w rurach uderzeniowych. Badane były następujące typy czujników: 1) ciśnieniowe (wykorzystujące efekt piezoelektryczny), 2) jonizacyjne (wykorzystujące przebicie między elektrodami w wyniku przejścia fali), 3) czujniki z wiązką jonową (wykorzystujące efekt «zdmuchiwania» wiązki jonów dodatnich w wyniku przejścia fali), 4) temperaturowe (cienka warstewka metaliczna nałożona na izolator, pracująca jako termometr oporowy).

2. CZUJNIKI CIŚNIENIOWE

Czujniki ciśnieniowe stosowane do detekcji fali uderzeniowej były typu piezoelektrycznego. Element czuły był wykonany z tytanianu baru ($BaTiO_3$). Czujniki te odznaczały się czułością około $2 V/at$, a ich czas reakcji na prostokątny impuls ciśnieniowy wynosił około $1,5 \mu\text{sek}$. Zaletą ich była prostota obsługi i pewność działania przy dużych przyrostach ciśnienia w fali uderzeniowej; wadą natomiast — duża czułość na drgania rury wywołane np. pękaniem membrany. Ta ostatnia cecha narzucała konieczność stosowania specjalnych typów mocowania w ściankach rury uderzeniowej, zapewniających izolację od drgań rury. Pomocne też były filtry elektryczne, odfiltrowujące częstotliwość charakterystyczną dla drgań czujnika w zamocowaniu.

Czujniki ciśnieniowe nadawały się przede wszystkim do detekcji niezbyt silnych fal uderzeniowych, rozchodzących się w gazie o niezbyt niskim ciśnieniu. Praktyczną dolną granicą ciśnienia początkowego, przy którym można było je stosować, była wartość 10 Tr , a górną granicą liczby Macha $M_s=4$.

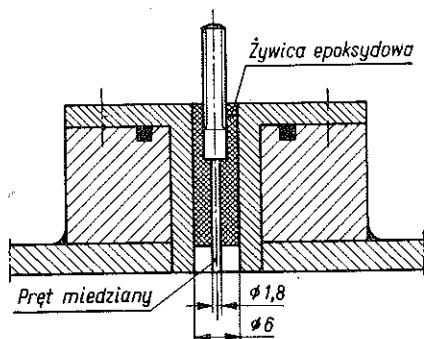
Bliższe szczegóły na temat konstrukcji, mocowania oraz sposobu podłączenia czujników piezoelektrycznych zawarte są w pracach [1 i 2].

3. CZUJNIKI JONIZACYJNE

Czujniki jonizacyjne są dobrze opisane w literaturze i szeroko stosowane do detekcji silnych fal uderzeniowych (o liczbie Macha $M_s > 6$) przy wysokich ciśnieniach. Na temat możliwości zastosowania ich przy niskich ciśnieniach ukazała się tylko jedna wzmianka [3].

W ZMCiG czujniki jonizacyjne były stosowane przy ciśnieniach początkowych sięgających $4 \cdot 10^{-2}$ Tr i liczbach Macha od 2,2 do 6,0 w powietrzu, azocie i argonie. Było to możliwe dzięki wykorzystaniu faktu, że napięcie, przy którym następuje przebicie między elektrodami czujnika jonizacyjnego, posiada minimum przy określonej wartości ciśnienia [4]. Zarówno dla ciśnień wyższych jak i niższych napięcie to rośnie. Wartość ciśnienia, przy którym występuje powyższe minimum, zależy od konstrukcji czujnika, jego wymiarów, rodzaju gazu itd. Dobierając odpowiednio parametry czujnika oraz napięcie między jego elektrodami (na poziomie wyższym od minimalnego napięcia przebicia) można doprowadzić do tego, że wzrost ciśnienia w fali uderzeniowej powoduje przebicie między elektrodami czujnika. Zasada działania jest tu więc inna niż dla typowego czujnika jonizacyjnego, mimo że konstrukcja i sposób podłączenia są takie same.

Szczegóły konstrukcyjne czujników używanych w ZMCiG pokazane są na rys. 1. Na rys. 2 podano typowe charakterystyki tego czujnika (napięcie przebicia jako funkcja ciśnienia) dla pracy w powietrzu i argonie.



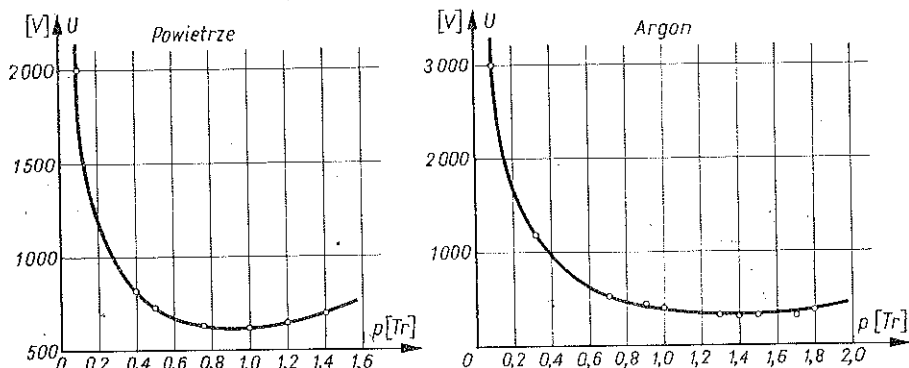
Rys. 1

Czujniki opisane powyżej posiadają szereg zalet i wad. Zaletami są w pierwszym rzędzie prostota budowy, prostota współpracującego z czujnikami układu elektronicznego, silne impulsy o krótkim czasie narastania (około 0,1 μ sek). Podstawową wadą jest opóźnienie sygnału w stosunku do momentu przejścia fali, zmieniające się w sposób przypadkowy, wykazujące tym większy rozrzut wartości, im niższe jest ciśnienie początkowe i niższa liczba Macha. Drugą, również istotną wadą jest niemożność stosowania czujników w pobliżu

pracującego działka elektronowego. Elektrony rozproszone z wiązki powodują jonizację gazu między elektrodami i przepływ prądu. Minimalna odległość osiągnięta eksperymentalnie wynosiła 0,5 m. Czujniki te nie mogą też znajdować się zbyt blisko siebie, gdyż zadziałanie jednego czujnika powoduje wtedy zadziałanie drugiego, niezależnie od położenia fali. Stwierdzono doświadczalnie, że odległość 0,5 m była wystarczająca. Poza tym czujniki wytwarzają bardzo silne pole elektromagnetyczne mogące zaburzyć pracę znajdującą się w pobliżu aparatury elektronicznej.

Dla zminimalizowania rozrzutu sygnałów należy pracować przy możliwie wysokim napięciu zasilania czujników, nie powodującym jednak przedwczesnych przebiegów. Wartość tego napięcia należy dla każdego warunków dobrać eksperymentalnie.

talnie. Dodatkowo dla prawidłowej pracy czujników potrzebna jest pewna niewielka wstępna jonizacja gazu między elektrodami. Na ogół dla jej uzyskania wystarcza przebiec na sąsiednim czujniku, w przypadku gdy pracuje ich więcej. Dlatego



Rys. 2

należy zawsze używać co najmniej o jeden czujnik więcej, niż to jest potrzebne ze względu na sam pomiar. Dodatkowy czujnik należy umieszczać przed czujnikami pomiarowymi.

Stwierdzono eksperymentalnie, że rozrzuty czasów zadziałania czujników mogą być zredukowane do kilku mikrosekund. Dla czujnika pierwszego z serii wynoszą one zawsze co najmniej kilkadziesiąt mikrosekund. W tabelicy 1 zamieszczono zestawienie napięć zasilania, przy których czujniki pracowały zadowolająco przy podanych warunkach eksperymentu.

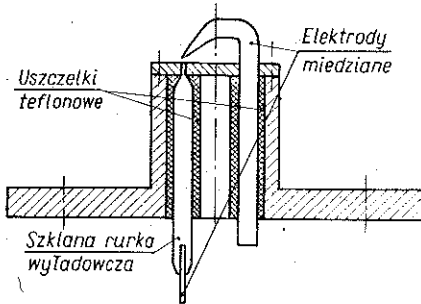
Tablica 1

Rodzaj gazu	Ciśnienie pocz. p_1 [Tr]	Liczba Macha M_s	Napięcie na czujnikach U [v]
Powietrze	0,05	~ 6	800
Powietrze	0,10	~ 6	800
Powietrze	0,25	~ 6	800
Azot	0,05	~ 3	1000
Argon	0,04	~ 3	800

4. CZUJNIKI Z WIĄZKĄ JONOWĄ

Próbe zastosowania czujników z wiązką jonową podjęto w związku z tym, że zostały one opisane w literaturze [5] jako czujniki dobrze nadające się do detekcji fali przy bardzo niskich ciśnieniach początkowych (od 0,5 do 5 Tr). Zasada ich działania jest następująca (rys. 3). Wewnątrz rurki szklanej zachodzi w gazie stałe wyładowanie typu jarzeniowego. Jony dodatnie, powstające w trakcie tego wyładowania, przelatują do wnętrza rury uderzeniowej przez otwór w katodzie. W rurze

uderzeniowej wiązka jonów dodatnich oddaje swój ładunek ujemnie naładowanej elektrodzie — kolektorowi jonów. Przejście fali uderzeniowej powoduje «zdmuchnięcie» wiązki jonów dodatnich, spadek prądu odbieranego przez kolektor jonów, w wyniku czego na kolektorze powstaje ujemny sygnał.



Rys. 3

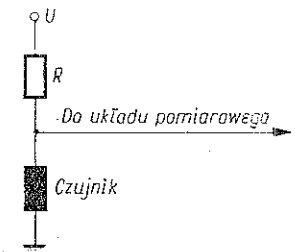
(w oryginalnej pracy [5] użyty był opór 1 M Ω). Daje to jednak w efekcie niedopuszczalne dla celów praktycznych wydłużenie czasu reakcji czujnika do wartości kilkudziesięciu mikrosekund lub więcej.

5. CZUJNIKI TEMPERATUROWE

Czujniki w postaci cienkiej warstewki metalu (platyny, złota, niklu — poniżej 1 μm grubości) nałożonej na izolator, najczęściej na szkło, i pracującej na zasadzie termometru oporowego są w rurach uderzeniowych stosowane od bardzo dawna (por. [6] i cytowaną tam literaturę). Ich zaletą jest pewność działania (niewystępowanie przypadkowych rozrzutów, jak np. przy czujnikach jonizacyjnych), nieczułość na wstrząsy; wadą — słabe sygnały, które w przypadku słabych fal uderzeniowych i niskich ciśnień mogą nie wychodzić poza poziom szumów własnych czujnika, związanych z przepływem prądu przez element oporowy (przykładową granicę stosowalności można określić jako $M_s=1,5$ przy $p_1=0,08 \text{ Tr}$).

Czujniki temperaturowe, stosowane jako detektory fali uderzeniowej, są z reguły umieszczane w rurze w taki sposób, że ich powierzchnia czuła jest elementem powierzchni wewnętrznej rury. Taki sposób umieszczenia powoduje najmniejsze zakłócenia przepływu. Typowy schemat podłączenia podany jest na rys. 4. Opór R włączony w szereg z czujnikiem powinien być duży w porównaniu z opornością czujnika, dzięki czemu prąd płynący przez czujnik jest prawie stały. Zmiany napięcia na czujniku są proporcjonalne do zmian jego oporności, co z kolei zapewnia najwyższą czułość urządzenia.

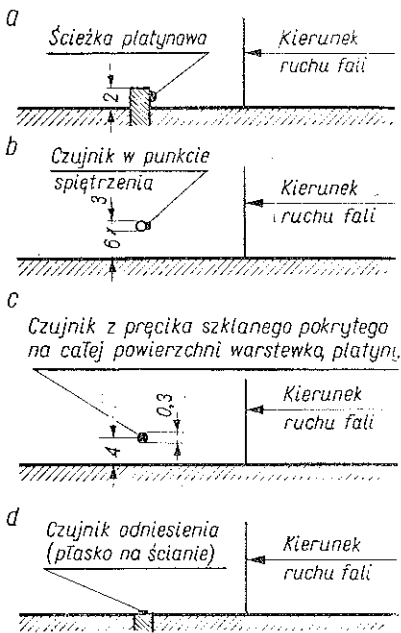
W czasie doświadczeń w ZMCiG stwierdzone zostało, że czujniki, jeżeli powierzchnia ich nie jest pokryta warstewką izolatora, to powinny być zasilane



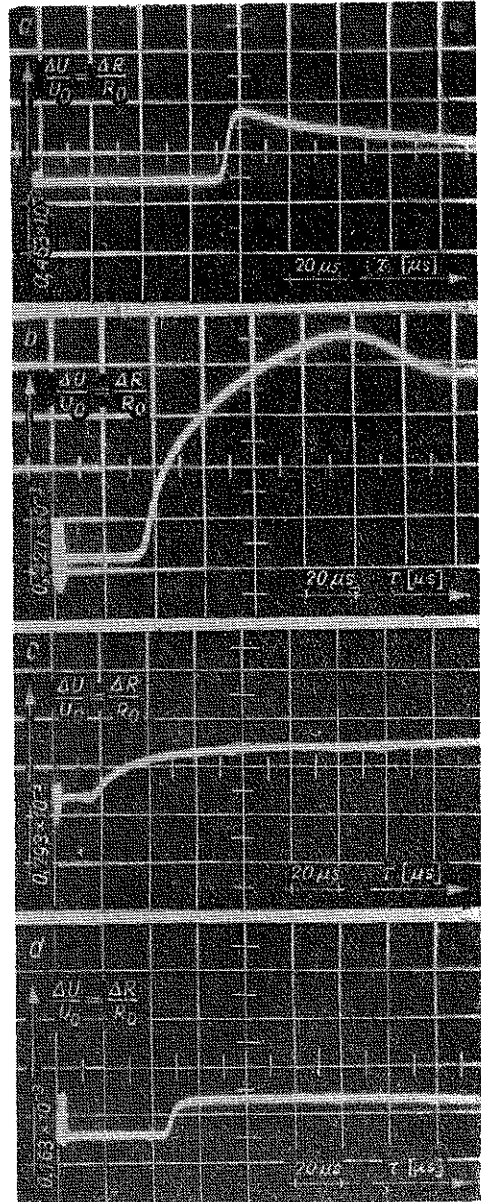
Rys. 4

napęciem ujemnym, dzięki czemu, w przypadku wystąpienia pewnej niewielkiej jonizacji gazu, elektrony są odpychane od powierzchni czulej i nie zakłócają pomiaru. W przypadku silnej jonizacji niewiele to pomaga i konieczne jest izolowanie czujników np. cienką warstwą SiO lub SiO₂ napylną na metal [7].

Doświadczenia przeprowadzone w ZMCiG miały na celu sprawdzenie, czy zastosowanie innej geometrii nie zwiększyłoby sygnału w sposób istotny dla pomiarów. Badano trzy rodzaje geometrii pokazane na rys. 5, porównując je z typowym czujni-



Rys. 5



Rys. 6

kiem umieszczonym płasko w ściance rury. Elementy czułe były we wszystkich przypadkach wykonane z platyny na podłożu szklanym, oporność ich wynosiła odpowiednio: dla czujnika umieszczonego płasko w ściance — 228 Ω , dla pierwszej geometrii — 200 Ω , dla drugiej — 217 Ω , wreszcie dla trzeciej 47 Ω . Doświadczenia wykonano w argonie przy liczbach Macha $M_s \approx 3,35$ i ciśnieniu początkowym około $5 \cdot 10^{-2}$ Tr, co odpowiadało średniej drodze swobodnej przed falą około 1 mm.

Na rys. 6 podane są typowe sygnały, uzyskane ze wszystkich badanych czujników. Widać z nich, że najkorzystniejszy jest czujnik typu pierwszego. Uzyskany z niego sygnał jest 2,5-krotnie silniejszy niż czujnika porównawczego (płaskiego) i ma czas narastania równy czasowi przejścia fali przez czujnik. Po upływie tego czasu charakter przebiegu napięcia zmienia się zdecydowanie, dzięki czemu nie jest możliwa pomyłka co do momentu przejścia fali.

Czujnik typu drugiego nie ma tej ostatniej zalety. Sygnał wychodzący z niego ma początkową fazę prawie taką samą jak sygnał z czujnika poprzedniego, później jednak następuje dalszy, dosyć powolny wzrost napięcia. W przypadku niedość dokładnego ustawienia poziomu wyzwiania układu pomiarowego, może to prowadzić do dużych błędów w określaniu chwili przejścia fali uderzeniowej. Dodatkowo czujnik typu drugiego, mając większe wymiary, silniej zakłóca przepływ w rurze.

Czujniki typu trzeciego dają sygnał o amplitudzie bliskiej czujnikowi odniesienia, za to o dłuższym czasie narastania; są więc zdecydowanie gorsze.

6. WNIOSKI

Z przytoczonych powyżej rozważań wynikają następujące wnioski:

1. Do detekcji niezbyt silnych fal przy wysokich gęstościach (ciśnienie początkowe powyżej 10 Tr) najwygodniejsze są czujniki ciśnieniowe typu piezoelektrycznego.

2. Do detekcji fal przy niskich gęstościach, w przypadku gdy maksymalna precyzja nie jest istotna, natomiast ważna jest jak największa prostota urządzenia, optymalnym rozwiązaniem są czujniki typu jonizacyjnego, opisane w p. 3.

3. W przypadku gdy przy niskiej gęstości istotna jest maksymalna precyzja przy równoczesnym niezaburzaniu przepływu, jedynym dobrym rozwiązaniem wydaje się klasyczny czujnik temperaturowy, umieszczony płasko na powierzchni ścianki. W przypadku gdy istotne jest zejście z gęstością i liczbą Macha do wartości tak niskich, że czujnik taki nie daje wystarczającego sygnału, można poprawić sytuację posługując się czujnikiem pokazanym na rys. 5a. Wiąże się to jednak niestety z wprowadzeniem pewnego zakłócenia przepływu, co nie zawsze jest dopuszczalne.

LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. Z. A. PIETRZYK, Z. A. WALENTA, *Zastosowanie czujników piezoelektrycznych z tytanianu baru do pomiaru szybkozmiennych ciśnień w rurze uderzeniowej*, Rozpr. Inżyn., 12, 1, 1964.
2. Z. A. WALENTA, T. T. RUDOWSKA, *Rura uderzeniowa, pomiary i wnioski*, Rozpr. Inżyn., 12, 3, 1964.

3. SHAO-CHI LIN, W. J. FYFE, *Low-density shock tube for chemical kinetics studies*, Physics of Fluid, 4, 2, 1961.
4. A. VON ENGEL, *Ionized gases*, Oxford 1955.
5. D. VENABLE, *Positive ion oscilloscope trigger for shock in low-density gases*, Rev. Sci. Inst., 26, 729, 1955.
6. Z. A. WALENTA, *Analogue networks for high heat-transfer rate measurements*, UTIAS Technical Note No. 84, 1964.
7. R. A. HARTUNIAN, R. L. VARWIG, *On thin-film heat-transfer measurements in shock tubes and shock tunnels*, The Physics of Fluids, 5, 2, 1962.

Резюме

ДАТЧИКИ ДЛЯ ДЕТЕКЦИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В УДАРНОЙ ТРУБЕ

Настоящая работа содержит обзор результатов экспериментов, связанных с детекцией ударных волн в ударных трубах. Исследованы следующие типы датчиков: давления, ионизационные, температурные и датчики с ионным пучком. Приведены параметры (форма и амплитуда сигнала) и диапазон применимости отдельных типов датчиков с особым учетом течений при низких плотностях.

SUMMARY

GAUGES FOR DETECTION OF SHOCK WAVE IN A SHOCK TUBE

The paper contains a list of results of experiments concerning detection of the shock waves in shock tubes. The pressure, ionization, temperature and ion beam detecting elements were investigated. The parameters (the shape and amplitude of the signal) and applicability range of each particular detector with the emphasis on the flow at low densities are presented.

POLSKA AKADEMIA NAUK
INSTYTUT PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI

Praca została złożona w Redakcji dnia 6 grudnia 1974 r.