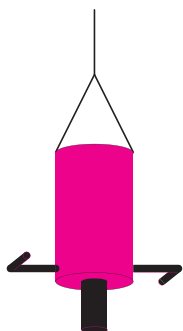
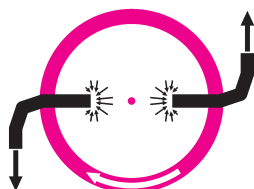


Obserwując wirujące na trawnikach spryskiwacze do trawy, nie mamy trudności z wyjaśnieniem, dlaczego i w którą stronę spryskiwacz się kręci, gdy wylewa się z niego woda. Co jednak się stanie, jeśli urządzenie zatopimy i zaczniemy zasysać przez nie wodę? Jest to spopularyzowany przez Feynmana „problem odwrotnego spryskiwacza”. Powyższe pytanie, mimo iż dawno udzielono na nie odpowiedzi,

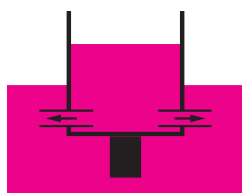
nadal stanowi dobrą „pułapkę” dla fizyków. Często przy próbie rozwiązania przedstawionego zadania za pomocą intuicyjnych przesłanek i uproszczonych myślowych eksperymentów pomijane są niektóre istotne dla wyniku rozumowania elementy. Dlatego proponuję wykonanie kilku rzeczywistych doświadczeń. Dzięki nim każdy sam może się przekonać, w którą stronę kręci się „odwrotny spryskiwacz” i nie tylko...



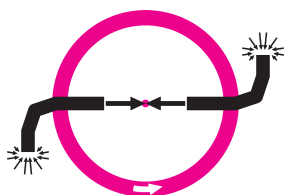
Rys. 1. Szkic wirka.



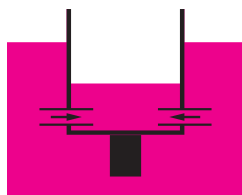
Rys. 2. Wirek – model zwykłego spryskiwacza do trawy. Woda wypływa z wirka.



Rys. 3. Wynurzenie wirka – naśladowanie normalnego trybu pracy spryskiwacza.



Rys. 4. Wirek – model „odwrotnego spryskiwacza do trawy”. Woda wpływa do wirka.



Rys. 5. Zanurzenie wirka – naśladowanie „odwrotnego” trybu pracy spryskiwacza.

Ponieważ eksperymentowanie ze spryskiwaczem do trawy jest dosyć trudne, zrobimy „wirka”, który będzie występował w naszym doświadczeniu zamiast spryskiwacza. Głównym elementem wirka będzie plastikowa butelka lub podobne, walcowate naczynie. Przy dolnej krawędzi butelki robimy otwory, w które wklejamy zakrzywione w kształcie znaku „f” rurki. Do dna butelki przytwierdzamy ciężarek, dzięki któremu wirek będzie się zanurzał w wodzie tak, że przez rurki woda zacznie wpływać do środka. Przy górnej krawędzi butelki mocujemy żyłkę. Na rysunku 1 przedstawiono szkic wirka. Z rurkami zagiętymi na zewnątrz butelki tak, aby dwie przeciwległe przypominały literę „S” (a właściwie „f”), nasz wirek jest dobrym modelem zwykłego spryskiwacza do trawy. Tak jak na rysunkach 2 i 4, które przedstawiają wirka widzianego z góry, należy pozostawić odstęp pomiędzy rurkami wewnątrz butelki, aby woda swobodnie wpływała do i wypływała z naczynia; można również umieszczać rurki na różnej wysokości, aby przy wpływaniu wody do wirka strumienie nie „przeszkadzały” sobie nawzajem. Dla uzyskania wyraźnego efektu należy użyć około 10 rurek (dla przejrzystości na rysunkach umieszczono tylko dwie rurki). Jak naśladować spryskiwacz do trawy za pomocą tego wirka? Najpierw zatopmy go w wodzie. Następnie, ciągnąc za żyłkę – czyli wynurzając wirka, uzyskamy „normalny” tryb pracy spryskiwacza. Woda wypływa, ponieważ wewnątrz jest większe ciśnienie niż na zewnątrz (rys. 2 i 3). Różnicę ciśnień możemy łatwo obliczyć: $\Delta p = \rho g \Delta h$, gdzie ρ jest gęstością wody, g – przyspieszeniem ziemskim, a Δh – różnicą wysokości między poziomami wody wewnątrz i na zewnątrz butelki.

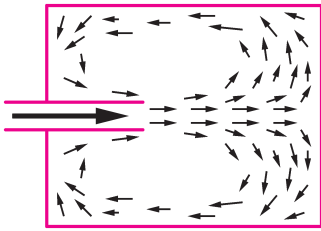
A jak zrealizować „odwrotny” tryb pracy spryskiwacza? Zasysanie wody polegałoby na wytworzeniu w spryskiwaczu niższego ciśnienia niż na zewnątrz. Najprościej taką sytuację uzyskamy, gdy pozwolimy wirkowi swobodnie tonąć (rys. 4 i 5). Nasze porównania między normalnym i odwrotnym trybem pracy wirka będą prawidłowe wtedy, gdy zadamy, aby wartości bezwzględne różnic pomiędzy poziomami wody na zewnątrz i wewnątrz wirka były chociaż w przybliżeniu równe dla obu sytuacji. Najprościej jest zauważyć, jaka jest wartość Δh , gdy wirek tonie, a przy wynurzaniu podnosić go w taki sposób, aby utrzymywać wartość Δh , co jest uwzględnione na rysunkach 3 i 5.

Nasz pierwszy eksperyment daje następujące rezultaty.

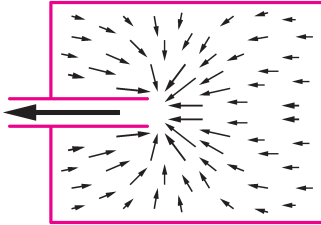
Jeśli woda wylewa się z wirka, to obserwujemy, że kręci się on w przeciwną stronę niż wypływająca z rurek woda. Ten przypadek potrafimy łatwo wyjaśnić. Jeśli zamiast rurki i wylewającej się z niej wody pomyślimy o samolocie odrzutowym i wyrzucanych przez niego spalinach, to stwierdzimy, że obie sytuacje są bardzo podobne.

Przy eksperymencie z „odwrotnym spryskiwaczem”, gdy pozwalamy pustemu wirkowi tonąć, zauważamy, że obraca się on w stronę przeciwną do ruchu wskazówek zegara, czyli odwrotnie niż ten sam wirek, gdy woda z niego wypływała. Tak więc na podstawie doświadczenia daliśmy odpowiedź na pytanie, które często jest kością niezgody wśród „myślowych” eksperymentatorów.

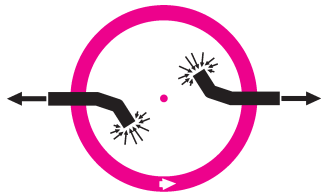
Obserwowany obrót wirka jest jednak znacznie wolniejszy niż przy normalnym trybie pracy. Spodziewamy się, że dwa eksperymenty nie są w pełni symetryczne, że między dwiema sytuacjami musi istnieć jakaś ważna różnica, oprócz zmiany kierunku przepływu wody w rurkach. Z rysunku 4 możemy wnioskować, że wpływanie wody nie powoduje znacznego jej całościowego wirowania. Wewnątrz butelki dwa strumienie płyną wzdłuż tej samej prostej



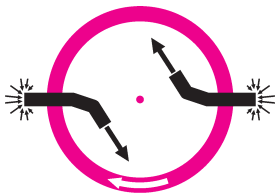
Rys. 6. Badanie przepływu wody przy jej wpływanu przez rynienkę. Widok z góry.



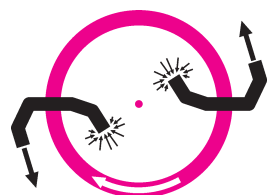
Rys. 7. Badanie przepływu wody przy jej wypływanu przez rynienkę. Widok z góry.



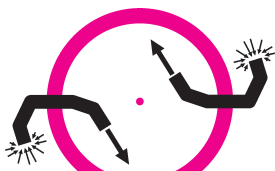
Rys. 8. Anty-wirek, z którego wypływa woda.



Rys. 9. Anty-wirek, do którego wpływa woda.



Rys. 10. Wirek-konserwatysta, z którego wypływa woda.



Rys. 11. Wirek-konserwatysta, do którego wpływa woda.

i w sumie nie powstaje tutaj żadne krążenie wody. Jedyne na zewnątrz, przy wpływanu do rurek (i w rurkach, ale tu jest zachowana symetria z normalnym trybem) powstaje bardzo małe wirowanie wody. Wynika to z różnicy między wpływaniem a wypływaniem cieczy z rurki. Na rysunkach 2 i 4 zaznaczono wypływ wody z rurki za pomocą jednej grubej strzałki, a wpływ wody – za pomocą pęku strzałek. Ale co to ma wspólnego z rzeczywistością? Do tej pory bezkrytycznie opieraliśmy się na przecuciu, że z grubsza właśnie w taki sposób woda płynie poza rurkami. Czy wierzyć tej intuicji? Na szczęście możemy przeprowadzić doświadczenie. . .

Wykonujemy (np. z kilkakrotnie złożonej aluminiowej folii do pieczenia) naczynie o ściankach uformowanych na podobieństwo wanny-z-rynną przedstawionej na rysunku 6. Dolewając przez rynienkę (lewa strona rysunku) wodę, obserwujemy jej ruch. Aby to sobie ułatwić, posypujemy wodę zmielonym pieprzem. Czarne strzałki obrazują przepływ w naczyniu. Widać, że woda dopiero w pewnej odległości od rynienki rozplywa się na boki. Naczynie powinno być na tyle długie, żeby strumień nie „rozbijał” się za szybko o ściankę. Gdy z rynienki wypływa woda, nie obserwujemy powstawania wyraźnego strumienia w naczyniu – woda napływa ze wszystkich stron (rys. 7). I chociaż nasze badania dotyczą trochę innej sytuacji, gdyż w przypadku wirka cała rurka jest zanurzona w wodzie, to możemy być już pewni, że istnieje wyraźna asymetria pomiędzy wpływaniem a wypływaniem: woda wypływa jako wyraźny strumień, a wpływa z różnych stron, bez szczególnie wyróżnionego kierunku.

Zawsze dobrze jest sprawdzić swoje wnioski w trochę innych warunkach. Obecnie mamy już wyrobione zdanie o tym, co się dzieje w takich układach jak wirki: wystarczy patrzeć na wirowanie wody, by stwierdzić, w którą stronę będzie się kręcił obiekt powodujący to wirowanie. Spróbujmy skonstruować anty-wirka, czyli tak uformować rurki, aby przy wypływanu wody wirki pozostawał prawie nieruchomy, a przy wpływaniu – wyraźnie się kręcił. Po chwili zastanowienia stwierdzamy, że wystarczy w poprzednim wirku odwrotnie umieścić trochę mniej zagięte rurki. Na rysunkach 8 i 9 przedstawiam anty-wirka.

Przy normalnym trybie pracy powstaje jedynie bardzo nieznaczne wirowanie wewnątrz butelki. Ponieważ wirowanie wody jest znikome, to wirki praktycznie się nie kręci. Natomiast jeśli pozwolimy anty-wirkowi swobodnie tonąć, zauważymy, że obraca się on dosyć szybko w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara. Znowu jedynie wewnątrz butelki woda się kręci. Jednak w tym przypadku woda wypływa z rurek, więc dwa strumienie powodują dużo silniejsze wirowanie cieczy.

Jako ostatni przykład modyfikacji problemu spryskiwacza zrobimy „wirka-konserwatystę”. Nasze wymaganie jest proste: wirki ma się kręcić zawsze w tę samą stronę, bez względu na to, czy woda z niego wypływa, czy do niego wpływa. Na podstawie poprzednich eksperymentów łatwo stwierdzić, że kształt rurek powinien przypominać literę „U”. Na rysunkach 10 i 11 przedstawiono „wirka-konserwatystę” w trybach normalnym (woda wypływa z wirka) i odwrotnym (woda wpływa do wirka). W obu przypadkach wirki kręci się w tę samą stronę.

Pomysłowości Czytelników pozostawiam konstrukcję jeszcze bardziej zaskakujących wirków. Ciekawa wydaje się następująca modyfikacja przedstawionych układów: użycie dłuższych rurek i owinięcie nimi kilkakrotnie butelki po zewnętrznej stronie. Na który tryb pracy wpłynie taka zmiana?

Ponieważ zawsze warto wykorzystać wszystkie możliwości, jakie daje eksperymentatorowi raz skonstruowany układ, zechcemy na koniec zastanowić się nad prostym i wdzięcznym problemem, związanym z pierwszym omawianym wirkiem pracującym w trybie normalnym (rys. 2). Po nalaniu do ustalonego górnego poziomu wody pozwalamy wirkowi swobodnie się obracać w powietrzu, trzymając go na żyłce. Mierzmy czas, jaki upływa od rozpoczęcia wylewania się wody do momentu, gdy woda w butelce osiąga zaznaczony poprzednio dolny poziom. Następnie powtarzamy eksperyment z jedną tylko modyfikacją: nie pozwalamy wirkowi swobodnie się obracać. W którym przypadku woda wypłynie szybciej? Dlaczego? Jak zmodyfikować rurki wirka, aby różnica czasów była większa?