

EFEKT PRZEJŚCIOWY PRZY PRZENIKANIU SŁABEJ FALI UDERZENIOWEJ PRZEZ  
ROZGAŁĘZIENIE PRZEWODÓW

PAWEŁ WIEWIÓRSKI (ŁÓDŹ)

Wykaz oznaczeń

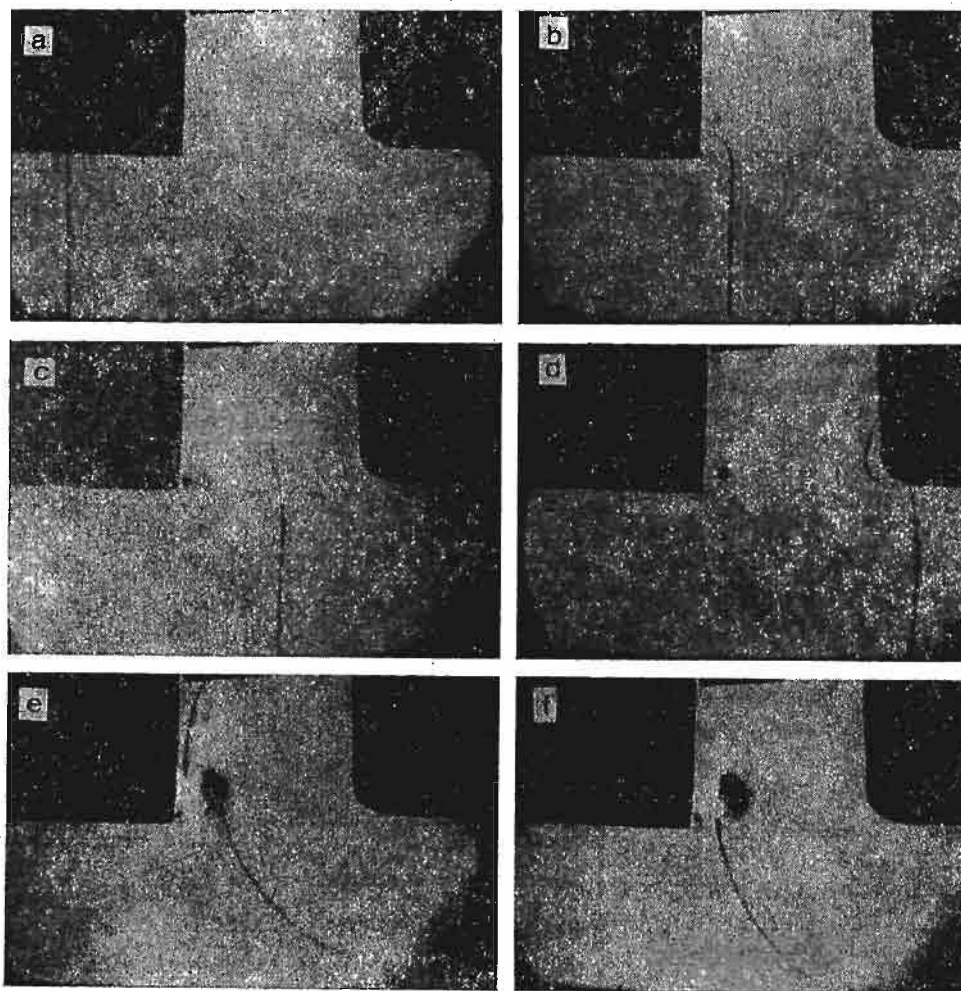
- $a$  — prędkość dźwięku,  
 $a_{0s}$  — prędkość dźwięku w gazie, który doznał przyrostu entropii i rozprężył się do ciśnienia  $p_0$ ,  
 $A$  — powierzchnia poprzecznego przekroju kanału,  
 $d$  — szerokość kanału przepływowego,  
 $M$  — liczba Macha,  
 $p$  — ciśnienie absolutne,  
 $\Delta p = p - p_0$  — nadciśnienie  
 $s$  — entropia,  
 $t$  — czas,  
 $u$  — prędkość przepływu,  
 $x$  — współrzędna,  
 $\alpha$  — wskaźnik (rys. 7),  
 $\delta$  — kąt rozgałęzienia (rys. 4),  
 $\kappa = 1, 4$  — wykładnik izentropy,  
indeksy:  
 $c$  — parametry stagnacji,  
 $i$  — parametry związane z falą padającą,  
 $t$  — parametry związane z falą przechodzącą,  
 $o$  — parametry odniesienia (przed zakłóceniem),  
1, 2, 3, — odnosi się do poszczególnych odgałęzień,  
,” — kolejne stany przepływu (rys. 3),  
 $p, z$  — parametry przed lub za nieruchomą falą uderzeniową (rys. 2c)

1. Wstęp

Przenikaniu fali uderzeniowej przez rozgałęzienie przewodów towarzyszy efekt przejściowy, którego skutki dają znać o sobie w dość znacznej odległości od rozgałęzienia [1]. Efekt ten obejmuje zjawiska formowania się płaskich frontów fal przechodzących i odbitych oraz formowania się wiru za narożem i jego oddziaływania na przepływ. Umiejętność precyzyjnego przewidywania natężenia fal przechodzących i odbitych jest ważna

z punktu widzenia dokładności wykonywania obliczeń przepływu nieustalonego w rurociągach maszyn tłokowych, itp: [2], [3]. W obliczeniach natężenia tych fal zaniędywano dotychczas istnienie tego efektu. Znanych jest kilka takich jednowymiarowych metod obliczeniowych [5, 6, 8]. Spośród nich, bardziej złożone metody dobrze przewidują rzeczywiste natężenia fal w dalszej odległości od rozgałęzienia; bezpośrednio w okolicach rozgałęzienia dobrze przewidują wartości ciśnienia dopiero po zniknięciu efektu przejściowego, natomiast źle przewidują natężenie fali pierwotnej. W pracy [2] zaproponowano metodę obliczania natężenia pierwotnych fal przechodzących, która uwzględnia dwuwymiarowość zjawisk falowych. Efekt przejściowy był badany [1] w zasadzie jedynie eksperymentalnie w zakresie słabych fal, analizę teoretyczną ograniczono tu do prześledzenia rozwoju w czasie fali o założonej strukturze i o danym początkowym kształcie.

Celem niniejszej pracy jest próba ilościowego opisu wyżej wspomnianego efektu przejściowego.

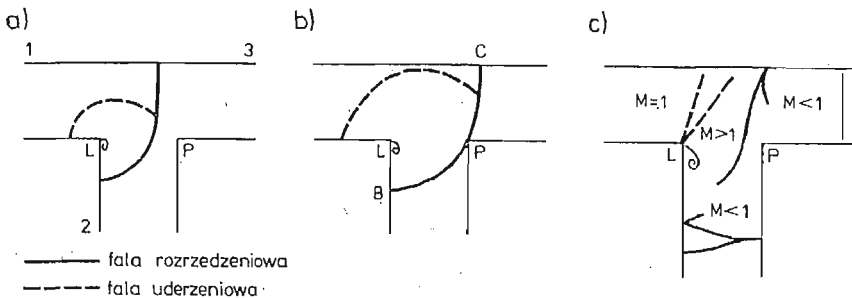


Rys. 1 — Obrazy wizualizacyjne przenikania fali uderzeniowej przez rozgałęzienie [9].

## 2. Obraz przepływu

Na rys. 1 przedstawionych jest kilka wybranych fotografii pokazujących historię przenikania słabej fali uderzeniowej przez rozgałęzienie przewodów. Wizualizacji dokonano [9] metodą smugową (Schlieren) używając światła błyskowego o czasie błysku ok.  $1 \mu\text{s}$  z regulowanym czasem opóźnienia błysku. Pozwoliło to zarejestrować stany przepływu co  $10 \mu\text{s}$ . Opis użytej aparatury można znaleźć w [5, 9].

Z analizy zdjęć smugowych wynika następujący obraz przepływu. Fala padająca napotyka nagłe zwiększenie przekroju kanału. Powoduje to powstanie na narożu  $L$  fali rozrzedzeniowej (niewidocznej na zdjęciu), która współdziałając z falą padającą powoduje jej ugięcie (rys. 1b i 2a). Z chwilą dotarcia ugiętej fali do przeciwległego naroża  $P$  (rys. 2b):



Rys. 2 — Niektóre fazy przenikania fali uderzeniowej *a, b* — przepływ poddźwiękowy,  $p_1/p_0 < 1,83$   
*c* — przepływ krytyczny i naddźwiękowy,  $p_1/p_0 > 1,83$ .

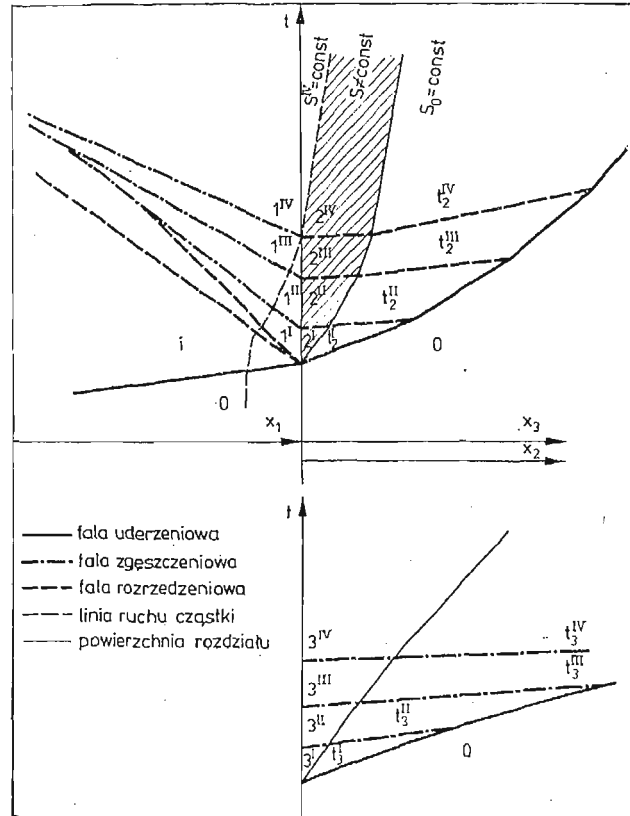
następuje jej podział na dwie fale pierwotne. Jednocześnie generuje się fala odbita od naroża  $P$  (rys. 1d), która przemieszcza się w górę przepływu (o ile przepływ jest poddźwiękowy) lub ustytuowuje się w rozgałęzieniu (przy przepływie krytycznym i naddźwiękowym) w obszarze wylotu przewodu 1, rys. 2c, [2]. Na poszczególnych zdjęciach widać także kolejne fazy rozwoju wiru za narożem  $L$ . Zmiana parametrów wywołana wzrostem oporów przepływu wywołuje falę rozrzedzeniową w przewodzie 2 oraz fale zagęszczeniowe w przewodach 1 i 3, które gonią fale pierwotne i zmieniają ich natężenie.

## 3. Teoretyczne przybliżenie

Jak wynika z obrazów wizualizacyjnych (własnych oraz zawartych w [2]), proces formowania się fal przechodzących, tj. kształtowania się płaskich frontów fal jest stosunkowo szybki i kończy się zasadniczo w odległości kilku średnic od rozgałęzienia. Dłużej trwa w odgałęzieniu bocznym, krócej w odgałęzieniu na wprost. Natomiast proces formowania się wiru za narożem jest stosunkowo powolny, trwa około 1 ms, (rys. 6, 7). W związku z tym fale informujące o zakończeniu rozwoju wiru doganiają fale pierwotne dopiero w odległości kilkudziesięciu średnic. Zjawisko to decyduje zatem o wielkości obszaru przepływu objętego stanem przejściowym.

Nasuwa się następujący (rys. 3) model przepływu: z chwilą osiągnięcia węzła rozgałęzienia przez falę padającą tworzą się pierwotne fale przechodzące w odgałęzieniach

2 i 3 i pierwotna fala odbita (rozrzedzeniowa) w odgałczeniu 1. Następuje „natychmiastowe” ukształtowanie się płaskich frontów fal pierwotnych. Pojawiający się w tym momencie wir za narożem rośnie i wywołuje ciągły wzrost oporów przepływu. Zmiana warunków przepływu w rozgałczeniu powoduje powstanie fal rozrzedzeniowych i zagęszczeniowych, goniących fale pierwotne i zmieniających ich natężenie.



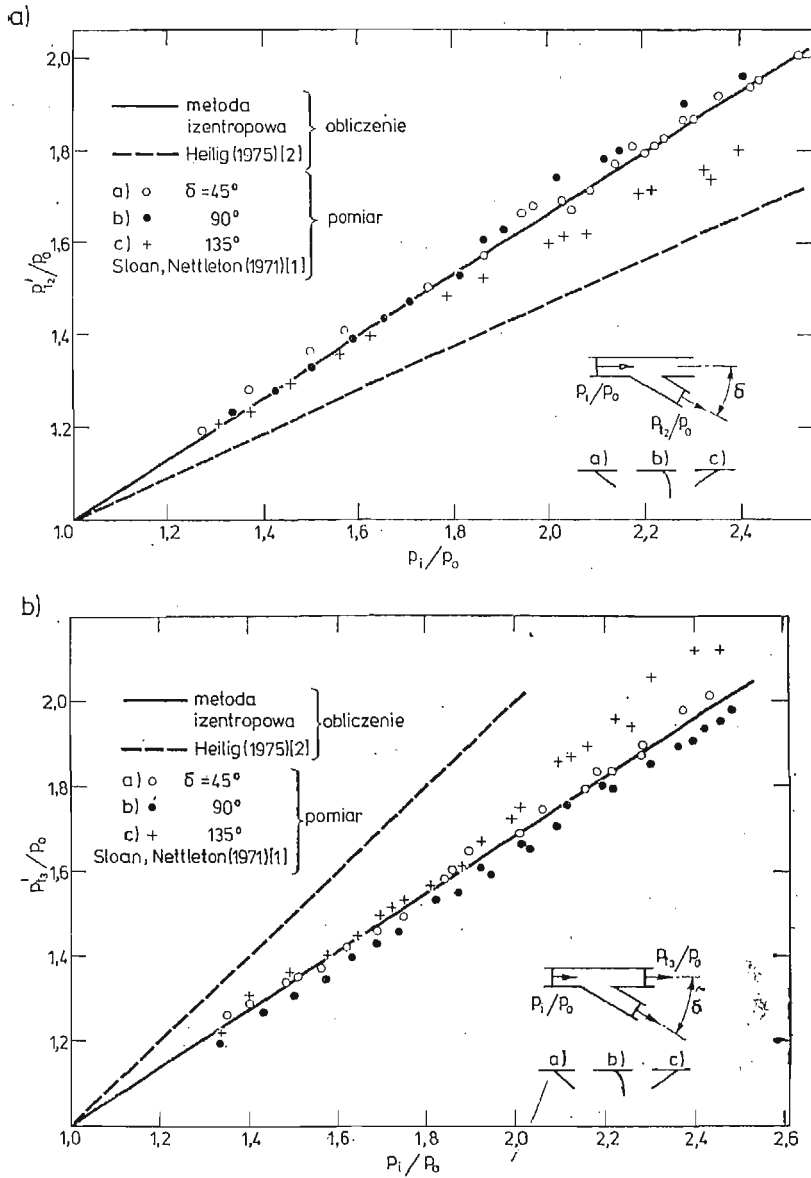
Rys. 3 — Schematyczny plan fal w płaszczyźnie  $t-x$

Należy wobec tego ilościowo przewidywać:

- natężenie fal pierwotnych,
- rozwój wiru na narożu,
- oddziaływanie rosnącego wiru na przepływ w obszarze za falami pierwotnymi.

**Natężenie fal pierwotnych.** Jak wynika z rys. 4 metoda uwzględniająca dwuwymiarowość zjawisk falowych [2] nie przewiduje dobrze natężenia pierwotnych fal przechodzących w zakresie słabych fal padających (dla silnych fal zgodność z danymi eksperymentalnymi jest dobra). Prawdopodobnie jest to spowodowane tym, że zaniedbano energię transportowaną przez falę odbitą od naroża  $P$ . Udział energetyczny tej fali w stosunku do energii transportowanej falą  $BP$  lub  $PC$  (rys. 2b) jest istotny w zakresie słabych fal padających.

Natomiast prosta, jednowymiarowa „metoda izentropowa” [4, 5] daje wyniki bardzo dobrze zgodne z danymi eksperymentalnymi podanymi w [1]. Metoda ta opiera się na

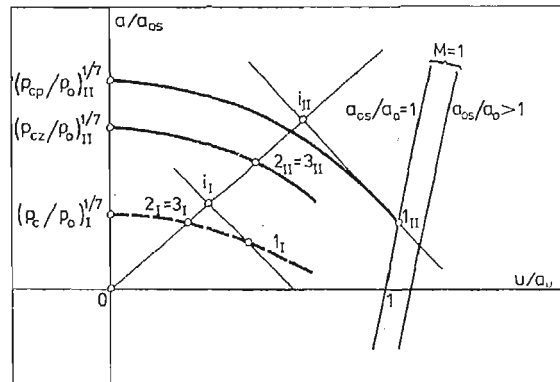


Rys. 4 — Natężenie fali pierwotnej w funkcji natężenia fali padającej: a — odgaślenie boczne, b — odgaślenie na wprost.

równaniach przepływu quasiustalonego: ciągłości, energii i izentropy. Równania te dotyczą chwili przepływu, kiedy fala odbita od naroża  $P$  wraca do przewodu 1, tzn. wtedy, kiedy gaz w odgaśleniu 1 „dowiaduje się” o istnieniu naroża  $P$ . Metoda ta nie uwzględnia oczywiście faktu różnych „ostrości” naroża  $P$ , ale daje to w zakresie słabych fal niewielką, rozbieżność z eksperymentem (rys. 4). Równania tej metody funkcjonują dla natężenia fali padającej  $p_i/p_0 \leq 1,83$  [6]. Dla większych natężeń fali padającej przepływ w obszarze

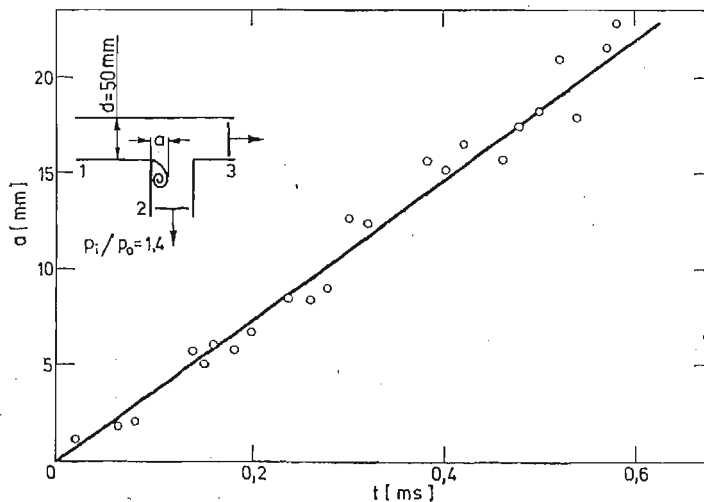
wylotowym przewodu i staje się krytyczny, a w dalszej części naddźwiękowy. Tworzy się nieruchoma fala uderzeniowa (rys. 2c), powodująca wzrost entropii i spadek ciśnienia całkowitego. Dalej przepływ jest traktowany jako izentropowy. Natężenie tej nieruchomej fali jest określane przez spadek ciśnienia całkowitego, wymagany dla spełnienia równania ciągłości. W ten sposób „metoda izentropowa” funkcjonuje także dla natężeń fali padającej  $p_i/p_0 > 1,83$ .

Na rys. 5 pokazano schematycznie sytuację obliczeniową na płaszczyźnie stanu gazu. Stan I leży w zakresie przepływu poddźwiękowego, stan II leży w zakresie przepływu krytycznego. Słabe fale uderzeniowe traktowane są jako fale izentropowe.

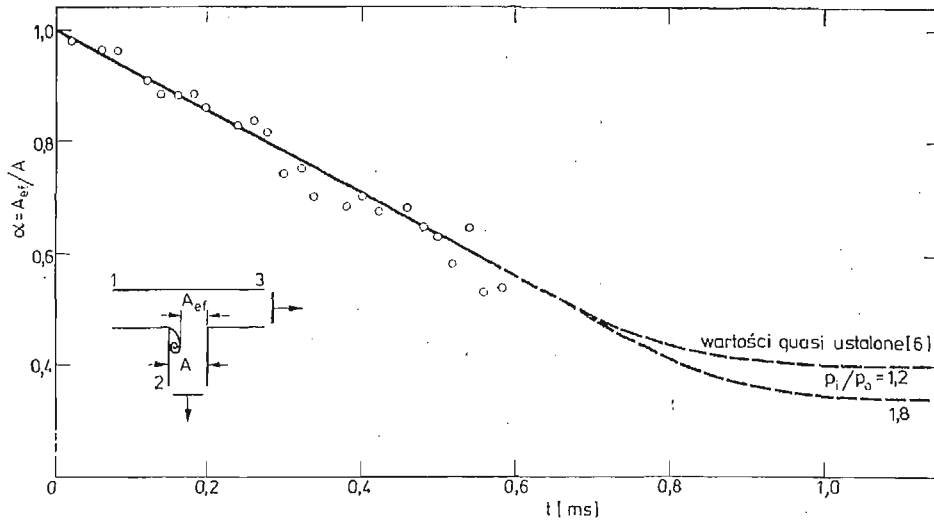


Rys. 5 — Schemat obliczenia natężenia fali pierwotnej

**Rozwój wiru na narożu.** Rys. 6 pokazuje zaobserwowany wzrost wymiaru wiru w czasie, zamierzony dla jednego natężenia fali padającej  $p_i/p_0 = 1,4$ . Natomiast rys. 7 pokazuje wynikającą z tego zmienność w czasie efektywnego przekroju przepływu w odgałęzieniu 2, mierzonego wskaźnikiem  $\alpha = A_{ef}/A$ . Zaznaczono tam także wartości quasiustalone wskaźnika [6].



Rys. 6 — Zmierzony wzrost wymiaru wiru.



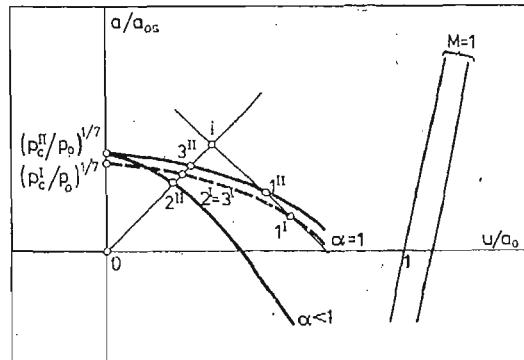
Rys. 7 — Przebieg wskaźnika  $\alpha$ .

Oddziaływanie wiru na przepływ za falami pierwotnymi. Odcinek przewodu 2, w którym następuje rozszerzenie strugi po przejściu przez przewężenie spowodowane istnieniem wiru jest w przybliżeniu równy wymiarowi wiru. Znając wzrost wymiaru wiru w określonym odcinku czasu (rys. 6) można oszacować, że relacja między członami równania pędu będzie miała postać:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} / \frac{\partial u}{\partial t} \approx \frac{u^2/d}{u/\Delta t} \cong 10.$$

Upoważnia to do stosowania równań przepływu quasiustalonego do obszaru przepływu w bezpośredniej bliskości węzła rozgałęzienia. Stwarza to sytuację analogiczną do napływu do rury przez przewężenie o zmiennym stopniu otwarcia [10, 11] z dodatkową komplikacją w postaci równania ciągłości, bilansującego strumień masy w poszczególnych przewodach. Zmiana stopnia otwarcia jest dana wskaźnikiem  $\alpha$  (rys. 4b).

Na rys. 8 pokazano schematycznie sytuację obliczeniową na płaszczyźnie stanu gazu: (') —  $\alpha = 1$  — wiru jeszcze nie ma, (") —  $\alpha < 1$  — widoczna zmiana parametrów prze-



Rys. 8 — Schemat obliczenia uwzględniającego istnienie wiru za narożem.

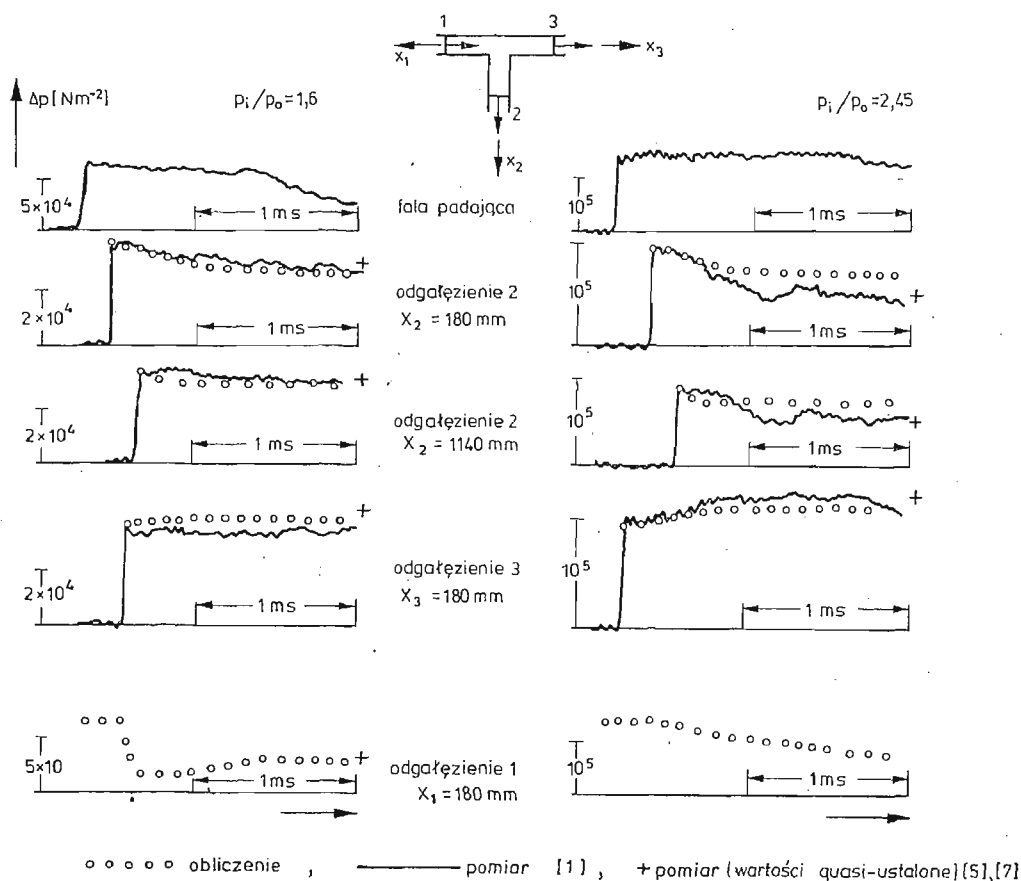
plywu, np.  $u'_2 < u'_2$ ,  $u'_3 > u'_3$ ,  $u'_1 < u'_1$ . Zmiana warunków przepływu w rozgałęzieniu oddziałuje na przepływ w obszarach za falami pierwotnymi. Obliczenia przeprowadzono metodą charakterystyk [10, 11]. Pokazuje to schematycznie rys. 3 i 8.

Ze względu na ograniczoną objętość artykułu nie podano szczegółowych wzorów obliczeniowych, które w zasadzie można znaleźć w cytowanej literaturze.

#### 4. Porównanie wyników obliczeń z dostępnymi danymi eksperymentalnymi

Wykorzystując metodę opisaną w rozdz. 3 wykonano obliczenia przepływu inicjowanej falą padającą o natężeniu  $p/p_0$  w zakresie od 1,4 do 2,45.

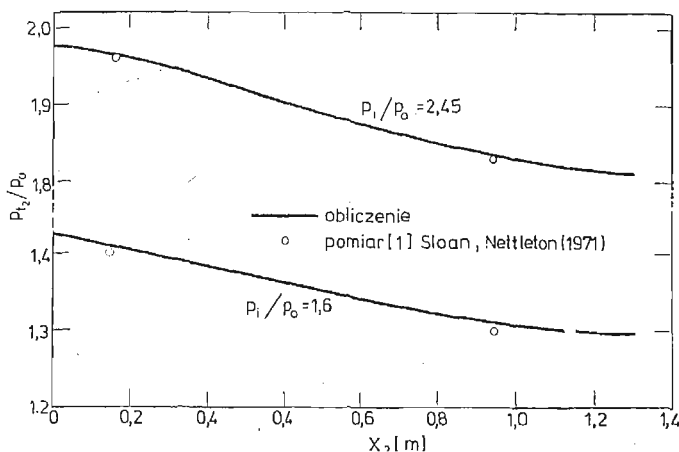
Na rys. 9 przedstawiono przykładowo obliczone przebiegi ciśnienia w czasie. Nanieśiono także wg [1] przebiegi ciśnienia zmierzone w przypadku rozgałęzienia o kącie  $\delta = 45^\circ$  (nie dysponowano danymi dla rozgałęzienia o kącie  $\delta = 90^\circ$  i o ostrych narożach). Zaznaczono także quasiustalone wartości ciśnienia (po zniknięciu efektu przejściowego) obserwowane doświadczalnie dla  $\delta = 90^\circ$  [5, 6, 7]. Widać dobrą zgodność przebiegów obliczonych i zmierzonych. Zgodność ta jest bardzo dobra dla mniejszego natężenia fali padającej.



Rys. 9 — Porównanie zmierzonych i obliczonych przebiegów ciśnienia  $\rightarrow t$ .



Na rys. 10 pokazano obliczony przebieg zmniejszania się natężenia czoła fali przechodzącej w odgałęzieniu bocznym w funkcji odległości od węzła rozgałęzienia. Dla porównania zaznaczono także wartości zmierzone dla rozgałęzienia o kącie  $\delta = 45^\circ$  [1]. Tu także widać bardzo dobrą zgodność. Z rys. 10 wynika także fakt, że zasięg obszaru objętego efektem przejściowym wynosi około 1,5 m i nie zależy od natężenia fali padającej.



Rys. 10 — Zmiana natężenia fali przechodzącej w odgałęzieniu 2 w funkcji odległości od węzła rozgałęzienia.

### 5. Wnioski

1. Przedstawiony model efektu przejściowego ujmuje te zjawiska, które mają decydujący wpływ na obraz ilościowy przepływu. W smukłych rurociągach ( $x/d > 6 \div 10$ ) dwuwymiarowość zjawisk falowych nie ma istotnego znaczenia ilościowego. O istnieniu zjawiska przejściowego decyduje rozwój wiru za narożem.

2. Zasięg obszaru objętego stanem przejściowym jest znaczny i wynosi co najmniej kilkadziesiąt średnic.

3. Wskazane są badania, mające na celu ustalenie wpływu natężenia fali padającej na rozwój wiru w czasie.

4. Efekt przejściowy powinien być uwzględniany w obliczeniach nie tylko w przypadku, kiedy falą padającą jest fala uderzeniowa, lecz także w przypadkach, kiedy czas narastania ciśnienia i prędkości gazu w fali padającej jest mały lub porównywalny z czasem rozwoju wiru za narożem. Czas ten jest rzędu 1 ms.

5. Istnieje możliwość zastosowania opisaney metody obliczeniowej do przepływów okresowo zmiennych, pod warunkiem uzyskania dodatkowych informacji o zachowaniu się wiru w tym typie przepływu.

### Literatura cytowana w tekście

1. S. A. SLOAN, M. A. NETTLETON. *The propagation of weak shock waves through junctions*. Preprints of the 8th Int. Shock Tube Symposium, London (1971).
2. W. H. HELIG, *Propagation of shock waves in various branched duct*. 10th Int. Shock Tube Symposium, Tokio (1975).

3. W. JUNGOWSKI, *Tłumienie pulsacji ciśnienia*. Arch. Bud. Masz. 1, XXV, 1978.
4. W. JUNGOWSKI, *Zmienny w czasie przepływ w kolektorze wylotowym silnika spalinowego*. Arch. Bud. Masz., z. 4, 1961.
5. P. WIEWIÓRSKI, *Przechodzenie słabych fal uderzeniowych przez rozgałęzienie przewodów rurowych*. Arch. Bud. Masz., (1979) (w druku).
6. P. WIEWIÓRSKI, *Nieustalony przepływ gazu przez rozgałęzienie przewodów*. Praca doktorska PŁ, (1977).
7. A. DADONE, M. PANDOLFI, F. TAMANINI, *Shock waves propagation in a straight duct with a side branch*. Preprints of the 8th Int. Shock Tube Symposium, London (1971).
8. A. G. HAMMITT, H. J. CARPENTER. AIAA Journ. 2, No. 12, 1964.
9. P. WIEWIÓRSKI, G. KOWALEWSKI, E. STARSKI, Arch. Prac Instytutu Maszyn Przepływowych PŁ, nr IMP-607, (1977).
10. W. JUNGOWSKI, *Podstawy dynamiki gazów*, Skrypt PW, Warszawa, (1965).
11. A. SHAPIRO, *The dynamics and thermodynamics of compressible fluid flow*. Vol. 2, Ronald Press, New York (1954).

## Резюме

ПЕРЕХОДНЫЙ ЭФФЕКТ ВО ВРЕМЯ ПРОНИКАНИЯ СЛАБОЙ УДАРНОЙ  
ВОЛНЫ ЧЕРЕЗ РАЗВЕТВЛЕНИЕ ТРУБОПРОВОДОВ

Проникание ударной волны через разветвление трубопроводов дает переходный эффект, который состоит из явления формирования плоских фронтов волн и развития углового вихря.

На основании визуализационных изображений предложена количественная модель переходного эффекта. Сделаны расчеты течения для нескольких напряженностей ударной волны (в пределах:  $1.4 \leq p_1/p_0 \leq 2.45$ ). Сопоставление результатов расчетов с доступными экспериментальными данными указывает пригодность и правильность принятой модели. Величина области переходного состояния зависит, главным образом, от умеренно медленного явления развития углового вихря.

## Summary

TRANSITIONAL EFFECT AT THE TRANSMISSION OF A WEAK SHOCK WAVE THROUGH  
A BRANCHING OF PIPES

Transmission of a shock wave through a branching of pipes is accompanied by transitional effect including phenomena of plane wave fronts formation and the phenomenon of a corner downstream vortex development. On the basis of visualisational images a quantitative model of transitional effect has been formulated. Calculations of the flow for some values of the incident wave strength (in the range:  $1.4 \leq p_1/p_0 \leq 2.45$ ) have been performed. The comparison of the results of calculations with the available experimental data indicates usability and correctness of the assumed model. Comparatively slow development of the corner downstream vortex affects mainly about the area of the transitional state. The described method can be applied for the calculation of unsteady gas flow in pipe system of piston engines and compressors and in other similar problems.

INSTYTUT MASZYN PRZEPŁYWOWYCH  
POLITECHNIKA ŁÓDZKA

Praca została złożona w Redakcji dnia 19 marca 1979 roku