Co w zeszycie

Zjawiska fizyczne są wszechobecne w przyrodzie, a prawa fizyczne opisują wiele sytuacji spotykanych nie tylko w świecie nieożywionym, ale także w świecie istot żywych, tradycyjnie zarezerwowanym dla badań biologicznych lub związanych z medycyną. Dlatego od jakiegoś czasu istnieją obszary naukowe, w których łączona jest wiedza z fizyki i innych dyscyplin – takie jak np. biofizyka czy fizyka medyczna. Naukowcy pracujący w ramach tych obszarów prowadzą badania interdyscyplinarne, starając się zintegrować wiedzę i umiejętności z dwóch (lub większej liczby) dyscyplin naukowych w celu otwarcia nowych możliwości zrozumienia zjawisk do tej pory opisywanych jedynie z punktu widzenia jednej, odosobnionej gałęzi nauki. Rozwijająca się nauka coraz częściej potrzebuje współpracy specjalistów z wielu dziedzin w celu zapewnienia dynamicznego rozwoju wiedzy i sprostania coraz trudniejszym wyzwaniom współczesnego świata.

W niniejszym numerze przedstawiamy spojrzenie na układ krwionośny człowieka z punktu widzenia fizyka, opisującego go za pomocą praw hydrostatyki, hydrodynamiki i lepkości oraz przepływów laminarnych i turbulentnych. Proponujemy także z zakresu tych tematów kilka doświadczeń, pochodzących z Ogólnopolskiego Konkursu Nauk Przyrodniczych *Świetlik* oraz kilka zadań (wraz z rozwiązaniami) z Ogólnopolskiego Konkursu Fizycznego *Lwiątko*. Mamy nadzieję, że dzięki lekturze czytelnicy dostrzegą ściślejsze powiązanie biologii, medycyny i fizyki.

DS

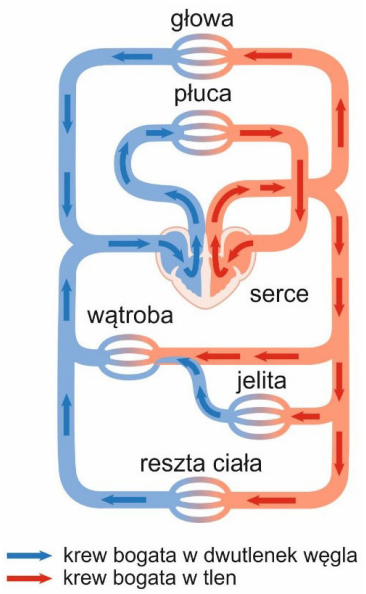
Spis treści

Biofizyka układu krwionośnego 1
Doświadczenia z konkursu *Świetlik* 13
Zadania z *Lwiątka* 19

Biofizyka układu krwionośnego

Budowa układu krwionośnego

Układ krwionośny człowieka składa się z serca, naczyń krwionośnych (tętnic, włośniczek i żył) oraz krążącej w nich krwi. *Serce* składa się z dwóch komór oraz dwóch przedsionków. Pełni ono rolę pompy tłoczącej krew do płuc (mały obieg) oraz do innych organów ciała (duży obieg). *Tętnice* prowadzą krew z serca do narządów ciała i charakteryzują się grubymi, umięśnionymi ścianami. *Żyły* to naczynia o wiotkiej ścianie prowadzące krew w kierunku serca. Natomiast *włośniczki* to drobne naczynia o cienkiej ścianie, przez którą zachodzi wymiana substancji pomiędzy krwią a tkankami. *Krew* składa się z osocza (wodnego roztworu elektrolitów, białek, składników odżywczych i produktów przemiany materii) i wyspecjalizowanych komórek (erytrocytów, leukocytów i trombocytów).



Rys. 1. Schemat układu krwionośnego człowieka.
Źródło: *Wikipedia*; Gccwang, CC BY-SA 4.0

Układ krwionośny odpowiada za wiele ważnych funkcji w organizmie, takich jak dostarczanie komórkom substancji odżywczych, tlenu, hormonów i wody, odprowadzanie z nich dwutlenku węgla i produktów przemiany materii, regulowanie poziomu temperatury i pH oraz wykrywanie i zwalczanie drobnoustrojów.

Hydrostatyka, czyli nauka o cieczach w spoczynku

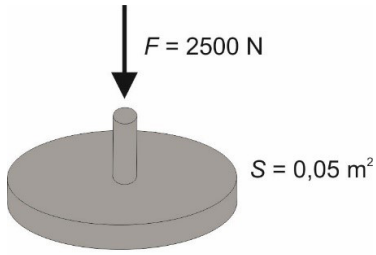
Żeby zrozumieć mechanizmy funkcjonowania układu krwionośnego, a także przyczyny wielu chorób i sposoby ich leczenia, pomocna jest wiedza z zakresu *hydrodynamiki*, czyli nauki o przepływie cieczy.

Zacznijmy jednak od *hydrostatyki*, czyli opisu własności cieczy w spoczynku. Siły oddziaływania pomiędzy cząsteczkami cieczy są niewystarczające, by zapewnić cieczom sztywność ciała stałego, lecz są one na tyle duże, by zapobiec swobodnym ruchom cząsteczek, jak ma to miejsce w przypadku gazu. Dzięki temu ciecze, podobnie jak ciała stałe, mają stosunkowo dużą gęstość i objętość prawie niezależną od ciśnienia (są nieściśliwe), ale nie zachowują kształtu (w polu grawitacyjnym przyjmują kształt naczynia, w którym się znajdują).

Ciśnienie to iloraz wartości siły nacisku *F* do pola powierzchni *S*, na którą działa ta siła:

$$p = \frac{F}{S}.$$

Jednostką ciśnienia jest paskal: 1 Pa = 1 N/1 m^2.



$$p = \frac{F}{S} = \frac{2500}{0{,}05} = 50\,000 \text{ Pa}$$

Rys. 2. Ciśnienie wywierane przez siłę nacisku o wartości 2500 N działającą na tłok o polu powierzchni 0,05 m^2 wynosi 50 000 Pa, czyli 50 kPa

Ciśnienie hydrostatyczne to ciśnienie wywierane przez słup cieczy w spoczynku. W tym przypadku siła nacisku jest równa sile ciężkości słupa cieczy: $F = mg$. Ponieważ masa cieczy jest równa iloczynowi jej objętości (V) i gęstości (d): $m = Vd$, a objętość słupa cieczy o polu podstawy S i wysokości h wyraża się wzorem: $V = hS$, siła nacisku w tym przypadku jest dana wyrażeniem $F = mg = (Vd)g = (hSd)g$.

W przypadku słupa cieczy ciśnienie hydrostatyczne na głębokości h wynosi więc:

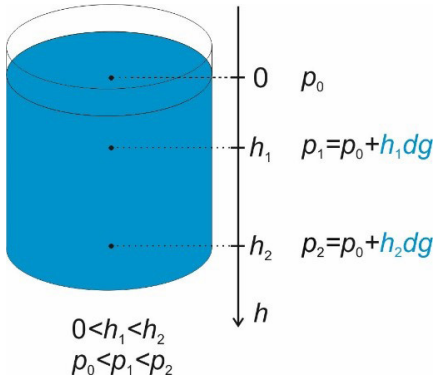
$$p = \frac{mg}{S} = \frac{hSdg}{S} = hdg,$$

gdzie g oznacza wartość przyspieszenia grawitacyjnego: g = 9,81 kg·m/s^2.

Ciśnieniem statycznym określa się sumę ciśnień wywieranych przez różne siły nacisku. Na głębokości h w cieczy o gęstości d, której powierzchnia S poddana jest naciskowi F, ciśnienie statyczne wynosi:

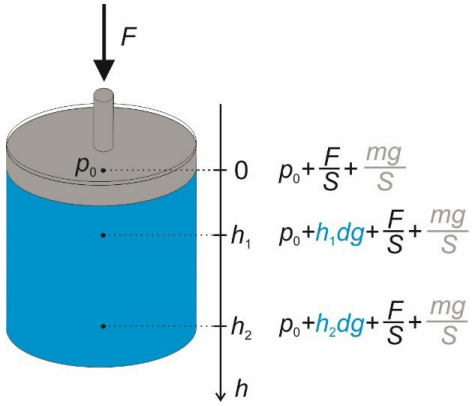
$$p_s = hdg + \frac{F}{S}.$$

Jeśli słup cieczy jest otwarty od góry, siła nacisku F jest równa sile ciężkości słupa powietrza znajdującego się ponad powierzchnią cieczy, a człon $\frac{F}{S}$ nosi nazwę *ciśnienia atmosferycznego* i oznaczany jest literką p_0. Ciśnienie atmosferyczne na poziomie morza wynosi około 10^5 Pa.



Rys. 3. Ciśnienie statyczne na różnych głębokościach (h_1, h_2) w słupie cieczy otwartym od góry, w przypadku, gdy ciśnienie na powierzchni wynosi p_0

Jeśli słup cieczy jest zamknięty od góry tłokiem, to siła nacisku jest sumą siły ciężkości słupa powietrza oraz siły ciężkości tłoka (mg) lub siły pchającej tłok w dół (F).

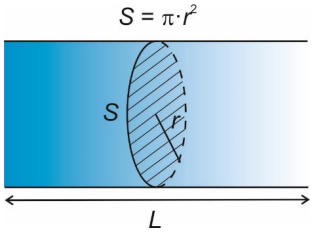


Rys. 4. Ciśnienie na różnych głębokościach w słupie cieczy zamkniętym tłokiem o masie m i pchanego w dół z siłą F. Wkład od siły nacisku zewnętrznego jest taki sam w każdym punkcie, natomiast ciśnienie hydrostatyczne rośnie wraz z głębokością h

Ponieważ cząsteczki cieczy mogą się przemieszczać w dowolnym kierunku, ciśnienie zewnętrzne wywierane na ciecz znajdującą się w zamkniętym naczyniu rozchodzi się jednakowo we wszystkich kierunkach. Prawo to nosi nazwę *prawa Pascala*.

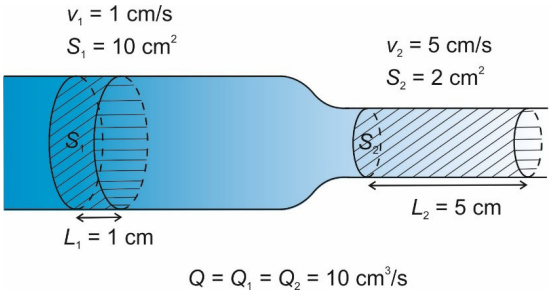
Przepływ cieczy w sztywnej rurce

Zajmijmy się teraz prawami rządzącymi ruchem cieczy. Docelowo chcemy opisać ruch krwi w naczyniach krwionośnych, ale najpierw spróbujmy uprościć sytuację i zrozumieć, co dzieje się podczas przepływu cieczy w poziomej, sztywnej rurce o kołowym przekroju poprzecznym. Charakterystycznymi parametrami takiej rurki są jej długość (L) i promień (r) lub średnica ($D = 2r$). Pole powierzchni kołowego przekroju poprzecznego wynosi $\pi \cdot r^2$.



Rys. 5. Uproszczony model naczynia krwionośnego w postaci sztywnej rurki

Ponieważ ciecze są nieściśliwe, w czasie ich przepływu w sztywnej rurce nie może dochodzić do gromadzenia się cieczy w jakimkolwiek miejscu. Własność ta prowadzi do tzw. *prawa ciągłości strugi*. Mówi ono, że podczas przepływu w sztywnej rurce objętość cieczy wpływającej i wypływającej z każdego przekroju w ciągu jednej sekundy jest taka sama. Żeby lepiej zrozumieć konsekwencje tego prawa, rozważmy sztywną poziomą rurkę o zmiennym promieniu (Rys. 5).



Rys. 6. Prawo ciągłości strugi. Zakreskowane walce przedstawiają objętość przepływającą przez sztywną rurkę w czasie jednej sekundy

Objętość cieczy (V) przepływająca przez rurkę na jednostkę czasu (t) nosi nazwę *strumienia objętości*:

$$Q = \frac{V}{t}.$$

Na przykład, jeśli przez rurę w ciągu jednej sekundy przepływa 10 cm^3 cieczy, to strumień objętości wynosi 10 cm^3/s.

Ponieważ objętość walca jest równa iloczynowi pola powierzchni podstawy (S) i wysokości (L), strumień objętości można również wyrazić jako:

$$Q = \frac{S \cdot L}{t} = S \cdot \frac{L}{t} = S \cdot v,$$

gdzie $v = d/t$ odpowiada średniej szybkości przepływu cieczy. Wynika z tego, że strumień objętości równy jest iloczynowi powierzchni przekroju i średniej szybkości przepływu:

$$Q = S \cdot v.$$

W szerszej części rurki, o przekroju S_1, mamy więc: $Q_1 = S_1 \cdot v_1$, a w węższej części, o przekroju S_2: $Q_2 = S_2 \cdot v_2$. Zgodnie z prawem ciągłości strugi strumień objętości powinien być identyczny w każdym miejscu sztywnej rury ($Q_1 = Q_2$) i dlatego prawo to możemy również zapisać jako:

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2.$$

Z powyższego równania wynika, że w węższej części rurki ($S_2 < S_1$) szybkość przepływu cieczy jest większa ($v_2 > v_1$). Ciecz płynie więc szybciej w zwężeniach i wolniej we fragmentach rury o większej średnicy.

Zastanówmy się teraz, w jakim stopniu prawo ciągłości strugi stosuje się do układu krwionośnego. Jak widzieliśmy powyżej, prawo to dotyczy nieściśliwej cieczy płynącej w sztywnej rurce. Krew, podobnie jak wszystkie ciecze, jest nieściśliwa. Jednak jedynie drobniejsze naczynia krwionośne można traktować jako stosunkowo sztywne. Duże tętnice i żyły są elastyczne i pulsują cyklicznie w rytm bicia serca. Prawo ciągłości strugi w tych naczyniach stosuje się w związku z tym jedynie do średnich wartości powierzchni przekroju i szybkości przepływu.

Prawo Bernoulliego

Wróćmy jeszcze na chwilę do sztywnej rurki o zmiennym przekroju i zastanówmy się, jakie ciśnienie panuje w poszczególnych jej fragmentach. Załóżmy dodatkowo, że ciecz płynie w rurce bez tarcia. Taką ciecz nazywa się *cieczą idealną*.

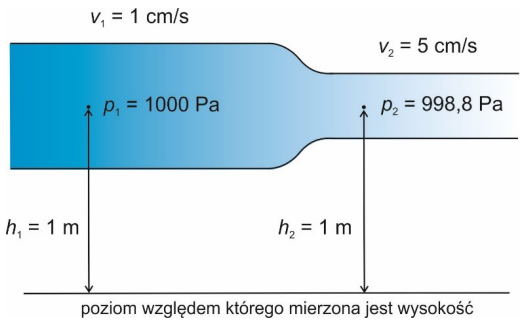
Podczas przepływu cieczy idealnej w sztywnej rurce obowiązuje tzw. *prawo Bernoulliego*. Prawo to wyraża zasadę zachowania energii na jednostkę objętości cieczy. Należy przy tym wziąć pod uwagę dwie formy energii: energię wynikającą z ciśnienia statycznego oraz energię kinetyczną. Ponieważ oficjalną jednostką energii jest dżul (N·m), energię przypadającą na jednostkę objętości wyraża się w paskalach (N·m/m^3 = N/m^2 = Pa). Z tego względu ciśnienie w cieczach można interpretować jako energię jednostki objętości, a prawo zachowania energii można zapisać jako:

$$p_t = p_s + p_d = constant,$$

gdzie $p_s = \frac{F}{S} + hgd = p + hgd$ to ciśnienie statyczne, $p_d = v^2d/2$ to ciśnienie dynamiczne (związane z ruchem płynu), a $p_t = p + hdg + v^2d/2$ oznacza ciśnienie całkowite. Zgodnie z prawem Bernoulliego *całkowite ciśnienie w cieczy idealnej jest niezmienne w czasie*. Oznacza to, że dla dwóch punktów w sztywnej rurce podczas przepływu cieczy idealnej prawdziwa jest następująca relacja:

$$p_{t1} = p_{t2}$$

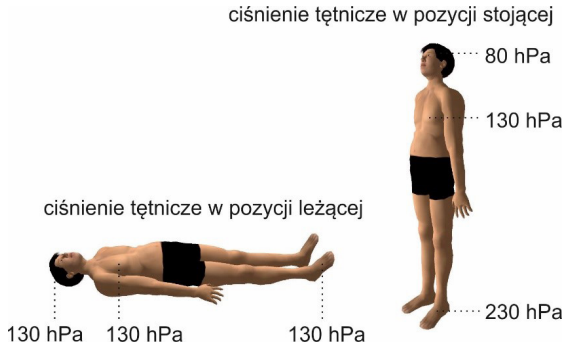
$$p_1 + h_1dg + v_1^2d/2 = p_2 + h_2dg + v_2^2d/2$$



Rys. 7. Ilustracja prawa Bernoulliego w poziomej rurce o zmiennym przekroju. Wartości liczbowe odpowiadają przepływowi cieczy o gęstości d = 1 g/cm^3

Zastanówmy się teraz, jakie są konsekwencje równania Bernoulliego dla układu krwionośnego. Zacznijmy od omówienia poszczególnych członów w tym

równaniu. Znamy już ciśnienie statyczne, czyli sumę: $p_{serce} + hdg$. W przypadku krążenia krwi, p_{serce} oznacza ciśnienie wywierane przez serce, kiedy krew wypychana jest z niego do tętnic, a h pionową odległość od płaszczyzny przechodzącej przez prawy przedsionek serca. Ponieważ niektóre organy znajdują się poniżej serca, a inne powyżej, człon hgd należy odpowiednio dodać do p_{serce} (dla części ciała poniżej serca) lub odjąć od p_{serce} (dla części ciała powyżej serca).



Rys. 8. Wpływ grawitacji na ciśnienie statyczne.
Źródło: Wikipedia

Ciśnienie statyczne krwi zależy od pozycji ciała. W pozycji leżącej wszystkie organy ciała znajdują się mniej więcej na tym samym poziomie. Jeśli pominąć efekty związane z tarciem, statyczne ciśnienie tętnicze we wszystkich częściach ciała jest wówczas zbliżone do ciśnienia p_{serce}, z jakim krew wypychana jest z serca. Inaczej jest w pozycji stojącej: ciśnienie statyczne w stopach wynosi $p_{serce} + h_{serce\text{-}stopa}dg$, a w głowie $p_{serce} - h_{serce\text{-}głowa}dg$. Tak więc ciśnienie krwi w stopach jest większe niż ciśnienie na poziomie serca, a ciśnienie w naczyniach doprowadzających krew do głowy jest od niego niższe. Ponieważ średnie ciśnienie tętnicze na poziomie serca wynosi około 130 hPa, a gęstość krwi $d \approx 1060$ kg/m^3 to dla tętnic w głowie ($h_{serce\text{-}głowa} = 0{,}5$ m) ciśnienie statyczne powinno wynosić około 80 hPa, a dla tętnic w stopach ($h_{serce\text{-}stopa} = 1$ m) około 230 hPa. W rzeczywistości wartości te są nieco mniejsze ze względu na siły tarcia, które do tej pory pomijaliśmy. Wrócimy jeszcze do tego tematu poniżej (*patrz: Lepkość i prawo Hagena-Poiseuille'a*).

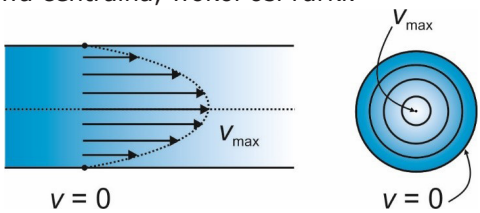
Podczas przepływu cieczy, oprócz ciśnienia statycznego, pojawia się dodatkowo tzw. *ciśnienie dynamiczne*. Wartość tego ciśnienia równa jest połowie iloczynu gęstości cieczy i kwadratu średniej szybkości przepływu: $v^2d/2$. W przypadku znaczącej części układu krwionośnego, ciśnienie dynamiczne stanowi niewielki wkład do całkowitego ciśnienia. Wynika to z małych szybkości przepływu krwi w naczyniach (od około 1 mm/s dla włośniczek do około 50 cm/s w tętnicach). Wyjątek stanowią zastawki serca, przez które krew przepychana jest z dużą szybkością oraz patologiczne zwężenia naczyń krwionośnych, w których szybkość przepływu jest tak duża, że ciśnienie dynamiczne staje się dominujące.

Lepkość i prawo Hagena-Poiseuille'a

Pomimo tego, że naczynia krwionośne nie są sztywne, a krew nie jest cieczą idealną, prawo Bernoulliego można w przybliżeniu stosować do opisu ruchu krwi w dużych naczyniach krwionośnych. Natomiast w małych naczyniach siły

oporu są znaczące i trzeba uwzględnić straty energii związane z tarciem. Prawo opisujące zachowanie się cieczy, w przypadku gdy tarcie nie jest zaniedbywalne, nosi nazwę *prawa Hagena-Poiseuille'a*.

Zastanówmy się, co się dzieje z cząsteczkami cieczy w czasie przepływu. Przy niewielkich szybkościach przepływu można przyjąć, że cząsteczki tworzą koncentryczne warstwy przesuwające się względem siebie równolegle. Taki przepływ nazywa się *przepływem laminarnym*. Model cieczy idealnej zakłada, że warstwy cieczy ślizgają się po sobie bez strat energii związanych z tarciem. W rzeczywistości jednak pomiędzy sąsiadującymi warstwami istnieją siły tarcia powodujące, że każda warstwa przesuwa się z nieco inną szybkością: najwolniej przesuwa się warstwa bezpośrednio stykająca się ze ściankami naczynia, a najszybciej warstwa centralna, wokół osi rurki.



Rys. 9. Paraboliczny profil szybkości przepływu cieczy w sztywnej rurce

Ciecze różnią się intensywnością sił tarcia wewnętrznego, a parametr, który służy do opisu tego zjawiska, nosi nazwę *lepkości* i oznaczana jest literką eta (η). Dla przykładu, lepkość wody w temperaturze 20°C wynosi 0,89 mPa/s, lepkość krwi w temperaturze 37°C wynosi 3,5 mPa/s, natomiast lepkość miodu około 5 Pa/s. Duża lepkość oznacza duże straty energii na tarcie. Obrazowo można powiedzieć, że im większa lepkość, tym trudniej wylać ciecz z naczynia. Natomiast nie należy mylić lepkości z gęstością. Na przykład olej ma większą lepkość niż woda, natomiast gęstość oleju jest mniejsza od gęstości wody.

Lepkość cieczy powoduje, że część energii ulega rozproszeniu w wyniku tarcia i suma ciśnień w prawie Bernoulliego nie jest już stała, lecz maleje w kierunku przepływu. Dlatego do opisu cieczy rzeczywistych używa się prawa *Hagena-Poiseuille'a*, które uwzględnia straty związane z tarciem. Zgodnie z tym prawem strumień objętości jest proporcjonalny do różnicy ciśnień między dwoma punktami rurki (Δp) i odwrotnie proporcjonalny do *oporu przepływu* (R):

$$Q = \frac{\Delta p}{R}.$$

W przypadku układu krążenia różnica ciśnień Δp odpowiada różnicy pomiędzy ciśnieniem skurczowym i rozkurczowym serca. U zdrowej osoby ciśnienie skurczowe wynosi około 125 mmHg (167 hPa), a ciśnienie rozkurczowe około 80 mmHg (107 hPa). Tak więc różnica ciśnień Δp wynosi około 60 hPa.

Opór przepływu R zależy zarówno od lepkości płynu (η), jak i od geometrii rurki: promienia przekroju r oraz długości L:

$$R = \frac{8 \cdot \eta \cdot L}{\pi \cdot r^4}.$$

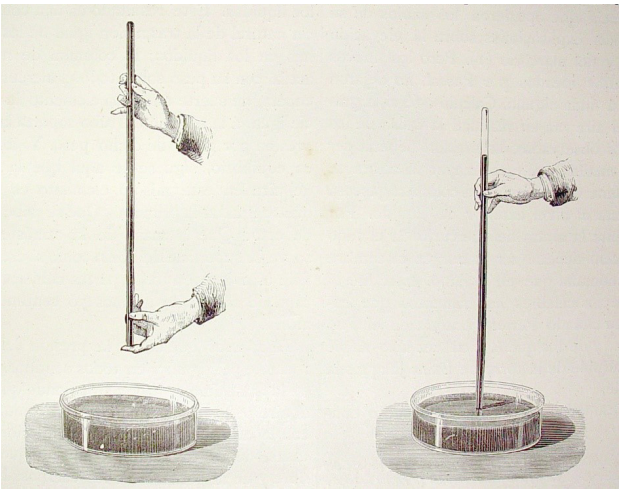
Jak można się spodziewać, opór rośnie wraz ze wzrostem lepkości cieczy i długości rurki. Warto również zauważyć, że opór jest odwrotnie proporcjonalny do czwartej potęgi promienia przekroju poprzecznego rurki, co oznacza, że zmniejszenie promienia 2 razy skutkuje 16-krotnym wzrostem oporu! To dlatego strat związanych z tarciem nie można zaniedbać w przypadku opisu ruchu cieczy w wąskich naczyniach krwionośnych.

Silna zależność oporu przepływu od promienia przekroju umożliwia bardzo wydajną regulację ukrwienia. Jeśli w jakimś obszarze wzrasta tempo metabolizmu (na przykład w mięśniu podczas wykonywania ćwiczeń), produkty przemiany materii zmniejszają napięcie mięśni gładkich naczyń krwionośnych (efekt ten nosi nazwę wazodylatacji). Dzięki temu promień naczyń krwionośnych ulega poszerzeniu, powodując bardzo duży spadek oporu przepływu i tym samym lepsze ukrwienie pracującego mięśnia. Przeciwny efekt, czyli zmniej-

W międzynarodowym układzie jednostek (SI) ciśnienie wyraża się w paskalach, natomiast ciśnienie odczytywane na przyrządach do pomiaru ciśnienia krwi wyrażane jest w *milimetrach słupa rtęci* lub *torach*, przy czym 1 tor ≈ 1 mmHg = 133,3 Pa.

Wyrażanie ciśnienia w wysokości słupa rtęci może się wydawać dziwne, ale ta historyczna jednostka związana jest z eksperymentem, wykonanym w 1646 roku przez Evangelistę Torricellego. Do swojego doświadczenia Torricelli wykorzystał szklaną rurkę zamkniętą z jednej stronu i wypełnioną po brzegi rtęcią. Po szybkim odwróceniu rurki do góry dnem i postawieniu jej w naczyniu wypełnionym rtęcią, cześć rtęci wypływa do naczynia, pozostawiając u szczytu rurki wolną przestrzeń (*tzw. próżnia Torricellego*). Torricelli wyjaśnił to w ten sposób, że ciśnienie hydrostatyczne wywierane przez pozostałą w rurce rtęć równoważy ciśnienie atmosferyczne wywierane przez powietrze na powierzchnię rtęci w naczyniu:

$$p_{Hg} = p_0$$



Rys. 10. Eksperyment Torricellego.
Źródło: flickr.com

Powtarzając wielokrotnie swoje doświadczenie, Torricelli stwierdził, że ciśnienie na poziomie morza jest równe ciśnieniu wywieranemu przez słup rtęci o wysokości około 760 mm.

Ponieważ ciśnienie hydrostatyczne wyraża się wzorem: $p = hdg$, ciśnienie słupa rtęci o gęstości d_{Hg} = 13 546 kg/m^3 i wysokości h_{Hg} = 760 mm = 0,76 m wynosi:

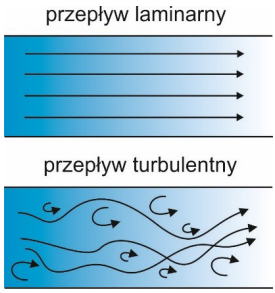
$$p_{Hg} = 13\,546 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}76 \approx 10^5 \text{ Pa}.$$

szanie promienia przekroju (wazokonstrykcja) obserwuje się na przykład w naczyniach krwionośnych skóry, kiedy jest zimno. Wzrost oporu przepływu powoduje spadek ukrwienia, co w konsekwencji zapobiega nadmiernym stratom ciepła.

Wróćmy jeszcze na chwilę do fragmentu, gdzie mówiliśmy o różnicach ciśnienia pomiędzy stopami a głową w pozycji stojącej (*patrz: Prawo Bernoulliego*). To właśnie z powodu oporu naczyń krwionośnych ciśnienie mierzone w naczyniach stopy lub głowy jest w rzeczywistości mniejsze niż to, które wynikałoby z równania Bernoulliego, ponieważ ze względu na obecność sił tarcia suma ciśnień w każdym punkcie przepływu nie jest stała, lecz maleje w miarę oddalania się od serca.

Przepływ turbulentny i liczba Reynoldsa

Przepływ laminarny, w którym można założyć, że cząsteczki cieczy tworzą warstwy przesuwające się jedna względem drugiej, stanowi dobry model w przypadku wolnego ruchu cieczy. Jeśli jednak szybkość przekroczy pewną wartość graniczną, warstwy zaczynają się mieszać, co powoduje powstawanie zawirowań i innych nieregularności. Taki przepływ nazywa się *turbulentnym*.



Rys. 11 . Schematy przepływu laminarnego i turbulentnego

Do oszacowania ryzyka wystąpienia turbulencji używa się tzw. liczby Reynoldsa:

$$\mathrm{Re} = \frac{d \cdot D \cdot v}{\eta},$$

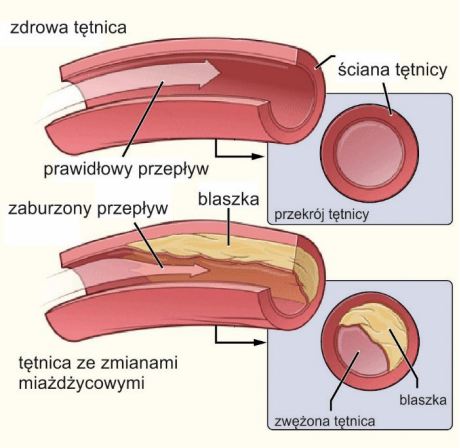
d: gęstość cieczy, $D = 2 \cdot r$: średnica rurki, v: szybkość przepływu, η: lepkość cieczy. Ponieważ zgodnie z definicją strumienia objętości $v = Q/S$, liczbę Reynoldsa można również zapisać jako:

$$\mathrm{Re} = \frac{d \cdot 2 \cdot r \cdot Q}{\eta \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{2 \cdot d \cdot Q}{\eta \cdot \pi \cdot r}.$$

Im wyższa liczba Reynoldsa, tym większe jest prawdopodobieństwo wystąpienia turbulencji. Z powyższego wzoru wynika, że im większa jest gęstość i strumień objętości, tym większa szansa na wystąpienie turbulencji. Natomiast ryzyko ich wstąpienia maleje wraz ze wzrostem lepkości cieczy i promienia rurki.

W przypadku naczyń krwionośnych o kołowym przekroju krytyczna wartość liczby Reynoldsa wynosi około 2000. Powyżej tej wartości zaczynają się pojawiać turbulencje. Ponieważ w czasie takiego przepływu część strumienia przemieszcza się w sposób nieuporządkowany, a w niektórych miejscach strumień całkowicie zawraca, turbulencje zwiększają opory przepływu, co może prowadzić do niewystarczającego stopnia ukrwienia poszczególnych organów.

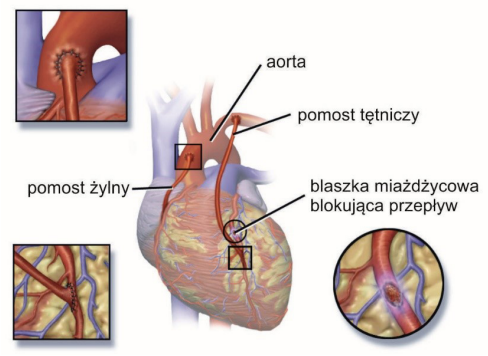
Choroba miażdżycowa tętnic (arterioskleroza): choroba polegająca na pojawianiu się tzw. blaszek miażdżycowych w błonie wewnętrznej tętnic. Obecność blaszki powoduje zmniejszenie średnicy naczynia, co może powodować niedokrwienie narządów zaopatrywanych przez tętnicę. Blaszka miażdżycowa składa się z cholesterolu i innych lipidów, makrofagów, włóknika oraz osadu wapnia. Ściany chorych naczyń tracą elastyczność i ulegają owrzodzeniom, co prowadzi do gromadzenia się płytek krwi i narastania zakrzepów.



Rys. 12. Blaszka miażdżycowa
Źródło: Wikipedia

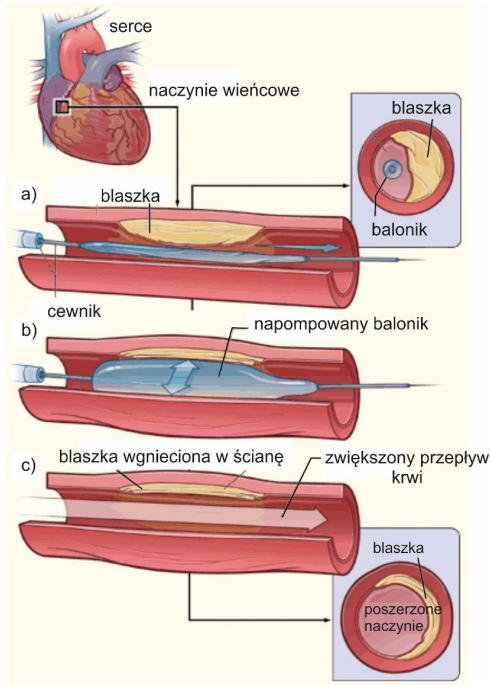
W układzie krwionośnym turbulencje pojawiają się w miejscach, gdzie krew przepływa przez zwężenia. Ma to miejsce na przykład w aorcie, do której krew przedostaje się z lewej komory serca przez stosunkowo wąską zastawkę. Do turbulencji dochodzić może również w naczyniach, których przekrój poprzeczny uległ zmniejszeniu ze względu na chorobę miażdżycową. Wyjątkowo niebezpieczna jest choroba miażdżycowa naczyń wieńcowych, zaopatrujących w krew mięsień sercowy, ponieważ niewystarczające ukrwienie serca może prowadzić do zawału. Ryzyko turbulencji wzrasta również w czasie wysiłku, ze względu na wzrost strumienia objętości. Dlatego choroba miażdżycowa może nie dawać żadnych symptomów w spoczynku, natomiast stopnień ukrwienia może drastycznie spaść w czasie wysiłku.

Aby poprawić ukrwienie serca upośledzone na skutek zwężenia naczyń wieńcowych, lekarze mogą wykonać operację pomostowania aortalno-wieńcowego (tzw. wszczepianie by-passów) lub zainstalować w naczyniach krwionośnych tzw. stenty. W przypadku operacji wszczepienia by-passów, przepływ krwi kierowany jest bezpośrednio z aorty do zdrowych naczyń wieńcowych w taki sposób, żeby ominąć fragmenty zwężone przez miażdżycę.

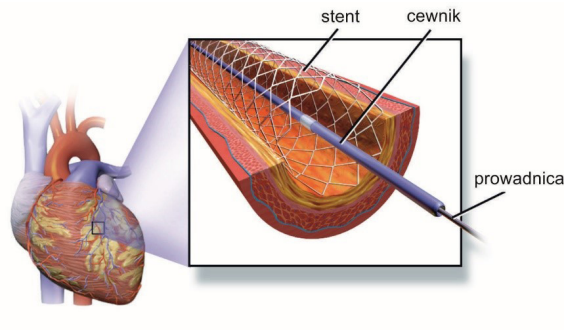


Rys. 13. Schemat poglądowy wszczepienia by-passów.
Źródło: Wikipedia

Natomiast wszczepienie stentu polega na zainstalowaniu wewnątrz naczynia protezy naczyniowej w postaci metalowej rurki o siateczkowej strukturze, która przywraca naczyniu jego pierwotny rozmiar i wzmacnia jego ściany. Pierwszym etapem zabiegu jest tzw. angioplastyka polegająca na wprowadzenie cewnika zakończonego balonem i jego rozprężeniu w miejscu zwężenia, co powoduje wgniecienie blaszki miażdżycowej w ścianę naczynia. Po angioplastyce następuje implantacja stentu.



Rys. 14. Schemat zabiegu angioplastyki: a) wprowadzenie do naczynia cewnika zakończonego balonikiem b) wypełnienie balonika solą fizjologiczną prowadzi do wgniecenia blaszki miażdżycowej w ścianę naczynia c) poszerzenie naczynia wieńcowego powoduje zwiększenie przepływu krwi.
Źródło: Wikipedia



Rys. 15. Implantacja stentu: proteza wprowadzana jest w odpowiednie miejsce przy użyciu uprzednio zainstalowanej prowadnicy.
Źródło: Wikipedia

Choroby układu krążenia są bardzo powszechne i jest ich bardzo wiele. Opis poszczególnych schorzeń wychodzi poza zakres tego artykułu. Mam jednak nadzieję, że wiedza, którą Czytelnik zdobył w czasie lektury tego tekstu, pozwoli mu na lepsze zrozumienie przyczyn różnych dolegliwości oraz metod ich leczenia.

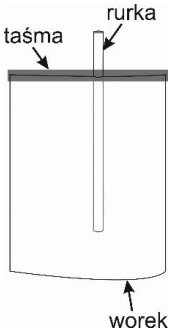
Katarzyna Cieślar

Doświadczenia z konkursu *Świetlik*

Doświadczenie 1. Podnośnik

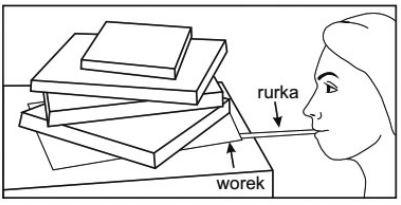
Przygotuj:
- woreczek do mrożenia żywności lub inny grubszy woreczek prostokątny (np. koszulkę na dokumenty),
- taśmę klejącą,
- słomkę do napojów,
- 4 książki (każda około 200-stronicowa),
- nożyczki.

Eksperyment:



1. Włóż rurkę do woreczka i umocuj ją za pomocą taśmy tak, jak na rysunku obok.
2. Sklej brzegi woreczka.
3. Napompuj woreczek w celu sprawdzenia, czy układ jest szczelny.
4. Delikatnie naciskając, wypompuj powietrze z woreczka.
5. Połóż woreczek na płaskiej powierzchni i ułóż na nim książki, jak na rysunku poniżej.
6. Wdmuchuj powietrze do woreczka i obserwuj, co dzieje się z książkami.

Uwaga: Możesz poprosić kogoś o asekurowanie książek.



Obserwacje:

1. Co stało się z książkami podczas wdmuchiwania powietrza do woreczka leżącego pod nimi?

Pytania:

1. Co spowodowało, że napompowany woreczek podniósł do góry cztery ciężkie książki?

Komentarz:

W przeprowadzonym doświadczeniu woreczek, do którego zostało wpompowane powietrze, zadziałał podobnie jak podnośnik hydrauliczny używany np. do podnoszenia samochodów. Zasada działania w obu przypadkach opiera się na tym samym prawie fizycznym, zwanym **prawem Pascala**. Woreczek po odpompowaniu jest prawie pusty, nie ma (prawie) w nim powietrza. W trakcie pompowania zmienia się ilość gazu zamkniętego w środku. Najpierw objętość woreczka wzrasta do pewnej maksymalnej wartości. Po jej osiągnięciu dalsze wdmuchiwanie powietrza powoduje wzrost ilości cząsteczek gazu w środku, bez dalszego, widocznego zwiększania objętości wnętrza. Im więcej gazu gromadzimy w woreczku, tym mniej miejsca ma każda cząsteczka. W związku z tym cząsteczki, które są w ciągłym ruchu, będą się coraz częściej zderzać ze sobą nawzajem oraz ze ściankami woreczka. Inaczej mówiąc, cząsteczki gazów zaczynają wywierać coraz większe ciśnienie na „ścianki” woreczka. Zgodnie

z prawem Pascala ciśnienie zewnętrzne wywierane na gaz znajdujący się w woreczku, rozchodzi się w nim jednakowo we wszystkich kierunkach. Zjawisko, w którym za pomocą zewnętrznej siły - w tym przypadku siły naszego oddechu - zwiększamy ciśnienie gazu w jakimś naczyniu zamkniętym, nazywamy **sprężaniem gazu**. Zwiększanie ciśnienia oznacza zwiększanie tzw. **siły parcia**, czyli siły, którą gaz naciska na ścianki naczynia, w tym przypadku - na woreczek. Dzięki temu woreczek usztywnia się i zaczyna działać tak samo, jak gdybyśmy pod książki wstawili podnośnik lub naszą dłoń.

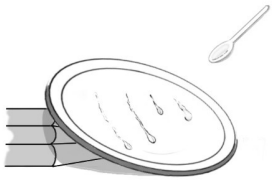
We wspomnianych wcześniej podnośnikach hydraulicznych dochodzi do wielokrotnego zwiększenia ciśnienia cieczy obecnej w środku. Dlatego to niewielkie urządzenie może ponieść samochód ważący kilka ton.

Doświadczenie 2. Lepki, niegęsty

Przygotuj:
- duży, płaski talerz,
- wodę z kranu,
- płynny miód,
- olej spożywczy,
- kisiel,
- szklankę,
- 4 łyżeczki,
- 3-5 książek (tym więcej, im cieńsze są książki),
- linijkę.

Zadanie:
1. Napełnij szklankę chłodną wodą z kranu do połowy jej wysokości. Odstaw ją na 1 godzinę, tak aby temperatura wody zbliżyła się do temperatury otoczenia.
2. Jeśli miód i olej trzymasz w chłodnym miejscu, postaw je obok szklanki z wodą na 1 godzinę.
3. Przygotuj kisiel zgodnie z instrukcją na opakowaniu. Odmierz 1/3 łyżeczki deseru na talerz i odstaw na 1 godzinę do ostygnięcia. Pozostałą część kisielu możesz zjeść – smacznego!

Eksperyment – cz. 1:
1. Ułóż stos książek o wysokości 4-5 cm obok płasko ułożonego talerza.
2. Na talerzu obok kisielu umieść 1/3 łyżeczki gliceryny. Następnie dodaj w pewnych odstępach po 1/3 łyżeczki płynnego miodu, oleju oraz wody.**Uwaga!** Do każdej substancji używaj nowej, czystej łyżeczki, żeby nie zanieczyścić np. oleju miodem.



3. Powoli podnieś talerz od tego brzegu, pod którym są naniesione badane substancje i oprzyj go o przygotowane książki.
4. Obserwuj, jak po talerzu spływają badane substancje.

Obserwacje:
1. Czy wszystkie substancje tak samo szybko spłynęły po talerzu?
2. Która substancja spłynęła najszybciej, a która najwolniej (lub nie ruszyła się wcale)?
3. Czy ślady po spływających substancjach są tej samej szerokości na całej długości?

Eksperyment – cz. 2:

1. Do wcześniej przygotowanej szklanki z wodą ostrożnie nalej pół łyżeczki oleju.
2. Obserwuj położenie oleju względem wody.
3. Punkt 1. i 2. powtórz dla płynnego miodu i ugotowanego kisielu w tej samej szklance.

Obserwacje:

1. Które substancje z tego doświadczenia pływają po powierzchni wody?
2. Które substancje z tego doświadczenia toną w wodzie?

Pytania:

3. Czy gęstość wody jest mniejsza od gęstości oleju?
4. Czy gęstość płynnego miodu jest większa od gęstości wody?
5. Czy gęstość ugotowanego kisielu jest mniejsza od gęstości wody?

Komentarz:

Ciecze składają się z cząsteczek, które w całej objętości poruszają się swobodnie. Dzięki tej własności ciecze mogą **płynąć**. W przeprowadzonym eksperymencie badane ciecze płynęły z różną szybkością. Najszybciej spłynęła woda, najwolniej kisiel. Ciecz płynie tym wolniej, im większą ma **lepkość**.

Inną własnością cieczy jest **gęstość**, którą łatwo możemy porównać np. z gęstością wody (1 kg/m3), tak jak to zostało wykonane w drugiej części doświadczenia. Ciała składające się z substancji o gęstości mniejszej niż gęstość wody – pływają przy jej powierzchni. Ciała składające się z substancji o gęstości większej niż gęstość wody – toną w wodzie.

W potocznym języku można się spotkać ze stwierdzeniem, że olej jest gęsty, bo powoli spływa po łyżeczce. Jest to jednak mylne stwierdzenie. Olej spływa po łyżeczce wolniej niż woda, bo jest od wody bardziej lepki. Jeśli przyjrzymy się własności oleju spożywczego, to zauważymy, że olej ma gęstość mniejszą niż woda, ponieważ po wlaniu do wody wypływa na jej powierzchnię .

Doświadczenie 3. Lepkość w różnych temperaturach

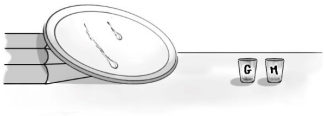
Przygotuj:

- glicerynę,
- płynny miód,
- 2 kieliszki lub miarki do syropu,
- 2 talerzyki,
- 2 łyżeczki,
- flamaster,
- linijkę,
- 3-5 książek (mniej, jeśli są grube, więcej, jeśli są cienkie).

Zadanie:

1. Opisz flamastrem kieliszki następującymi literami: G oraz M.
2. Do kieliszka opisanego literą „M” nalej jedną łyżeczkę miodu. Do kieliszka oznaczonego literą „G” nalej jedną łyżeczkę gliceryny.
3. Tak przygotowane naczynia włóż do zamrażalnika na 30 minut.
4. Brudne łyżeczki umyj i osusz przed eksperymentem.
5. Opakowanie z gliceryną oraz miodem zostaw w temperaturze pokojowej.

Eksperyment:



1. Na stoliku ułóż stos książek o wysokości około 4-5 cm.
2. Przy brzegu pierwszego talerzyka nalej łyżeczką kroplę gliceryny.
3. Wyciągnij z zamrażarki kieliszek „G” i nalej łyżeczką na ten sam talerzyk kroplę gliceryny podobnej wielkości w odległości około 5 cm od poprzedniej.
4. Podnieś talerzyk od strony kropel i oprzyj go o książki, jak pokazano na rysunku obok
5. Obserwuj spływanie obu kropel.
6. Punkty od 1. do 4. powtórz dla miodu na drugim, czystym talerzyku.

Obserwacje:

1. Czy schłodzone ciecze łatwo było wylać z kieliszków?
2. Która ciecz szybciej spływa po talerzyku, schłodzona czy ta o temperaturze pokojowej?
3. Czy dla obu cieczy obserwujesz podobny efekt?

Pytania:

1. Dlaczego schłodzone ciecze wolniej spływają po talerzyku?

Komentarz:

Ciecze składają się z mikroskopijnych cząstek, które w całej ich objętości poruszają się swobodnie. Dzięki tej własności ciecze mogą **płynąć** – w przeciwieństwie do ciał stałych, których drobiny nie mogą się swobodnie przemieszczać w całej objętości.

W przeprowadzonym eksperymencie mocno schłodzone ciecze płynęły wolniej niż te o temperaturze pokojowej. Obserwacja ta jest związana z wpływem temperatury na ruch cząsteczek. Im niższa temperatura, tym wolniej poruszają się molekuły w cieczy i trudniej cieczy płynąć. Mówimy wówczas, że ciecz jest bardziej **lepka.** Różnica w szybkości spływania była również widoczna między mocno schłodzonym miodem a gliceryną. **Lepkość** zależy nie tylko od temperatury, ale również od siły przyciągania między cząstkami. Im silniej cząstki się przyciągają, tym wolniej ciecz płynie, czyli jest bardziej lepka.

Pomyśl:

Czy ogrzana ciecz będzie mieć mniejszą lepkość niż ciecz w temperaturze pokojowej?

Doświadczenie 4. Serce

Przygotuj:
- średniej wielkości miskę,
- łyżkę,
- słoik o pojemności minimum 1l,
- 2 balony,
- 2 kubki wody,
- czerwony barwnik spożywczy lub sok malinowy albo sok z czerwonych buraków,
- 2 plastikowe słomki do napojów,
- 4 gumki recepturki,
- nożyczki.

Zadanie:
1. Ostrożnie napełnij słoik wodą do połowy jego wysokości.
2. Do wody dodaj kilka kropel barwnika spożywczego lub soku i wymieszaj całość łyżką.
3. Z pierwszego balonu odetnij szyjkę. Nie będzie ci ona już potrzebna.
4. Pozostałą część balonu rozciągnij nad otworem słoika. Balon powinien być naciągnięty w taki sposób, aby tworzył na otworze słoika płaską powierzchnię. **Uwaga! Jeżeli balon nie trzyma się wystarczająco dobrze, możesz przymocować go dodatkowo trzema gumkami recepturkami, naciągając je na szyjkę słoika.**
5. Nożyczkami wytnij na płaskiej powierzchni naciągniętego balonu dwa otwory mniejsze niż średnica słomki.
6. Koniec jednej ze słomek wsuń do drugiego balonu i zabezpiecz szczelnie gumką recepturką.
7. Obie słomki wepchnij do słoika przez wcześniej przygotowane otwory w balonie w taki sposób, aby **balon przymocowany do jednej ze słomek pozostawał na zewnątrz słoika, a obie słomki były zanurzone w wodzie z barwnikiem.**

Eksperyment:
1. Model serca umieść w misce.
   Uwaga! Słomkę bez balonu zagnij w dół – w stronę miski.
2. Delikatnie naciskaj środek rozciągniętego na otworze słoika balonu i obserwuj, co się dzieje u wylotu słomki.
3. Następnie zdejmij balonik ze słomki i ponownie delikatnie naciskaj środek balonu. Obserwuj, co się dzieje z wodą w słomce bez balonu.

Obserwacje:
1. Co się dzieje z wodą po naciśnięciu balonu rozciągniętego na słoiku?
2. Co się dzieje z wodą pozostałą w słomce po zwolnieniu nacisku na balon, kiedy drugi balon znajduje się na słomce?
3. Co się dzieje z wodą pozostałą w słomce po zwolnieniu nacisku na balon, kiedy na słomce nie ma drugiego balonu?

Pytania:
1. Jakiemu elementowi serca odpowiada balonik przymocowany do jednej ze słomek w modelu serca?

Komentarz:

W zbudowanym przez ciebie modelu możesz obserwować działanie jednej z **komór serca** oraz pracę zastawki. Wyobraź sobie, że naciągnięty na słoik balon jest ścianą komory serca. Naciskany przez Ciebie powoduje, że ciecz wypompowywana jest przez słomkę na zewnątrz analogicznie, jak ma to miejsce podczas rzeczywistego skurczu serca.

Drugi balon, który jest nałożony na jedną ze słomek, odpowiada za pokazanie pracy **zastawki serca**. Kiedy znajduje się na słomce, ciecz wypływa tylko w jednym kierunku, a pozostała w słomce woda nie cofa się z powrotem do słoika. W przypadku jego braku w modelu, ciecz wypływa przez obie słomki naraz, a po zwolnieniu nacisku na balon pozostała w słomkach ciecz spływa do słoika.

Jednym z najbardziej wyjątkowych mięśni w ludzkim ciele jest mięsień sercowy, w skrócie nazywany po prostu sercem. Serce zlokalizowane jest w klatce piersiowej pomiędzy płucami a mostkiem. Wielkością przypomina ściśniętą pięść. Każdej doby serce kurczy się około 100 tysięcy razy, przepompowując około 7 tysięcy litrów krwi, a wraz z nią substancje odżywcze i tlen, przez ponad 100 tysięcy kilometrów naczyń krwionośnych do każdego zakątka naszego ciała. Serce zbudowane jest z tkanki mięśniowej poprzecznie prążkowanej i jego praca nie podlega naszej woli. Oznacza to, że samo kontroluje swoją pracę i nawet wyciągnięte z klatki piersiowej (np. podczas przeszczepu serca) może dalej kurczyć się przez jakiś czas. Dzieje się tak ze względu na obecność w sercu specjalnych komórek, które pełnią funkcję **rozrusznika**, zmuszając komórki mięśniowe do skurczu.

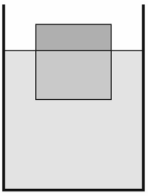
Serce człowieka zbudowane jest z czterech jam: lewej i prawej komory oraz lewego i prawego przedsionka. Główną funkcję skurczową pełni lewa komora, która jest zdecydowanie grubsza i większa od komory prawej. To właśnie z niej krew jest pompowana do wszystkich narządów naszego ciała.

Ważnym elementem serca są zastawki. U człowieka jest ich cztery. Działają one jak zaworki, które chronią przez cofaniem się krwi z powrotem do serca i umożliwiają jej przepływ w organizmie tylko w jednym kierunku.

Doświadczenia pochodzą z ogólnopolskiego Konkursu Nauk Przyrodniczych „Świetlik” z lat 2019-2021

Zadania z *Lwiątka*

1. (*Lwiątko 2020*, klasy 7 i 8 szkoły podstawowej.) Drewniany klocek pływa w cieczy (rysunek). Jak zmieni się zanurzenie klocka, jeśli naczynie przeniesiemy na Księżyc, gdzie przyspieszenie grawitacyjne jest około 6 razy mniejsze niż na Ziemi?



A. Nie zmieni się.
B. Zmniejszy się.
C. Zwiększy się, ale klocek nie zatonie.
D. Klocek zatonie.
E. Jest za mało danych, aby udzielić jednoznacznej odpowiedzi.

Prawidłowa odpowiedź: A.

Wytłumaczenie: W stanie równowagi zanurzenie klocka jest takie, że działająca na klocek siła wyporu równoważy jego ciężar:

$$d_{\text{cieczy}} g V_{\text{zanurzonej części}} = d_{\text{klocka}} g V_{\text{klocka}}.$$

Po obu stronach powyższego równania występuje ta sama wartość przyspieszenia grawitacyjnego g, która nie wpływa na stosunek objętości zanurzonej części klocka do całej jego objętości.

2. (*Lwiątko* 2020, klasy 7 i 8 szkoły podstawowej) Jednostkę ciśnienia w układzie SI można zapisać w postaci wyrażenia

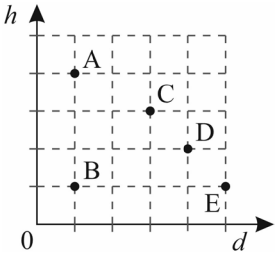
A. $\frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}^2}$,
B. $\frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{s}^2}$,
C. $\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$,
D. $\frac{\text{kg}}{\text{m}^2\cdot\text{s}}$.
E. Żadnego z podanych.

Prawidłowa odpowiedź: A

Wytłumaczenie: Jednostką ciśnienia w SI jest paskal:

$$[p] = 1\,\text{Pa} = 1\,\frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1\,\frac{\frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{s}^2}}{\text{m}^2} = 1\,\frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}^2}.$$

3. (*Lwiątko* 2020, klasy 7 i 8 szkoły podstawowej) Pięć naczyń napełniono różnymi cieczami. Na wykresie obok zaznaczono punkty odpowiadające gęstości cieczy *d* oraz wysokości *h* naczynia. Przy dnie którego naczynia panuje największe ciśnienie?



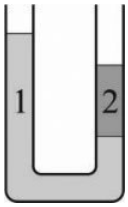
Prawidłowa odpowiedź: C

Wytłumaczenie: Ciśnienie hydrostatyczne na głębokości *h* w cieczy o gęstości d jest równe

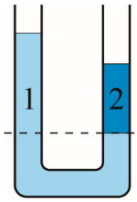
$$p = dgh + p_{at},$$

gdzie p_{at} to ciśnienie atmosferyczne powietrza nad cieczą. Wystarczy porównać wartości iloczynu $d \cdot h$. Jeśli przyjmiemy jako jednostkę jedną kratkę układu współrzędnych, na wykresie iloczyny te wynoszą kolejno: 4, 1, 9, 8, 5.

4. (*Lwiątko* 2019, klasy 7 i 8 szkoły podstawowej) W naczyniu w kształcie litery U (tzw. U-rurce) znajduje się woda i olej jak na rysunku.



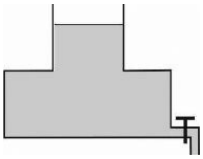
A. Ciecz 1 to na pewno woda, a 2 to na pewno olej.
B. Ciecz 1 to na pewno olej, a 2 to na pewno woda.
C. Nie można jednoznacznie stwierdzić, która ciecz to woda, a która to olej bez znajomości ciśnienia atmosferycznego.
D. Nie można jednoznacznie stwierdzić, która ciecz to woda, a która to olej bez znajomości pola przekroju naczynia.
E. Żadne z powyższych stwierdzeń nie jest prawdziwe.

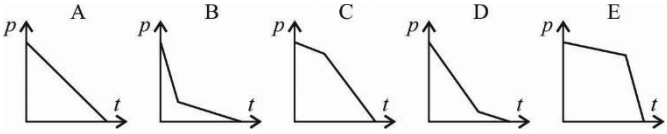


Prawidłowa odpowiedź: B

Wytłumaczenie: Zgodnie z prawem naczyń połączonych ciśnienia w obu rurkach na poziomie styku wody i oleju (przerywana linia na rysunku obok) są równe, a zatem w lewej rurce znajduje się ciecz o mniejszej gęstości, czyli olej.

5. (*Lwiątko* 2019, klasy 7 i 8 szkoły podstawowej) Z naczynia pokazanego na rysunku obok woda wypływa przez kran ze stałą szybkością. Który z wykresów przedstawia zależność ciśnienia wody *p* przy dnie naczynia od czasu *t*?

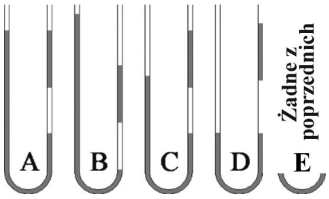




Prawidłowa odpowiedź: B

Wytłumaczenie: Górna część naczynia jest węższa od dolnej (ma mniejszy przekrój), więc w górnej części naczynia poziom cieczy szybciej się obniża, przez co ciśnienie szybciej spada.

6. (*Lwiątko 2010*, klasy 1 i 2 gimnazjum) W rurce pokazanej na rysunku jest woda i bąbel powietrza. Który rysunek pokazuje możliwe położenie poziomów wody, po ustaniu ich wahań? Zjawiska włoskowatości nie należy brać pod uwagę.



Prawidłowa odpowiedź: C

Wytłumaczenie: Aby ciecz była w równowadze, siły działające na ciecz w najniższej części rurki powinny równoważyć się, czyli słup cieczy powinien mieć w sumie tę samą wysokość w obu ramionach rurki (ciężar powietrza jest pomijalnie mały). Ten warunek spełnia tylko położenie C.

7. (*Lwiątko* 2019, klasy 7 i 8 szkoły podstawowej) Jeśli ciśnienie atmosferyczne wynosi 1000 hPa, to ciśnienie 1000 kPa panuje w wodzie (d = 1 kg/dm³) na głębokości około

A. 0,9 m,
B. 9 m,
C. 90 m,
D. 900 m,
E. 90 km.

Prawidłowa odpowiedź: C

Wytłumaczenie: Ciśnienie hydrostatyczne na głębokości h w cieczy o gęstości d jest równe

$$p = dgh + p_{at},$$

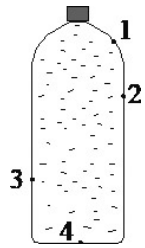
gdzie p_{at} to ciśnienie atmosferyczne powietrza nad cieczą. Szukaną głębokość można więc obliczyć, korzystając ze wzoru:

$$h = \frac{p - p_{at}}{dg}.$$

Podstawiając powyższe dane, otrzymujemy

$$h = \frac{1000\,000\,\text{Pa} - 100\,000\,\text{Pa}}{1000\,\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 10\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = \frac{900\,000\,\text{Pa}}{10\,000\,\frac{\text{N}}{\text{m}^3}} = 90\,\text{m}.$$

8. (*Lwiątko 2010*, klasy 3 gimnazjum) Plastikową butelkę wypełniono całkowicie wodą, szczelnie zakręcono i powieszono za zakrętkę w pozycji pionowej nad zlewem. Następnie w butelkę wbito igłę w jednym z miejsc oznaczonych numerami (rysunek). W którym przypadku po wyjęciu igły przez otwór wypłynie tyle wody, że jej poziom w butelce obniży się do poziomu otworu?



A. W każdym z przypadków 1-4.
B. Tylko w 1, 2, 3.
C. Tylko w 1, 2.
D. Tylko w 1.
E. W żadnym z przypadków 1-4.

Prawidłowa odpowiedź: E

Wytłumaczenie: Woda wypływa, gdy w otworze jej ciśnienie jest większe od ciśnienia atmosferycznego. Ze szczelnie zamkniętej i całkowicie wypełnionej butelki woda nie będzie ciec przez żaden pojedynczy otwór, bo ciśnienie hydrostatyczne słupa wody w butelce będzie zawsze mniejsze od ciśnienia atmosferycznego (butelka musiałaby mieć ponad 10 m wysokości, by było inaczej). W praktyce zdarza się, że po wyciagnięciu igły wypływa parę kropel, z powodu sprężystości ścian butelki, zachowującej się w tym momencie jak nadmuchany balon.