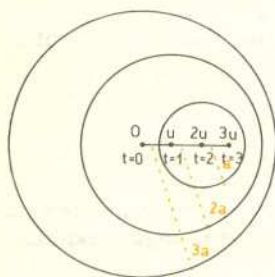


Czy strzelaliście kiedyś z papierowej torby napełnionej powietrzem? Huk wywołany takim strzałem nie daje się porównać z wystrzałem armatnim, potrafi jednak przstraszyć osoby zaskoczone. Dużo większy huk wywołują naddźwiękowe odrzutowce lecące z bardzo dużą prędkością. Takim hukiem daje o sobie znać w obu przypadkach fala uderzeniowa. Zanim przejdziemy do dokładniejszego omówienia zjawiska fali uderzeniowej, musimy powiedzieć kilka słów o ruchu ciała w powietrzu. Interesować nas będą ruchy szybkie, takie, przy których analizie należy brać pod uwagę ściśliwość powietrza. Niektórych Czytelników może to zdziwić. Przecież — powiecie — powietrze jest gazem, a więc jest ściśliwe! Tak, to prawda, ale przy rozważaniu ruchu ciał z małymi prędkościami nie popełnimy dużych błędów, jeśli zaniebamy ściśliwości powietrza. Zyskujemy przez to znaczne uproszczenia matematycznego opisu zjawiska. Oczywiście, pojęcia „mała” i „duża” prędkość są względne, można jednak przyjąć, że w normalnych warunkach prędkości rzędu 400 km/godz. są jeszcze „małe”, zaś rzędu 600 km/godz. są już „duże”.

Ważną rolę w badaniu przepływów ściśliwych odgrywa wielkość zwana prędkością dźwięku. Jest to prędkość, z jaką rozchodzą się małe zaburzenia ciśnienia w ośrodku ściśliwym. Dla danego gazu prędkość dźwięku zależy jedynie od temperatury bezwzględnej. Na przykład dla powietrza prędkość ta wynosi w normalnych warunkach 334 m/sek.

Rozważmy teraz ciało poruszające się w powietrzu ze stałą prędkością u , mniejszą od prędkości dźwięku a . Ciało to wywołuje w każdej chwili zaburzenia ciśnienia, które rozchodzą się w postaci fal sferycznych w powietrzu (czoło fali rozprzestrzenia się podobnie jak nadmuchiwana bańka mydlana). Na rys. 1 zaznaczone są położenia ciała w momentach $t = 0$ (punkt 0), $t = 1$ (ciało przebyło odległość równą u), $t = 2$ (ciało przebyło odległość $2u$) oraz $t = 3$ (ciało przebyło odległość $3u$). W chwili $t = 3$ zaburzenia wywołane przez ciało dotarły odpowiednio: na odległość $3a$ od punktu 0 — zaburzenie wywołane w chwili $t = 0$, na odległość $2a$ od punktu u — zaburzenie wywołane w chwili $t = 1$ oraz na odległość a od punktu $2u$ — zaburzenie wywołane w chwili $t = 2$. Czoła tych fal są zaznaczone na rysunku w postaci kół o odpowiednich średnicach (w rzeczywistości czoła fal są sferami).



Rys. 1

Podobny rysunek (rys. 2) można wykonać dla ciała poruszającego się z prędkością u większą od prędkości dźwięku a . W tym wypadku ciało wyprzedza czoło fali. Wszystkie fale znajdują się wewnątrz stożka (na rysunku wewnątrz kąta) o powierzchni stanowiącej granicę, do której mogą dotrzeć zaburzenia. Na zewnątrz stożka powietrze jest nie zaburzone przez poruszające się ciało.

Łatwo obliczyć kąt rozwarcia tego stożka. Z $\triangle OAB$ mamy $\sin \alpha = \frac{OA}{OB} = \frac{3a}{3u} = \frac{a}{u} = \frac{1}{M}$, gdzie

przez α oznaczyliśmy $\angle OAB$, zaś $M = \frac{u}{a}$ jest charakterystyczną wielkością bezwymiarową zwaną

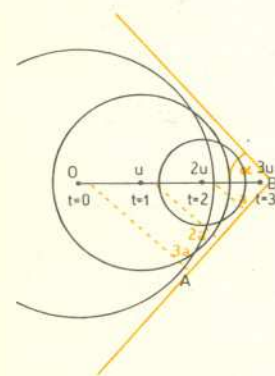
liczbą Macha. Zauważmy, że dla przepływów poddźwiękowych $M < 1$ ($u < a$), dla przepływów z prędkością dźwięku $M = 1$ ($u = a$) i dla naddźwiękowych $M > 1$ ($u > a$). Stożek styczny do czoła poszczególnych fal nazywa się stożkiem Macha, jego tworzące liniami Macha, zaś kąt α kątem Macha.

Łatwo wykonać odpowiedni rysunek dla przypadku ciała poruszającego się z prędkością dźwięku — czoła fal są teraz sferami stycznymi w jednym punkcie.

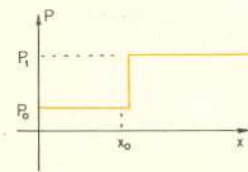
Dotychczas mówiliśmy o rozchodzeniu się małych zaburzeń w gazie. Przejdźmy teraz do dużych zaburzeń. Ciało poruszające się w powietrzu z dużą prędkością (np. pocisk czy samolot naddźwiękowy) wywołuje w powietrzu fale ciśnieniowe o dużej intensywności. Podobnie, gwałtowny wybuch wywołuje duże zgęszczenie powietrza (strzał z torby papierowej możemy uważać już za duże zaburzenie) — przynajmniej w pobliżu miejsca strzału. Tego typu zaburzenia rozchodzą się z prędkością większą od prędkości dźwięku. Zwróćmy uwagę, że nazwa „prędkość dźwięku” została zastrzeżona dla prędkości rozchodzenia się małych zaburzeń. Duże zaburzenia, charakteryzujące się też swojego rodzaju dźwiękiem — hukiem — rozchodzą się już z inną prędkością. Duże zaburzenia, w których skok ciśnienia jest duży, nazywają się falami uderzeniowymi.

Zmiany ciśnienia w fali uderzeniowej są rzędu atmosfer i zachodzą na drodze bardzo małej, rzędu kilku dróg swobodnych cząsteczek gazu, w odróżnieniu od zmian ciśnienia w falach dźwiękowych, towarzyszących mowie, które są rzędu jednej milionowej ciśnienia atmosferycznego. Na czole fali uderzeniowej rośnie skokowo nie tylko ciśnienie, ale rosną także inne wielkości określające stan gazu, a więc jego gęstość i temperatura, natomiast prędkość gazu maleje praktycznie skokowo. Typowy przebieg ciśnienia w przepływie z falą uderzeniową przedstawiony jest na rys. 3. Wykres dotyczy tej chwili, w której czoło fali uderzeniowej znajduje się w punkcie x_0 . Ciśnienie rośnie od wartości p_0 do p_1 skokowo.

Wzrost gęstości na czole fali uderzeniowej umożliwia uzyskiwanie jej obrazu na fotografii. Najczęściej wykorzystuje się tu metodę „Schlieren”, która z grubsza da się opisać następująco. Równoległa wiązka promieni świetlnych, przechodząca przez ośrodek o jednorodnej gęstości, pozostaje równoległa i oświetla ekran jednostajnie. Niejednorodność gęstości ośrodka powoduje odchylenie równoległej wiązki. Jeśli odciąć teraz wiązkę promieni padających na ekran ostrą krawędzią, to na ekranie ukaże się ciemniejszy lub jaśniejszy obraz niejednorodności, zależnie od tego, czy odchylny promień zostanie zatrzymany przez ostrze, czy przejdzie ponad nim. Oczywiście urządzenia służące do fotografowania takich obrazów niejednorodności są



Rys. 2



Rys. 3

odpowiednio złożone, szczególnie w przypadku fotografii kolorowej. Zdjęcia fal uderzeniowych, wywołanych przez lecący pocisk, reprodukowane na okładce były szczególnie trudne do uzyskania, gdyż czas eksplozji był tu bardzo krótki (0,3 mikrosekundy). Lampa błyskowa musiała mieć odpowiednio wysoką moc, aby prawidłowo naświetlić kolorową błonę (moc lampy 20 000 kW). Na zdjęciach fale uderzeniowe są widoczne jako ciemne smugi odchodzące skośnie od pocisku. Posłużymy się modelem ilustrującym mechanizm powstawania fali uderzeniowej. W modelu tym rozpatrzmy ruch samochodów na autostradzie. Wyobraźmy sobie sznur samochodów jadących z dużą prędkością. Pierwszy samochód zaczyna nagle ostro hamować przed przeszkodą na autostradzie. Jeśli samochody jadą tak szybko, że prędkość reakcji kierowców nie pozwoli im w porę włączyć hamulców, to wytworzy się nagle zgęszczenie samochodów — gigantyczna kraksa. Przetłumaczmy teraz tę katastrofę na język fal uderzeniowych. Samochody to cząsteczki powietrza. Przeszkoda na szosie to ciało opływane przez powietrze. Prędkość reakcji kierowców to prędkość dźwięku. Nagle zgęszczenie samochodów to fala uderzeniowa. Oczywiście prędkość samochodów jest większa od „prędkości dźwięku”.

Bardzo ciekawie przedstawiają się fale uderzeniowe w matematycznym opisie przepływu gazu. Jeśli nie uwzględniamy lepkości gazu, to wśród rozwiązań opisujących ruch tego gazu pojawiają się rozwiązania nieciągłe odpowiadające falom uderzeniowym. Jeśli uwzględnimy lepkość gazu, to falom uderzeniowym odpowiadają już rozwiązania ciągłe, dające jednak bardzo szybkie zmiany wielkości opisujących stan gazu.

Wydaje się, że strzelając z torby wypełnionej powietrzem nie myśleliście o tym, ile rozmaitych problemów, z których jedynie drobną część tu omówiliśmy, kryje się w tym zjawisku.

Czy można zobaczyć strumień powietrza opływający przeszkodę, bez korzystania z dymu, pyłu lub innych widzialnych zawiesin unoszących się z wiatrem? Powietrze nieruchome jest praktycznie przezroczyste. Powietrze unoszące się nad ogniskiem jest również przezroczyste, ale można je zobaczyć — dostrzec jego drganie i falowanie.

Warstwy cieplejsze są rzadsze, mają inne właściwości optyczne, inaczej załamują światło aniżeli cięższe, gęstsze warstwy chłodniejsze. Powietrze opływające przeszkodę ulega w jednych miejscach zagęszczeniu, a w innych rozrzedzeniu, a więc przestaje być ośrodkiem jednorodnym optycznie. Zmiany współczynnika załamania mogą być bardzo niewielkie, ale te właśnie różnice pozwalają dostrzec lub raczej zarejestrować na kliszy fotograficznej ruch różnych warstw powietrza. W badaniach tego typu, szczególnie ważnych w tunelach aerodynamicznych, stosuje się między innymi metodę smug (z niemiecka metoda Schlieren) — przy pomocy interferometru smugowego. Rysunek ilustruje zasadę działania przyrządu. Światło ze szczeliny 1, umieszczonej w ognisku soczewki 2, przechodzi przez obszar badany (1) i jest ogniskowane przez soczewkę 3 w jej płaszczyźnie ogniskowej. Obraz szczeliny przesłania częściowo ostrze 4. Na kliszy fotograficznej 5 otrzymujemy jednorodne oświetlenie.

Jeżeli w obszarze badanym znajduje się niejednorodność optyczna, na przykład zagęszczenie powietrza, to promień (narysowany kolorem) ulegnie odchyleniu. Zależnie od kierunku odchylenia obraz na kliszy ulegnie w określonym obszarze zaciemnieniu lub rozjaśnieniu. Klisza fotograficzna zarejestruje obraz złożony z obszarów jasnych i ciemnych, odpowiadających rozkładowi niejednorodności w obszarze badanym. Analiza obrazu nie pozwala stwierdzić, czy niejednorodność odpowiada zagęszczeniu powietrza, czy też jego rozrzedzeniu.

Niejednoznaczność tę usunięto wprowadzając cztery szczeliny ułożone na brzegach kwadratu i emitujące światło w czterech barwach. Cztery odpowiednio ustawione ostrza odcinają połowę światła z każdej szczeliny. Wprowadzenie do badanego obszaru niejednorodności odchyła promienie czterech barw, a z rozkładu kolorów na obrazie można wnioskować o rozkładzie zagęszczeń i rozrzedzeń. Fotografia barwna wymaga stosunkowo długich ekspozycji i dlatego opisaną technikę stosowano przede wszystkim do procesów stacjonarnych. Wprowadzenie do badań powietrznej lampy błyskowej, w której moc 20 megawatów wyzwala jest w okresie 0,3 mikrosekundy, umożliwiło rejestrowanie procesów bardzo krótkotrwałych.

Na pierwszej i ostatniej stronie okładki zamieszczamy cztery zdjęcia krótkotrwałych zjawisk. Na stronie IV z lewej zdjęcie pocisku przebijającego bańkę mydlaną, a na stronie I, pocisk przechodzący przez płomień świecy. W obu przypadkach widoczna jest fala uderzeniowa (patrz poprzedni artykuł). Zdjęcie na stronie IV okładki z prawej pokazuje falę uderzeniową rozchodzącą się w wodzie w wyniku wyładowania elektrycznego. Prędkość fali wynosi 1800 m/s. Ostatnie zdjęcie pokazuje wiry wokół skrzydła wiatraczka kręcącego się z prędkością 1200 obrotów na minutę.

T. H.

(Zdjęcia na podstawie «Scientific American», tom 231 (1974), nr 2)



Czy można zobaczyć wiatr?

