

Czy turbulencje są niebezpieczne?

Marta Wacławczyk

Zapewne niektórym z czytelników zdarzyło się już (lub zdarzy) lecieć samolotem. Są osoby, które uwielbiają takie podróże, inni przeciwnie, czują się nieswojo. Podczas lotu może zdarzyć się dość nieprzyjemna sytuacja. To wtedy, kiedy pilot mówi, że samolot wlatuje w obszar turbulencji i prosi o zapięcie pasów. Pasażerowie mogą wówczas odczuwać nieprzyjemne wstrząsy. Pytanie jednak czy jest się czego bać? Czy taka sytuacja jest niebezpieczna oraz czym właściwie są turbulencje? Najpierw spróbujemy odpowiedzieć na to drugie pytanie.

Turbulencją zajmował się już włoski renesansowy malarz i uczonek Leonardo da Vinci. Próbował on zrozumieć badane zjawisko fizyczne poprzez obserwację jego szczegółów i ich odwzorowywanie. Kiedy przeanalizujemy jego szkice „O naturze wody” (Rys 1) zauważymy, że turbulencja jest pewnym rodzajem przepływu, który charakteryzuje się burzliwością. Turbulencja nie jest więc związana jedynie z lotami samolotowymi.

Co to jest turbulencja?

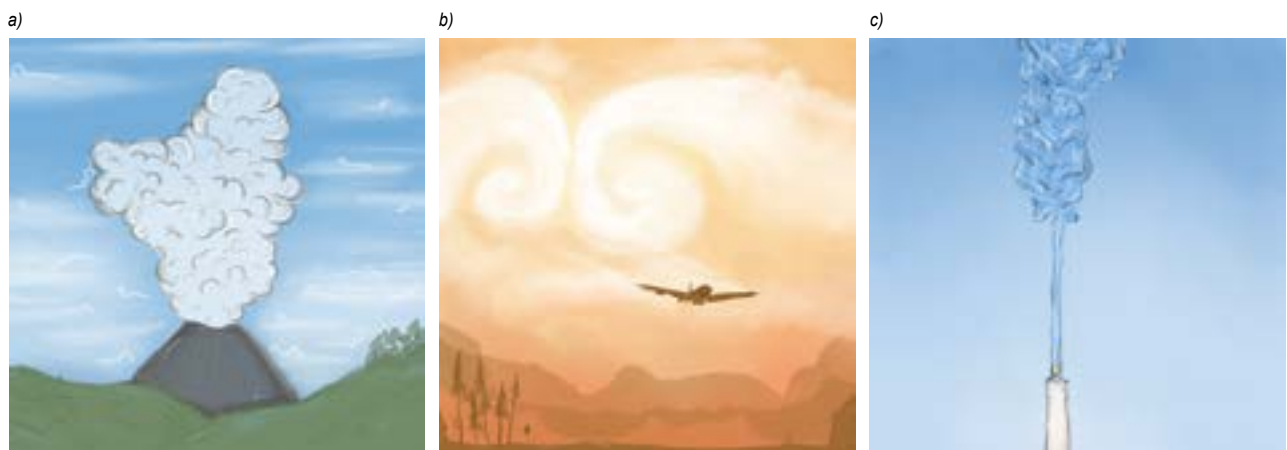
Turbulencja to nieregularny, burzliwy ruch płynu (czyli np. powietrza lub wody). Ruch turbulentny zaobserwować możemy na różnych skalach. Występuje ona np. w atmosferze, w chmurach, generuje ją poruszający się pojazd lub samolot. Turbulentny jest między innymi ślad (kilwater) za płynącym statkiem, turbulencja generowana jest również pod wpływem sił wyporu np. w ogrzonym powietrzu w pobliżu palącej się świeczki (Rys. 2).

Turbulencję można zdefiniować poprzez pewien zespół jej cech. Pierwszą jest nieuporządkowanie, chaotyczność i wrażliwość na zaburzenia. Inną cechą jest losowa zmienność w czasie i przestrzeni wszystkich parametrów opisujących przepływ. Można to zaobserwować na obrazie i animacji^[2] przedstawiającej turbulencje na granicy dwóch strug płynu o różnej prędkości. Początkowo regularna struktura wirowa deformuje się i po pewnym czasie obraz staje się chaotyczny.



Rys. 1. Leonardo da Vinci, „Notatki o naturze wody”. Domena publiczna, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=59577>

Poza tym cechą turbulencji jest występowanie szerokiego zakresu wirów o różnych kształtach i rozmiarach, które oddziałują ze sobą w skomplikowany sposób. Inną cechą jest intensyfikacja procesów transportu, co znaczy, że zjawiska takie jak mieszanie zachodzą bardzo szybko. Aby się o tym przekonać warto przeprowadzić proste doświadczenie (patrz Rys. 4). Do talerza waliśmy mleko oraz kolorowe barwniki. Za mieszadło posłużyła elektryczna szczoteczka do zębów. Po pewnym czasie dało się



Rys. 2. Przepływy turbulencje a) w atmosferze, b) za samolotem (widoczny jest zrywający się wir wierzchołkowy), c) w pobliżu palącej się świecy. Autor: Zofia Wacławczyk

zidentyfikować tworzące się struktury wirowe. Zwiększały one szybkość mieszania się kolorów, tak, że po dość krótkim czasie otrzymaliśmy płyn o jednolitej barwie.

Bardzo znanym eksperymentem dotyczącym turbulencji było doświadczenie wykonane przez Osborna Reynoldsa (1842-1912). Badał on przepływ wody, do której wprowadzał barwnik, w rurze. Przy pewnych, niskich prędkościach przepływu wody, struga barwnika pozostawała regularna. Taki regularny przepływ nazywamy przepływem laminarnym. Przy zwiększaniu prędkości przepływu wody, w pewnym momencie struga zaczynała zmieniać swój kształt (turbulizować się). Barwnik bardzo szybko mieszał się z wodą. Do opisu wyników eksperymentów O. Reynolds użył pewnej bezwymiarowej liczby dziś nazywanej liczbą Reynoldsa. Jest to iloczyn średnicy rury d , prędkości przepływu w osi rury U , podzielony przez wartość lepkości płynu ν .

$$Re = UL / \nu$$

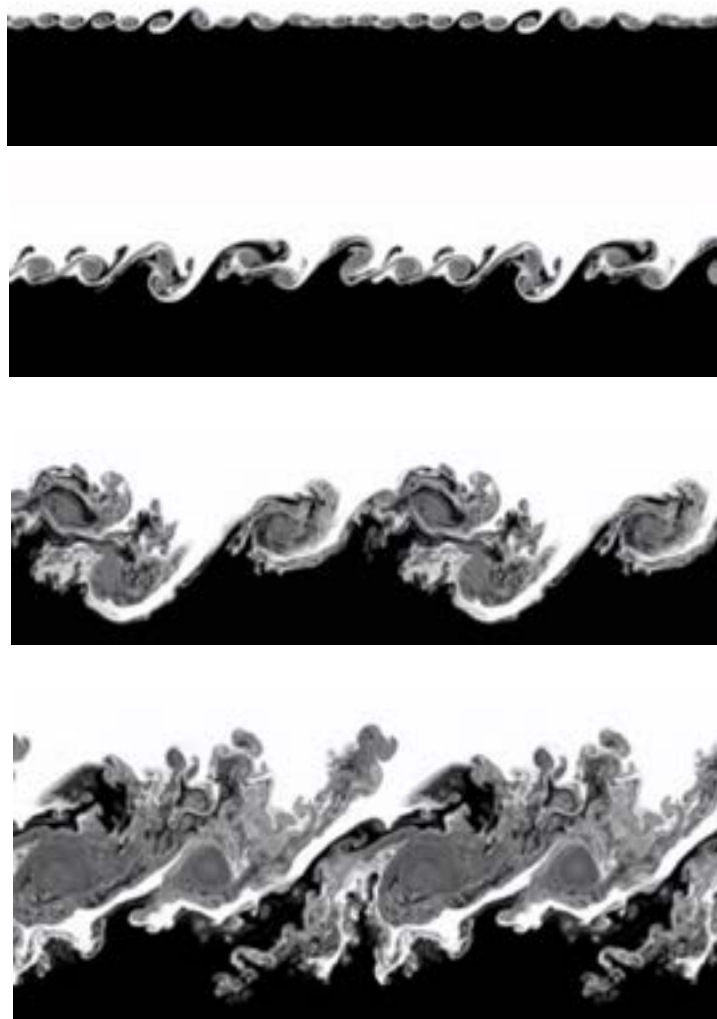
Okazało się, że charakter przepływu zależy od wartości tej liczby. Jeżeli $Re < 2300$ obserwowano przepływ laminarny, przy $2300 < Re < 4000$ przepływ był przejściowy (czasem laminarny, a czasem turbulentny), w końcu w przypadku $Re > 4000$ występował przepływ turbulentny. Trzeba tu zauważyć, że im większa średnica rury oraz im większa prędkość, tym większa jest liczba Reynoldsa. Z lepkością z kolei jest odwrotnie, im jest ona większa, tym mniejsza jest liczba Reynoldsa. Dlatego przepływy bardzo lepkich płynów, takich jak np. miód, rzadko są turbulentne. Jak widać istnieją tu dwa przeciwstawne mechanizmy, jeden związany z bezwładnością, drugi z lepkością. Jeśli większa jest bezwładność, przepływ turbulizuje się, gdy z kolei przeważą mechanizmy związane z lepkością, przepływ będzie laminarny.

Opisem przepływów turbulentnych zajmowali się między innymi dwaj sławni uczeni Lewis Fry Richardson (1881-1953) oraz Andrey Nikolaevich Kolmogorow (1903-1987). Zaproponowali oni pojęcie kaskady wirów. Lewis Richardson napisał nawet na ten temat krótki wiersz, w którym pisał, jak duże wiry „karmią” mniejsze, te z kolei jeszcze mniejsze i tak dalej, aż do lepkości:

*„Big whirls have little whirls,
That feed on their velocity
And little whirls have lesser whirls
And so on to viscosity
(in the molecular sense)”.*

Znaczy to, że w turbulencji występuje zjawisko przekazywania energii kinetycznej (energii ruchu) od dużych do coraz mniejszych struktur wirowych, aż w końcu na najmniejszych wirach energia kinetyczna zamieniona zostaje, pod wpływem lepkości w energię ciepłą.

Naukowcy i inżynierowie chcą przewidywać jak będzie wyglądał przepływ turbulentny (np. opływ wokół budynku) za pomocą równań i praw fizycznych. Równania te można rozwiązywać za pomocą odpowiednich programów komputerowych numerycznej mechaniki płynów. W tym celu przestrzeń obliczeniową pokrywa się siatką



Rys. 3. Wybrane sekwencje animacji przedstawiającej niestabilność Kelvina-Helmholza (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kelvin-Helmholtz_Instability.ogv) KHI.gif: Bdubb12 derivative work: – raeky (talk | edits), domena publiczna, Wikimedia Commons



Rys 4. Mieszanie barwników na talerzu (fot. własna)

(czyli dyskretyzuje się), a wyniki rozwiązania równań ruchu płynu otrzymuje się w każdym węzle (lub w każdym centrum) oczka siatki. Pozwala to na przykład przewidzieć, w przybliżeniu, jaki będzie współczynnik oporu danego modelu samochodu bez konieczności wykonywania kosztownych doświadczeń w tunelu aerodynamicznym.



Rys. 5. Autor: Zofia Waclawczyk

Ponieważ symulacje numeryczne całego zakresu struktur wirowych i oddziaływań między nimi są w tej chwili niemożliwe, ze względu na brak dostępnych mocy obliczeniowych, uczeni i inżynierowie polegać muszą na pewnych modelach (przybliżeniach) i narzędziach statystyki. Wiele współczesnych prac badawczych poświęconych jest również zagadnieniom teorii turbulencji. Prawdopodobnie jednak znalezienie jednego, uniwersalnego wzoru opisującego zależności między parametrami przepływów turbulentnych nie jest możliwe, ponieważ przepływy takie są bardzo skomplikowane.

Jak powstaje turbulencja?

Wywołać ją mogą istniejące w przepływie różnice (czyli gradienty) prędkości. Występują one w przypadku przepływu w rurze, gdzie prędkość na ścianie wynosi zero, a jej wartość w osi rury jest największa. Ta zmiana prędkości, jeśli będzie odpowiednio duża, spowoduje powstanie turbulencji. Innym przykładem jest wspomniana już niestabilność Kelvina-Helmholza, gdzie dwie, równoległe strugi płynu poruszają się z różnymi prędkościami. W miejscu ich zetknięcia powstają turbulencje wirowe. Turbulencja powstaje również w obecności sił wyporu, czyli w obecności różnic gęstości. Ogrzewanie wody np. w garnku powoduje powstanie ruchów termicznych, cieplejsza woda w pobliżu dna ma mniejszą gęstość, zaczyna więc unosić się do góry, powodując powstanie ruchów wirowych.

Skąd biorą się turbulencje w atmosferze? Kiedy słońce ogrzewa powierzchnię ziemi, cieplejsze powietrze unosi się do góry tworząc turbulentną atmosferyczną warstwę graniczną. Dodatkowo, jeśli powietrze jest wilgotne i podczas unoszenia ulega schłodzeniu, wtedy na pewnej wysokości para wodna zaczyna się skraplać tworząc chmurę. Podczas skraplania wydziela się ciepło, co dodatkowo „turbulizuje” powietrze. Turbulencja jest bardzo silna w chmurach burzowych typu „cumulonimbus”. Poza tym zdarzają się potencjalnie niebezpieczne turbulencje czystego nieba (ang. Clear Air Turbulence - CAT). W przeciwieństwie do chmur, nie widać ich na radarach. Turbulencja czystego nieba może powstać np. w pobliżu chmur burzowych, blisko masywów górskich, ale najczęściej wywołują ją obecne w atmosferze tzw. prądy strumieniowe. Intensywna turbulencja występuje również w śladzie za lecącym samolotem (podobnie jak ma to miejsce w przypadku płynącego po wodzie statku).

Z punktu widzenia pasażerów samolotu turbulencje można stopniować. Turbulencje „lekkie” to takie, które



Rys. 6. Autor: Zofia Waclawczyk

powodują lekkie drgania samolotu. Przy turbulencjach „średnich” pasażerowie odczuwają duży dyskomfort i często zaczynają krzyczeć. „Silne” turbulencje mogą spowodować krótkotrwałą utratę sterowności samolotu. W końcu turbulencje „ekstremalne” to takie, przy których pilot traci kontrolę nad samolotem oraz które mogą prowadzić do zniszczenia elementów poszycia. Turbulencje „ekstremalne” występują jednak tylko w centralnej części najsilniejszych chmur burzowych. Piloci omijają takie chmury z daleka. Poza tym, nowoczesne samoloty mogą wytrzymać nawet ciężkie wstrząsy.

Co robią piloci, aby poradzić sobie z turbulencjami?

Przede wszystkim, jak już wspomniano, omijają widoczne na radarach chmury burzowe. Poza tym studiują mapę pogody i widzą gdzie występują prądy strumieniowe, czyli gdzie potencjalnie napotkać można turbulencje czystego nieba (CAT). Piloci informują się wzajemnie o miejscach wystąpienia CAT. Aby uniknąć turbulencji w śladzie za innym samolotem, maszyny latają, lądują i startują w dużej odległości od siebie. Jeśli mimo tego samolot wleci w obszar turbulencji, np. przelatując przez chmurę, włącza się sygnalizacja „zapiąć pasy”. Przy silniejszych wstrząsach pilot będzie starał się wylecieć z obszaru turbulencji, zmniejszyć ewentualnie prędkość do takiej, przy której turbulencje są mniej niebezpieczne dla samolotu oraz odpowiednio zmienić ustawienia autopilota, aby nie stracić kontroli nad samolotem.

Turbulencje w czasie lotu to najczęściej turbulencje „lekkie” lub „średnie”. Mimo, że powodują dyskomfort, nie są niebezpieczne dla samolotu. Często jednak zdarza się, że nieprzyjęci pasami pasażerowie i załoga doznają dotkliwych obrażeń i z tym właśnie wiąże się największe zagrożenie. Aby go uniknąć warto pozostawić pasy zapięte, najlepiej podczas całego lotu. Jeśli to możliwe, dobrze jest również kupić miejsca w centrum samolotu, blisko jego skrzydeł. Tam turbulencje będą mniej odczuwalne.

Marta Waclawczyk
Wydział Fizyki UW

ŹRÓDŁA:

- [1] J. Pozorski „Zagadnienia turbulencji w mechanice płynów” Zeszyty naukowe IMP PAN
- [2] Animacja przedstawiająca niestabilność Kelvina-Helmholza (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kelvin-Helmholtz_Instability.ogg) KHI.gif: Bdubb12derivative work: -raeky (talk | edits), domena publiczna, Wikimedia Commons
- [3] Podcast: When is Turbulence DANGEROUS?! https://www.youtube.com/watch?v=EuLURmITq_E&t=0s