

Fizyka

ZAKRES PODSTAWOWY



Zmiana MEN 2024



Oznaczono usunięte
i zmienione treści

2

Podręcznik dla **szkół ponadpodstawowych**

Adam Ogaza

Fizyka

Podręcznik dla **szkół ponadpodstawowych**

2

ZAKRES PODSTAWOWY

 **OPERON**
Edukacja jest podróżą

2023

Projekt okładki: Paweł Kwacz
Redaktor prowadzący: Jarosław Dworowski
Redakcja językowa: Monika Turala
Redakcja graficzna i skład: Maciej Laska
Korekta techniczna: Magdalena Kuchnowska

Zdjęcia: Library of Congress/loc.gov, obrazfizyki.pl, Adam Ogaza, urbanbuzz/Shutterstock, Shutterstock, Wikipedia, Wikipedia/Radomil/CC BY-SA 3.0, Wikipedia/Markus Gayda/CC BY-SA 3.0, Wikipedia/Rita Greer/FAL, Wikipedia/Vonmangle/CC BY-SA 3.0, Wikipedia/Zátonyi Sándor/CC BY-SA 3.0

OPERON Sp. z o.o. oświadcza, że z należytą starannością podjęło wszelkie działania zmierzające do powiadomienia podmiotów majątkowych praw autorskich do utworów słownych i fotograficznych wykorzystanych w podręczniku o zamiarze ich publikacji celem uzyskania od twórców lub ich następców prawnych wymaganej zgody za przysługującym wynagrodzeniem w stosownej wysokości. Osoby, których prawa w sposób niezawiniony przez wydawnictwo zostały naruszone, prosimy o bezpośredni kontakt z wydawcą.

Podręcznik dopuszczony do użytku szkolnego przez ministra właściwego do spraw oświaty i wychowania i wpisany do wykazu podręczników przeznaczonych do kształcenia ogólnego do nauczania fizyki w zakresie podstawowym na poziomie szkoły ponadpodstawowej, na podstawie opinii rzeczoznawców: mgr Teresy Kutajczyk, prof. dr. hab. Bronisława Słowińskiego, dr. hab. Jarosława Pacuły.

Etap edukacyjny: III
Typ szkoły: szkoła ponadpodstawowa
Zakres kształcenia: podstawowy
Rok dopuszczenia: 2020
Numer dopuszczenia: 1036/2/2020

© OPERON Sp. z o.o. & Adam Ogaza
Gdynia 2020

Wszelkie prawa zastrzeżone. Kopiowanie w całości lub we fragmentach bez zgody wydawcy zabronione.
N7188

Wydawca:
OPERON Sp. z o.o.
81-212 Gdynia, ul. Hutnicza 3
tel. centrali 58 679 00 00
e-mail: info@operon.pl
www.operon.pl

ISBN 978-83-7879-998-6

05/23/XIV/US70

Spis treści

Wstęp.....	4
1. Drgania	
1.1. Sprężystość ciał	8
1.2. Ruch drgający.....	14
1.3. Przemiany energii w ruchu drgającym	19
1.4. Badanie ruchu drgającego	22
1.5. Drgania tłumione i wymuszone. Rezonans	26
Analiza tekstu: Rezonans akustyczny	32
Podsumowanie przed sprawdzianem.....	34
2. Termodynamika	
2.1. Rozszerzalność cieplna ciał stałych.....	36
2.2. Rozszerzalność cieplna cieczy i gazów.....	44
2.3. Energia wewnętrzna i ciepło	48
2.4. Sposoby przekazywania energii.....	51
2.5. Pierwsza zasada termodynamiki	56
2.6. Ciepło właściwe	60
2.7. Przemiany fazowe	64
2.8. Bilans cieplny	71
2.9. Wyznaczanie ciepła właściwego metalu	76
2.10. Wartość energetyczna paliw i żywności.....	79
2.11. Woda i jej właściwości.....	86
2.12. Zjawisko dyfuzji	90
Analiza tekstu: Historia <i>perpetuum mobile</i> . W poszukiwaniu wiecznego ruchu	95
Podsumowanie przed sprawdzianem.....	99
3. Elektrostatyka	
3.1. Ładunek elektryczny. Zasada zachowania ładunku	102
3.2. Prawo Coulomba.....	110
3.3. Pole elektryczne.....	113
3.4. Obserwacja linii pola elektrycznego.....	117
3.5. Zachowanie się ładunków na przewodniku	120
3.6. Kondensatory	127
Analiza tekstu: Coulomb i jego poprzednicy	133
Podsumowanie przed sprawdzianem.....	135
Odpowiedzi do zadań	136
Indeks.....	137
Tablice	139

Wstęp

Jak jest zbudowany nasz podręcznik

Podręcznik pozwala na pełne wykorzystanie nowoczesnych metod dydaktycznych w nauczaniu fizyki. Zgodnie z założeniami reformy programowej uczniowie liceów i techników będą się uczyć tego przedmiotu w zakresie podstawowym w klasach:

- pierwszej w wymiarze 1 godziny tygodniowo,
- drugiej w wymiarze 1 godziny tygodniowo,
- trzeciej w wymiarze 2 godzin tygodniowo.

Zanim zaczniecie korzystać z podręcznika, zapoznajcie się z jego budową i przyjrzyjcie się wszystkim jego elementom. Zostały one skonstruowane tak, by ułatwić wam naukę i pomóc w błyskawicznym znalezieniu potrzebnych informacji.



Każdy rozdział podręcznika otwiera **spis tematów** z danego obszaru.

Bezpośrednio pod tytułem tematu znajdziecie moduł „Na tej lekcji” – jego zadaniem jest ukierunkowanie was na cele realizowane w danym temacie.

W tekście pojawiają się **wytluszczenia**. Dzięki nim łatwiej odnajdziecie istotne zagadnienia, pojęcia i nazwy.

Hasła na marginesach to treści obowiązkowe do zapamiętania z lekcji. Zostaną one powtórzone w podsumowaniu lekcji.

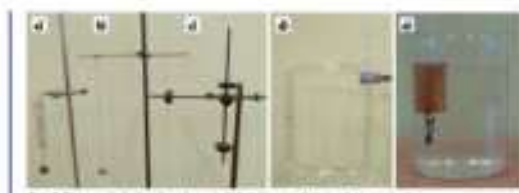


Na podstawie wykonanych pomiarów sporządźmy wykres zależności czasu przepływu cieczy od wysokości. Do pomiaru czasu użyjmy zegara cyfrowego. Czas przepływu cieczy przez rurkę należy zmierzyć w trzech różnych miejscach. Wyniki pomiarów zapisz w tabeli. Wykres czasu przepływu cieczy od wysokości (rys. 17).

h, m	t, s	t, s	t, s	t, s	t, s	t, s	t, s
0,1	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
0,2	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
0,3	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
0,4	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
0,5	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
0,6	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
0,7	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
0,8	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
0,9	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
1,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Rys. 17. Wykres zależności czasu przepływu cieczy od wysokości.

Wykres zależności czasu przepływu cieczy od wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas przepływu cieczy z wysokością. Wykres zależności czasu przepływu cieczy od wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas przepływu cieczy z wysokością.



Rys. 18. Pomiar czasu spadku ciała. A) Ciężarek na nici, B) Ciężarek na nici, C) Ciężarek na nici, D) Ciężarek na nici, E) Ciężarek na nici, F) Ciężarek na nici, G) Ciężarek na nici, H) Ciężarek na nici, I) Ciężarek na nici, J) Ciężarek na nici, K) Ciężarek na nici, L) Ciężarek na nici, M) Ciężarek na nici, N) Ciężarek na nici, O) Ciężarek na nici, P) Ciężarek na nici, Q) Ciężarek na nici, R) Ciężarek na nici, S) Ciężarek na nici, T) Ciężarek na nici, U) Ciężarek na nici, V) Ciężarek na nici, W) Ciężarek na nici, X) Ciężarek na nici, Y) Ciężarek na nici, Z) Ciężarek na nici.

Wzrost czasu spadku ciała z wysokością jest proporcjonalny do kwadratu wysokości. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością.

Wzrost czasu spadku ciała z wysokością jest proporcjonalny do kwadratu wysokości. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością.

Wzrost czasu spadku ciała z wysokością jest proporcjonalny do kwadratu wysokości. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością.

Wzrost czasu spadku ciała z wysokością jest proporcjonalny do kwadratu wysokości. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością.

Tabele i wykresy pomogą wam usystematyzować wiedzę.

Śledźcie uważnie **rozwiązania przykładów**, a łatwiej zrozumiecie omawiane zagadnienia.

W oknach **Chcesz wiedzieć więcej?** znajdziecie dodatkowe treści dla osób interesujących się danym tematem.

Doświadczenia to blok zadań, w których działacie praktycznie. Umożliwi to wam zrozumienie zagadnień fizycznych poprzez działanie. Przekonacie się, że nauka fizyki jest ciekawa.

Definicje, prawa i zasady wyróżniono kolorową czcionką. Dzięki temu od razu je zauważycie i szybko znajdziecie podczas powtórek.

Zadania do rozwiązania przećwiczycie w toku lekcji lub wykorzystacie do nauki w domu lub przed kartkówką czy sprawdzianem. Zadania o podwyższonym stopniu trudności oznaczono gwiazdką: 4*.

Uwaga: podręcznik jest przeznaczony do wielokrotnego użytku, dlatego wszystkie odpowiedzi do zadań oraz rozwiązania ćwiczeń zapisujecie w zeszytach.

Podsumowanie lekcji to esencja najważniejszych treści do zapamiętania. Jeśli ich nie pamiętacie, wróćcie na stronę wskazaną obok. Znajdziecie tam na marginesie odpowiednie hasło, a w treści lekcji – jego omówienie.

Podsumowanie przed sprawdzianem zawiera najważniejsze treści do zapamiętania z rozdziału. Jeśli ich nie pamiętacie, wróćcie na stronę wskazaną obok i poszukajcie hasła na marginesie.



Rys. 19. Pomiar czasu spadku ciała.

Wzrost czasu spadku ciała z wysokością jest proporcjonalny do kwadratu wysokości. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością.

Wzrost czasu spadku ciała z wysokością jest proporcjonalny do kwadratu wysokości. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością.

Wzrost czasu spadku ciała z wysokością jest proporcjonalny do kwadratu wysokości. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością.

Wzrost czasu spadku ciała z wysokością jest proporcjonalny do kwadratu wysokości. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością.

Wzrost czasu spadku ciała z wysokością jest proporcjonalny do kwadratu wysokości. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością.

Wzrost czasu spadku ciała z wysokością jest proporcjonalny do kwadratu wysokości. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością.

Wzrost czasu spadku ciała z wysokością jest proporcjonalny do kwadratu wysokości. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością.

Wzrost czasu spadku ciała z wysokością jest proporcjonalny do kwadratu wysokości. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością.

Wzrost czasu spadku ciała z wysokością jest proporcjonalny do kwadratu wysokości. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością.

Wzrost czasu spadku ciała z wysokością jest proporcjonalny do kwadratu wysokości. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością.

Wzrost czasu spadku ciała z wysokością jest proporcjonalny do kwadratu wysokości. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością.

Wzrost czasu spadku ciała z wysokością jest proporcjonalny do kwadratu wysokości. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością.

Wzrost czasu spadku ciała z wysokością jest proporcjonalny do kwadratu wysokości. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością.

Wzrost czasu spadku ciała z wysokością jest proporcjonalny do kwadratu wysokości. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością.

Wzrost czasu spadku ciała z wysokością jest proporcjonalny do kwadratu wysokości. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością.

Wzrost czasu spadku ciała z wysokością jest proporcjonalny do kwadratu wysokości. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością. Wynik pomiaru czasu spadku ciała z wysokości pomoże nam zrozumieć, jak zmienia się czas spadku ciała z wysokością.



W tym rozdziale będziemy kontynuować nasze rozważania dotyczące opisywania ruchu. W klasie pierwszej nauczyłeś/nauczyłaś się analizować najprostsze przypadki ruchu: jednostajny (gdy wartość prędkości jest stała) i jednostajnie zmienny (gdy wartość prędkości zmienia się zawsze o tę samą wartość w jednakowych przedziałach czasu). Ich opis matematyczny jest stosunkowo prosty. Wiesz już, jak obliczać drogę, prędkość i przyspieszenie w takim ruchu.

Rzeczywistość jest jednak bardziej skomplikowana. Najczęściej mamy do czynienia z ruchem niejednostajnie zmiennym. Jednym z jego rodzajów są ruchy drgające. Występują one wszędzie. Drgają liście na wietrze, struny gitary, nasze serca, lekkie przedmioty pływające na falującej wodzie. Drgają atomy ciał stałych, uwięzione w sieci krystalicznej. Pełny opis matematyczny takich ruchów jest trudny, ale można wprowadzić kilka pojęć charakteryzujących ten ruch. Zajmiemy się tym na kolejnych lekcjach.

W przypadku ciał stałych, cieczy i gazów ruch drgający jest związany z ich własnością nazywaną sprężystością ośrodka. Na sprężystość ciał zwracaliśmy uwagę już w klasie pierwszej, przy okazji omawiania energii potencjalnej. Teraz przyjrzymy się sprawie nieco dokładniej.

1. Drgania

▶ Sprężystość ciał

▶ Ruch drgający

▶ Przemiany energii w ruchu drgającym

▶ Badanie ruchu drgającego

▶ Drgania tłumione i wymuszone. Rezonans

▶ Analiza tekstu: Rezonans akustyczny



1.1. Sprężystość ciał

NA TEJ LEKCJI

- dowiesz się dokładniej, na czym polega sprężystość,
- poznasz podstawowe prawo rządzące sprężystością,
- przekonasz się, że ciała sprężyste zachowują swoje właściwości jedynie w pewnych granicach,
- poznasz przykłady zastosowań sprężystości.

Pojęcie sprężystości

Doświadczenie 1.

Pomoce: sprężyna, gumka recepturka, folia, plastikowa linijka, balonik nadmuchany powietrzem, szczelna strzykawka, skorupka od jajka, plastelina.

Wykonaj wymienione niżej czynności i zanotuj w zeszycie swoje spostrzeżenia.

1. Rozciągnij sprężynę pewną niewielką siłą, a następnie przestań ją rozciągać. Ściśnij tę sprężynę, a następnie przestań ścisnąć.
2. Rozciągnij gumkę recepturkę niewielką siłą i przestań ją rozciągać. Następnie rozciągnij ją, używając swojej maksymalnej siły.
3. Rozciągnij delikatnie kawałek plastikowej folii i przestań rozciągać. Następnie użyj do rozciągania większej siły.
4. Delikatnie zegnij plastikową linijkę, a następnie przestań ją zginać.
5. Nadmuchany balonik ściśnij tak, by zmienić jego kształt. Następnie przestań go ścisnąć.
6. Nabierz do strzykawki pewną ilość powietrza. Następnie zatkaj palcem wylot i naciśnij na tłok, by sprężyć zawarte w strzykawce powietrze. Puść tłok. Cały czas zatykając wylot, pociągnij za tłok, a następnie przestań pociągać.
7. Naciśnij na skorupkę od jajka niewielką siłą, a następnie użyj większej siły.
8. Naciśnij na kawałek plasteliny bardzo niewielką siłą, próbując ją wygiąć lub spłaszczyć. Następnie użyj większej siły.

Co zauważyłeś/zauważyłaś w każdym z tych przypadków?

Sprężyna ściśnięta lub rozciągnięta niewielką siłą po jej ustaniu wraca do pierwotnego kształtu. Gdybyśmy użyli większej siły, sprężyna zostałaby trwale zdeformowana – nie odzyskałaby pierwotnej postaci. Podobnie gumka – w szerokim zakresie sił odkształcających utrzymuje swoją zdolność do powrotu do początkowej długości. Po przekroczeniu pewnej granicy – pęka. Folia pod wpływem niewielkich sił rozciągających zachowuje się jak sprężyna. Pod wpływem większych sił rozciąga się w sposób trwały. Jeszcze większe siły powodują jej rozerwanie.

Linijka (zarówno plastikowa, jak i drewniana) w pewnym zakresie sił odkształca się, a po użyciu zbyt dużej siły pęka. Balonik „pamięta” swój kształt i objętość. Jeśli nie



użyjemy zbyt dużej siły, naruszającej strukturę gumy, powróci do pierwotnej postaci. Tłok strzykawki, gdy przestaniemy go naciskać lub ciągnąć, wróci na poprzednie miejsce. Skorupka jajka pod wpływem małych sił się ugina, a pod wpływem większych – pęka. Nawet plastelina w pewnym zakresie sił zachowuje się w sposób sprężysty. Pod wpływem większych sił ulega trwałemu odkształceniu, a pod wpływem jeszcze większych – rozerwaniu.

Po przeanalizowaniu tych przypadków możemy sformułować definicję sprężystości:

Sprężystość to cecha ciał odkształcalnych, polegająca na odzyskiwaniu przez nie swych pierwotnych kształtów i objętości.

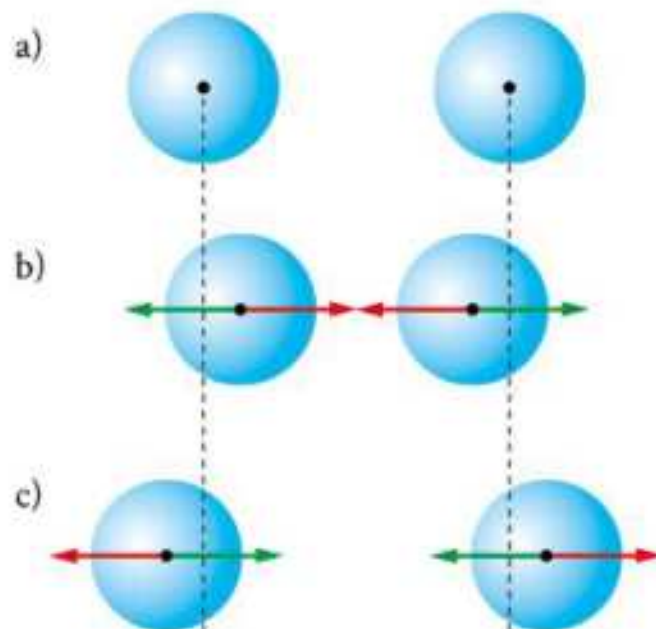
sprężystość

Wyróżniamy dwa rodzaje sprężystości: **sprężystość kształtu** (postaci) i **sprężystość objętości**. Ciała stałe „pamiętają” zarówno swój kształt, jak i objętość. Gąbkę możemy ścisnąć tak, że zachowa swój pierwotny kształt, ale zmniejszy objętość. Możemy ją też wygiąć lub skrzywić. Po ustaniu siły odkształcającej w każdym przypadku wróci do pierwotnej postaci. Ciecze i gazy (pod ustalonym ciśnieniem) nie mają własnego kształtu, ale zachowują sprężystość objętości. Gaz w baloniku w opisywanym doświadczeniu po ustaniu sił odkształcających odzyskał swoją pierwotną objętość (podobnie jak powietrze w strzykawce). Sam kształt balonika zdeterminowany jest jednak przez właściwości sprężyste jego powłoki.

rodzaje sprężystości

Dlaczego ciała stałe „pamiętają” swój kształt i objętość? Odpowiedzi na to pytanie należy poszukać na poziomie molekularnym (cząsteczkowym). Atomy ciał stałych mają ściśle określone położenia i wykonują jedynie drgania wokół nich. Na każdy z atomów działają siły molekularne ze strony wszystkich sąsiednich atomów. Siły te się równoważą, dzięki czemu atomy pozostają na swoich miejscach. Dla każdej pary atomów istnieje pewna charakterystyczna odległość (zależna od temperatury), przy której atomy te ani nie są do siebie przyciągane, ani odpychane. Gdy próbujemy zbliżyć do siebie atomy (ściskając ciało), pojawia się odpychająca siła oddziaływań między nimi. Gdy próbujemy atomy oddalić (rozciągając ciało), pojawia się molekularna siła przyciągająca. Tak więc obserwowane w skali makroskopowej siły sprężystości są skutkiem oddziaływań molekularnych w skali mikro.

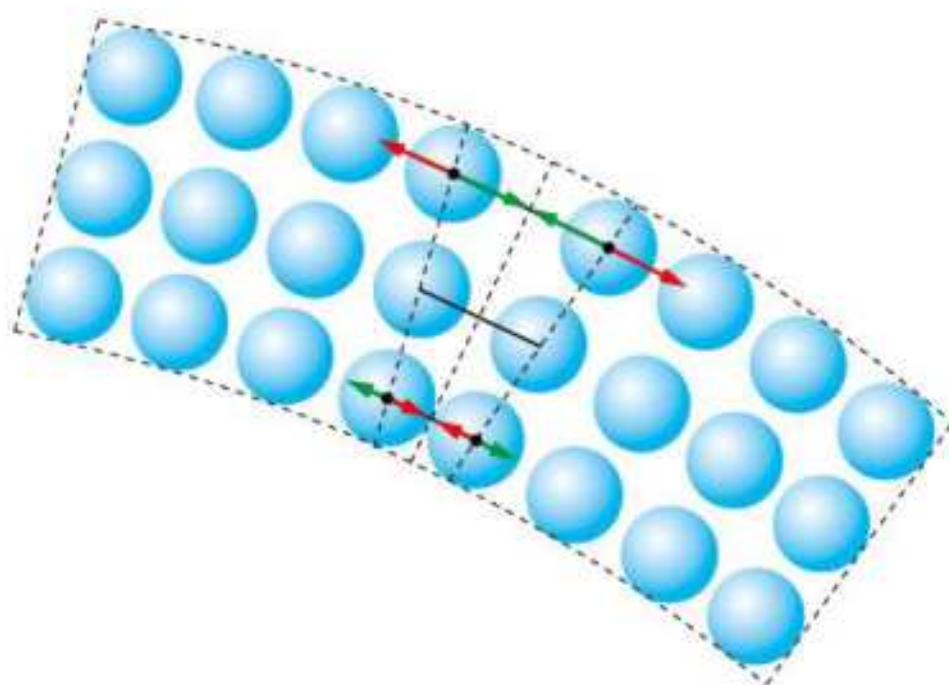
Rys. 1. a) Ciało niepoddane działaniu sił zewnętrznych. Atomy znajdują się w typowych dla siebie odległościach, w których wypadkowe siły oddziaływań międzyatomowych są równe zero.
b) Po przyłożeniu zewnętrznej siły ściskającej (kolor czerwony) pojawia się molekularna siła odpychająca (kolor zielony) równoważąca siłę zewnętrzną.
c) Próba rozciągnięcia ciała skutkuje pojawieniem się międzyatomowej siły przyciągającej. Ustala się nowy stan równowagi.



Gdy chcemy ciało wygiąć lub skrzywić, w niektórych jego obszarach powodujemy oddalanie się jego atomów, a w innych – zbliżanie. Pojawiające się siły molekularne dążą do przywrócenia stanu początkowego.



1. DRGANIA



Rys. 2. Obraz mikroskopowy ciała zginanego. W niektórych warstwach siła zewnętrzna oddala od siebie atomy, a w innych – zbliża. Pojawiają się siły molekularne dążące do przywrócenia początkowych odległości między atomami.

Prawo Hooke'a

Doświadczenie 2.

Pomoce: siłomierz sprężynowy, statyw, komplet obciążników na haczykach, linijka.

Zamocuj siłomierz na statywie. Sprawdź, czy jest dobrze wyregulowany: bez obciążenia powinien pokazywać 0. Następnie zawieszaj na nim kolejno jednakowe ciężarki i notuj wskazania siłomierza. Przekonaj się za pomocą linijki, że odległości pomiędzy kolejnymi działkami na skali siłomierza są jednakowe.

Rys. 3. Przyrost długości sprężyny jest wprost proporcjonalny do działającej siły. Widać to wyraźnie na skali siłomierza, która jest liniowa, tzn. jednakowe odległości pomiędzy działkami na skali odpowiadają jednakowym różnicom wielkości siły wyrażonej w niutonach, jednostkach siły.





Analiza wskazań siłomierza, wewnątrz którego znajduje się sprężyna, przekonuje nas, że wydłużenie sprężyny jest wprost proporcjonalne do działającej siły. Fakt ten został zbadany doświadczalnie już w XVII wieku przez Roberta Hooke'a i nosi nazwę prawa Hooke'a.

Rys. 4. Robert Hooke (wym. Huk; 1635–1703) – przyrodnik angielski, jeden z największych eksperymentatorów XVII wieku. Projektował i konstruował bardzo skomplikowane jak na swoje czasy mechanizmy. Odkrył prawo dotyczące sprężystości. Skonstruował nowy typ teleskopu zwierciadlanego. Dzięki obserwacjom mikroskopowym i teleskopowym potwierdził istnienie komórek roślinnych oraz odkrył m.in. Czerwoną Plamę na Jowiszu.



Prawo Hooke'a

Odształcenie ciała pod wpływem działającej na nie siły jest proporcjonalne do tej siły. Można zapisać wzór:

$$F = k \cdot x$$

W powyższym wzorze F oznacza siłę przyłożoną do ciała, x – wydłużenie tego ciała, a k jest współczynnikiem proporcjonalności charakteryzującym dane ciało i nosi nazwę **współczynnika sprężystości**. Jak łatwo wyliczyć, $k = \frac{F}{x}$. Jednostką współczynnika sprężystości jest niuton na metr, $\frac{\text{N}}{\text{m}}$. Współczynnik ten mówi, jakiej siły należy użyć, aby ciało wydłużyło się o 1 metr.

Trzeba stale pamiętać, że prawo Hooke'a ma ograniczony zakres stosowalności. Jak przekonaliśmy się w doświadczeniu 1, odnosi się ono tylko do niektórych ciał i ograniczonych wartości sił odkształcających. Przekroczenie granicznych wartości siły powoduje trwałe odkształcenie ciała (odkształcenie plastyczne) lub jego pęknięcie.



Rys. 5. Siłomierze rozciągnięte zbyt dużą siłą. Ich sprężyny już nigdy nie powrócą do poprzedniego kształtu. Należy unikać przekraczania zakresów przyrządów pomiarowych (dotyczy to nie tylko siłomierzy).

prawo Hooke'a

współczynnik
sprężystości

zakres
stosowalności
prawa Hooke'a



Przykład 1.

Zakres siłomierza wynosi 3 N, a cała jego skala ma 12 cm długości. Oblicz współczynnik sprężystości sprężyny użytej do budowy tego siłomierza.

Dane:

$$F = 3 \text{ N}$$

$$x = 12 \text{ cm} = 0,12 \text{ m}$$

Szukane:

$$k = ?$$

Rozwiązanie:

$$k = \frac{F}{x}, \quad k = \frac{3 \text{ N}}{0,12 \text{ m}} = 25 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Przykład 2.

Trzy identyczne sprężyny o współczynniku sprężystości $k = 30 \frac{\text{N}}{\text{m}}$ połączone ze sobą a) równolegle, b) szeregowo (patrz rysunek). Oblicz współczynniki sprężystości układu sprężyn w obu przypadkach.

Rozwiązanie

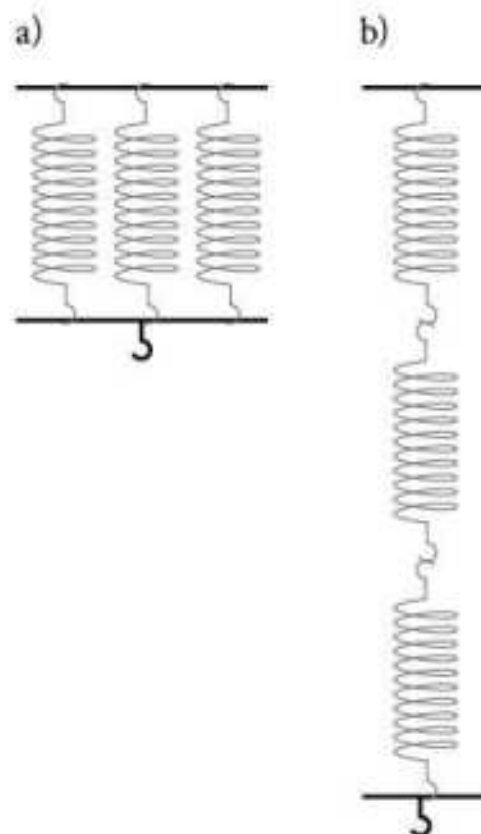
W połączeniu równoległym wydłużenie układu sprężyn jest równe wydłużeniu każdej ze sprężyn z osobna. Siła potrzebna do rozciągnięcia trzech sprężyn jest trzykrotnie większa niż siła potrzebna do rozciągnięcia pojedynczej sprężyny. Dzieląc trzykrotnie większą siłę przez niezmienną wydłużenie, otrzymujemy trzykrotnie większą wartość współczynnika sprężystości.

$$\text{Odpowiedź: } k_r = \frac{3F}{x} = 3k, \quad k_r = 90 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

W połączeniu szeregowym na mocy trzeciej zasady dynamiki na każdą ze sprężyn działa taka sama siła, równa sile działającej na cały układ. Wydłużenie układu sprężyn będzie tym razem trzy razy większe niż wydłużenie pojedynczej sprężyny. Dzieląc niezmienną siłę przez trzykrotnie większe wydłużenie, dostajemy trzykrotnie mniejszą wartość współczynnika sprężystości.

$$\text{Odpowiedź: } k_s = \frac{F}{3x} = \frac{k}{3}, \quad k_s = 10 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Różnica wyników bierze się stąd, że w połączeniu równoległym sumują się siły niezbędne do rozciągnięcia sprężyn, a w połączeniu szeregowym sumują się ich wydłużenia.



Rys. 6. Układ sprężyn połączonych: a) równolegle, b) szeregowo.



Chcesz wiedzieć więcej?

Sformułowaliśmy prawo Hooke'a dla najprostszego przypadku – dla rozciąganej sprężyny. W rzeczywistości sprężystość ciał wynika z ich geometrii oraz właściwości materiałów użytych do ich budowy. Wiadomo, że jest trudniej rozciągnąć gruby pręt niż cienki drut wykonany z tego samego materiału. Dlatego współcześnie formułujemy prawo Hooke'a w sposób bardziej ogólny, posługując się pojęciem naprężenia. Naprężenie to stosunek siły przyłożonej do ciała do pola przekroju tego ciała. Jednostką naprężenia (podobnie jak ciśnienia) jest paskal. Ogólniejsze sformułowanie prawa Hooke'a brzmi następująco: **w granicach sprężystości odkształcenia ciał sprężystych są wprost proporcjonalne do wywołującego je naprężenia.**

Tak sformułowane prawo odnosi się do wszystkich przypadków odkształceń (nie tylko do rozciągania sprężyny). Pod pojęciem odkształcenia możemy rozumieć względną zmianę długości pręta, względną zmianę objętości ciała, kąt, o jaki ciało zostało przekręcone itd. Występujący w tym sformułowaniu współczynnik proporcjonalności nosi nazwę modułu naprężenia i jest stałą materiałową (czyli charakteryzuje materiał, a nie konkretne ciało). Współczynnik sprężystości, o którym mówiliśmy na tej lekcji, jest cechą konkretnego ciała. W przypadku sprężyny jego wartość zależy od użytego materiału (czyli modułu naprężenia), długości sprężyny, liczby zwojów, średnicy zwojów i średnicy drutu.

Praktyczne zastosowania sprężystości

Sprężystość jest zjawiskiem wszechobecnym. Niemal wszystkie zderzenia w mikroświecie (np. zderzenia cząsteczek powietrza) są sprężyste. Dzięki sprężystości działa wiele mechanizmów, a kule bilardowe odbijają się od siebie.

Człowiek zaczął wykorzystywać sprężystość już kilkanaście tysięcy lat temu, konstruując łuk, a później kuszę. W czasach rzymskich wykorzystywano sprężystość desek do konstrukcji machin miotających pociski na polu walki. W XVI wieku zaczęto używać sprężyn do napędzania zegarów, a w XVII wieku pojawiły się powozy z resorami piórowymi.

Obecnie używamy sprężyn w resorach, zderzakach (np. kolejowych) i meblach tapicerowanych. Sprężyste podkładki śrubowe służą eliminacji luzów i dociskania elementów. Prawo Hooke'a wykorzystujemy w różnego rodzaju siłomierzach. Nawet analogowe mierniki elektryczne mają w swojej konstrukcji sprężyny służące do równoważenia sił magnetycznych pojawiających się w ich uzwojeniach. Możliwość kumulowania energii potencjalnej sprężystości jest wykorzystywana w konstrukcji zabawek i innych nakręcanych mechanizmów.

zastosowanie
sprężystości



Rys. 7. Przykładowe praktyczne zastosowania zjawiska sprężystości: a) resor piórowy, b) zderzak kolejowy, c) katapulta.



ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Aby rozciągnąć pewną sprężynę o 6 cm, trzeba użyć siły 15 N. Oblicz, a) jakiej siły trzeba użyć, by rozciągnąć tę sprężynę o 10 cm, b) jakie będzie wydłużenie sprężyny pod działaniem siły 10 N.
2. Nieobciążona zwisająca sprężyna ma długość 18 cm. Po zawieszeniu na niej masy 50 g jej długość wzrosła do 22 cm. Wyznacz długość tej sprężyny po zawieszeniu na niej masy 200 g. Oblicz, ile wynosi współczynnik sprężystości tej sprężyny.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- s. 9 • Sprężystość to cecha ciał odkształczalnych polegająca na odzyskiwaniu przez nie swej pierwotnej postaci.
- s. 9 • Ciała stałe posiadają sprężystość kształtu i sprężystość objętości. Ciecze i gazy pod ustalonym ciśnieniem posiadają tylko sprężystość objętości.
- s. 11 • Sprężystością ciał rządzi prawo Hooke'a mówiące, że odkształcenie ciała jest wprost proporcjonalne do działającej siły.
- s. 11 • Współczynnik proporcjonalności w prawie Hooke'a nosi nazwę współczynnika sprężystości. Jego jednostką jest niuton na metr.
- s. 11 • Prawo Hooke'a spełnione jest tylko w pewnym zakresie sił. Po ich przekroczeniu ciało ulega trwałemu odkształceniu lub zniszczeniu.
- s. 13 • Sprężystość materii jest znana od tysiącleci i znalazła liczne zastosowania praktyczne.

1.2. Ruch drgający

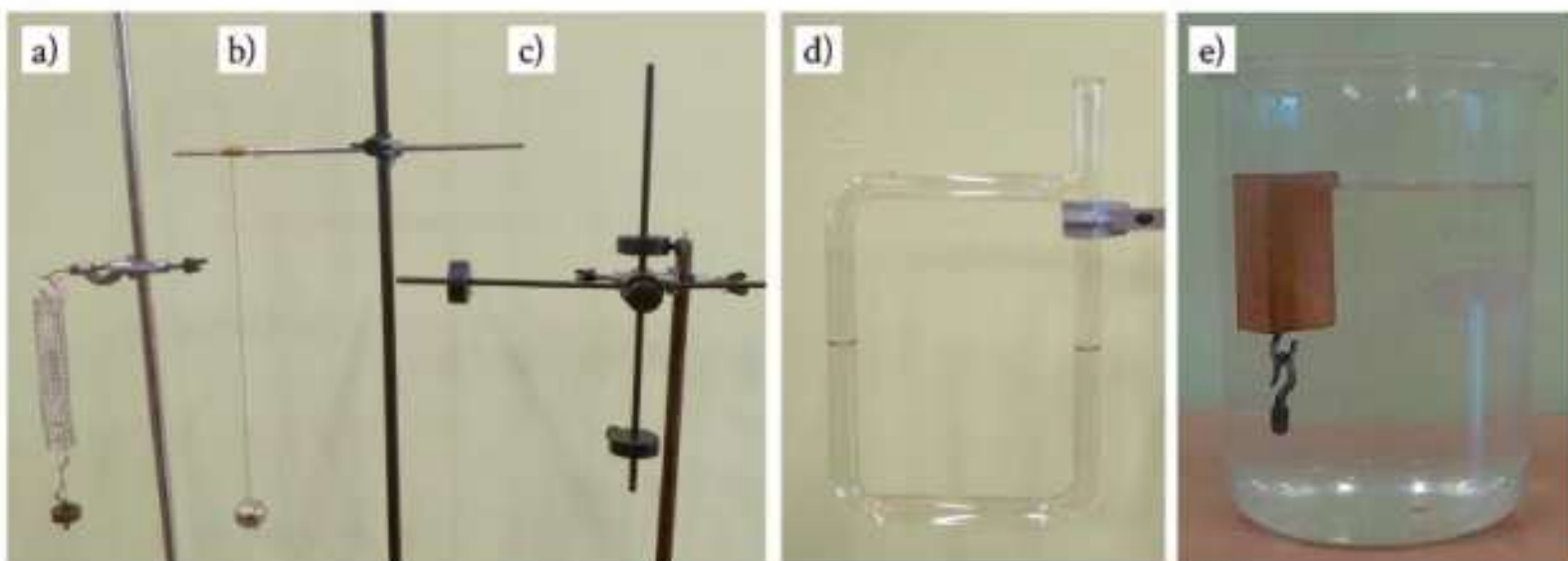
NA TEJ LEKCJI

- przypomnisz sobie wiadomości o ruchu drgającym i jego przykłady,
- poznasz dokładniej wielkości fizyczne opisujące ruch drgający.

Przykłady i analiza ruchów drgających

Doświadczenie

Pomoce: ciężarek na sprężynie zawieszony na statywie, mały i ciężki przedmiot, np. metalowy ciężarek, zawieszony na długiej, lekkiej i nierozciągliwej nici (czyli wahadło matematyczne) lub dowolny przedmiot zawieszony swobodnie powyżej swojego środka ciężkości (czyli wahadło fizyczne), U-rurka napełniona częściowo wodą, prostopadłościenny klocek drewniany pływający w zlewce z wodą, obciążony z jednej strony.



Rys. 8. Pomoce niezbędne do wykonania doświadczenia: a) ciężarek na sprężynie, b) wahadło matematyczne, c) wahadło fizyczne, d) U-rurka z wodą, e) pływający klocek drewniany obciążony u dołu.

Wytrąć każdy z tych przedmiotów z osobna ze stanu równowagi i obserwuj jego ruch. W przypadku U-rurki z wodą należy dmuchnąć w jedno z ramion, by wywołać różnicę poziomów.

W każdym z tych przypadków wybierz jedno charakterystyczne położenie ciała (np. skrajne) i odliczaj na głos momenty, w których ciało się w tym położeniu znajdzie. Przyjrzyj się kiedy prędkość tych obiektów jest największa, a w jakich położeniach jest zerowa i zmienia zwrot.

W którym momencie przyspieszenie jest największe, a w którym najmniejsze i jaki ma zwrot?

Zaobserwowaliśmy właśnie przykłady ruchów drgających. Stan, w którym ciała nie wykonują żadnego ruchu, nazywamy stanem równowagi. Odpowiadają one sytuacji, gdy ciężarek wisi nieruchomo na nienapiętej sprężynie, wahadła znajdują się nieruchomo w swoich najniższych położeniach, woda w U-rurce jest nieruchoma i jej poziom w obu ramionach naczynia jest jednakowy, a klocek pływa nieruchomo w wodzie i jego ciężar zrównoważony jest przez siłę wyporu.

Gdy wytrącimy taki obiekt z położenia równowagi, zaczyna się on poruszać. Stwierdzamy, że ruch takiego ciała jest okresowy – pomijając efekty związane z występowaniem sił oporu, położenie, prędkość i przyspieszenie takiego ciała się powtarzają. Taki ruch nazywamy ruchem drgającym.

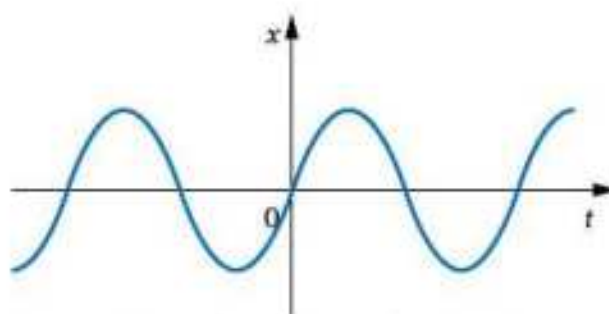
Ruchem drgającym nazywamy taki ruch, w którym położenie, prędkość i przyspieszenie powtarzają się cyklicznie.

ruch drgający

Położenie ciała drgającego mierzone względem punktu równowagi nazywamy wychyleniem. Gdybyśmy do ciężarka drgającego na sprężynie przymocowali pisak tak, by mógł zaznaczać położenie na przesuwającej się jednostajnie poziomo taśmie papierowej ustawionej pionowo, to narysowałby on krzywą zwaną sinusoidą. Podobnie, gdyby ciężarek w wahadle zastąpić dziurawym pojemnikiem z piaskiem i przesuwac taśmę pod drgającym wahadłem, wahadło usypałoby na niej ślad sinusoidy. Można więc powiedzieć, że w omawianych przypadkach wychylenie zmienia się w czasie sinusoidalnie.

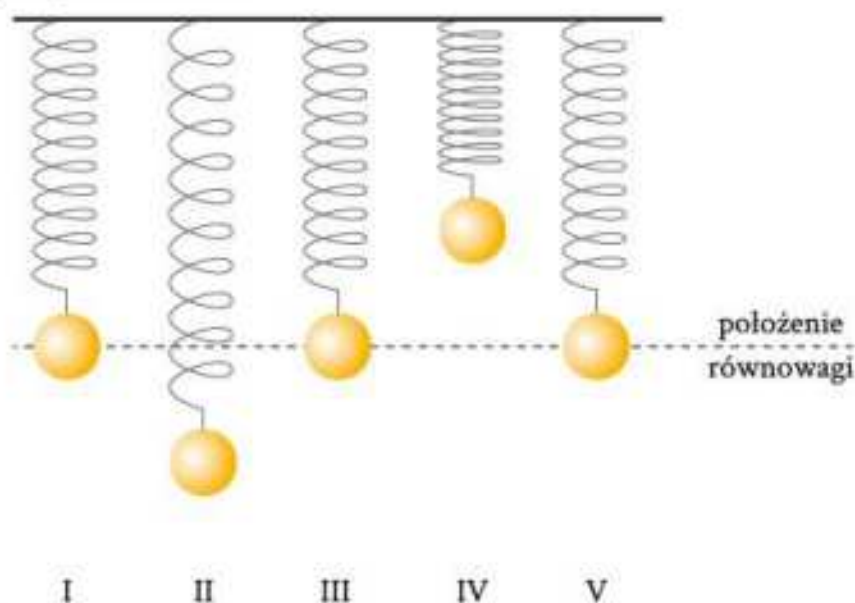


1. DRGANIA



Rys. 9. Wykres zależności wychylenia (położenia) ciała od czasu w ruchu drgającym.

Zastanówmy się nad wzajemną zależnością wychylenia, prędkości, przyspieszenia i siły w ruchu drgającym ciężarka na sprężynie. Na rysunku 10. zaznaczono ciężarek w kilku różnych położeniach.



Rys. 10. Analiza ruchu ciężarka na sprężynie.

Siła ciężkości działająca na ciężarek jest niezmienna i powoduje wydłużenie sprężyny o stałą wartość oraz ustalenie położenia równowagi na niższym poziomie. Ciężarek na sprężynie będzie się zachowywać tak, jakby nie było siły ciężkości, natomiast sprężyna była dłuższa.

Jak łatwo zauważyć, drgający ciężarek przechodzi przez położenie równowagi I z maksymalną prędkością. W położeniu równowagi siła sprężystości jest równa zero. W miarę rozciągania sprężyny (zbliżania się do punktu II) wzrasta wartość siły sprężystości i jest ona skierowana ku górze. W myśl drugiej zasady dynamiki, nadaje ona ciężarkowi przyspieszenie skierowane ku górze. Ponieważ prędkość skierowana jest w dół, ruch ciężarka będzie opóźniony i to niejednostajnie, gdyż siła wzrasta. Ostatecznie ciężarek w punkcie II się zatrzymuje. Siła sprężystości skierowana jest ku górze i ma maksymalną wartość. Ciężarek zacznie poruszać się w górę. Jego prędkość wzrasta, ale coraz wolniej, gdyż siła sprężystości (a więc i przyspieszenie) maleje. W położeniu III prędkość jest maksymalna, a siła sprężystości równa zero. Podczas dalszego ruchu w górę siła sprężystości zaczyna działać w dół, zmniejszając prędkość ciężarka do zera w punkcie IV. W tym momencie siła i przyspieszenie są maksymalne i skierowane w dół. Ciężarek porusza się w dół. Jego prędkość osiąga wartość maksymalną w kolejnym położeniu równowagi V i cały cykl się powtarza.

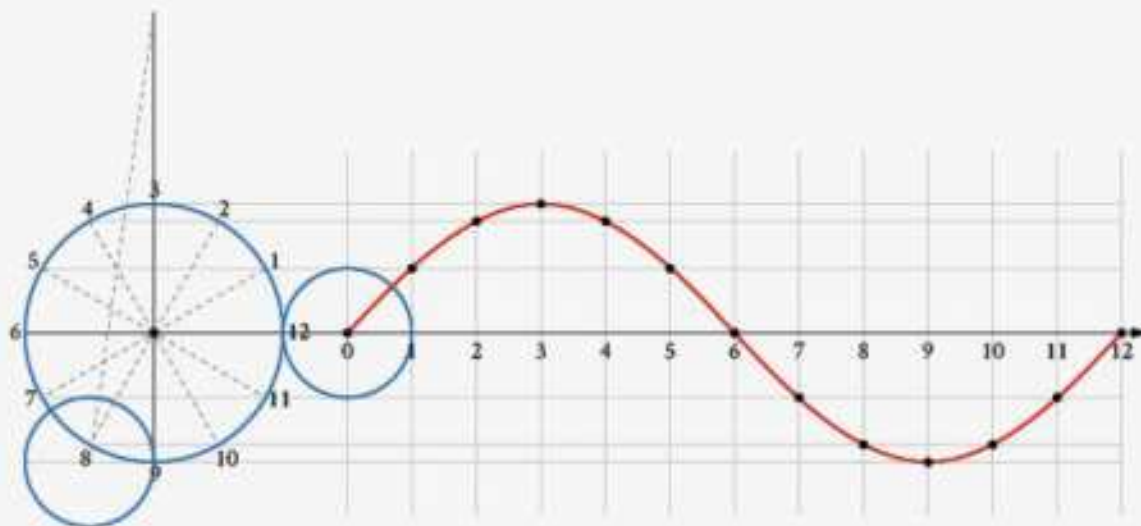


Proporcjonalność siły i wychylenia dla ciężarka na sprężynie wynika wprost z prawa Hooke'a. Można udowodnić, że jeśli wychylenia są niewielkie, to podobna zależność zachodzi dla wszystkich pozostałych układów drgających omawianych w doświadczeniu.

Chcesz wiedzieć więcej?

Znamy wiele przykładów ruchów drgających, w których siła powodująca ruch jest proporcjonalna do wychylenia i ma zwrot przeciwny niż wychylenie. Fizycy takie ruchy nazywają harmonicznymi. Dowolny układ fizyczny wykonujący ruch harmoniczny nazywamy oscylatorem harmonicznym.

Można udowodnić, że jeśli siła działająca na ciało jest proporcjonalna do wychylenia i przeciwnie skierowana, to wychylenie musi się zmieniać w czasie sinusoidalnie i na odwrót: jeśli wychylenie zmienia się sinusoidalnie, to znaczy, że siła powodująca ruch jest proporcjonalna do wychylenia i przeciwnie skierowana. Jeśli do brzegu obracającego się jednostajnie koła wbijemy prostopadle gwoździć, to cień tego gwoźdźdź na ekranie będzie wykonywać ruch harmoniczny – jego położenie będzie się zmieniać w czasie sinusoidalnie.



Rys. 11. Jeśli zaznaczymy punkt na obwodzie koła obracającego się ze stałą prędkością, to jego rzut na oś pionową będzie wykonywać ruch harmoniczny.

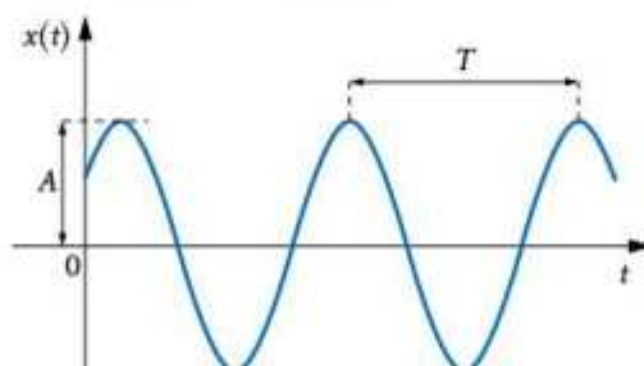
Wielkości fizyczne opisujące ruch drgający

Każdy ruch drgający, w którym nie występują siły tłumienia, można scharakteryzować za pomocą kilku wielkości fizycznych. W tym ruchu są one stałe. Pierwszą z nich jest maksymalna wielkość wychylenia, zwana amplitudą. Oznaczamy ją literą A .

Amplituda to największa wartość wychylenia z położenia równowagi.

amplituda

Amplituda mówi nam, jak wysoka jest sinusoida opisująca zależność wychylenia od czasu.



Rys. 12. Amplituda i okres w ruchu drgającym.



1. DRGANIA

Zdefiniowaliśmy ruch drgający jako taki, w którym położenie, prędkość i przyspieszenie powtarzają się w równych odstępach czasu. Ten czas, po którym wszystko się powtarza, to okres ruchu.

okres ruchu
drgającego

Okresem ruchu drgającego nazywamy czas potrzebny na wykonanie jednego pełnego drgania.

W ciągu jednego okresu wykonywany jest jeden pełny cykl drgania, np. do góry i na dół (dla ciężarka na sprężynie) lub w lewo i w prawo (dla wahadła). Okres drgań oznaczamy literą T , a jego jednostką jest sekunda. Okres łączy dwa najbliższe „takie same” punkty sinusoidy (nie tylko w sensie wartości, lecz także nachylenia). Jeśli zachowamy skalę wykresu, to im dłuższy okres, tym bardziej sinusoida jest rozciągnięta w poziomie.

Czasami, zamiast podawać wartość okresu, wygodniej jest powiedzieć, ile drgań zostało wykonanych w ciągu jednej sekundy. Ta wielkość fizyczna to częstotliwość. Jest ona odwrotnością okresu. Oznaczamy ją literą f .

częstotliwość

Częstotliwość to liczba drgań na sekundę.

$$f = \frac{1}{T}$$

Jednostką częstotliwości jest 1 herc (Hz), czyli jedno drganie na sekundę. Z częstotliwością spotkałeś/spotkałaś się już przy okazji ruchu jednostajnego po okręgu. Nie jest to przypadek. Ruch jednostajny po okręgu też jest przykładem ruchu okresowego – po wykonaniu pełnego okrążenia położenie, prędkość i przyspieszenie się powtarzają. Im większa częstotliwość, tym bardziej sinusoida (przy zachowaniu tej samej skali na osi) jest ściśnięta w poziomie.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Oblicz, jaką drogę przebywa ciało drgające z amplitudą A w czasie jednego okresu.
2. Częstotliwość w pewnym ruchu drgającym wynosi 12,5 Hz. Oblicz okres drgań w tym ruchu.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- s. 15 • Ruch drgający to ruch okresowy, czyli taki, w którym położenie, prędkość i przyspieszenie powtarzają się w równych odstępach czasu.
- s. 17 • Amplituda drgań to największe wychylenie z położenia równowagi.
- s. 18 • Czas potrzebny na wykonanie jednego pełnego drgania to okres ruchu. Jednostką okresu jest sekunda.
- s. 18 • Odwrotność okresu, czyli liczba drgań na sekundę, to częstotliwość. Jednostką częstotliwości jest 1 herc.



1.3. Przemiany energii w ruchu drgającym

NA TEJ LEKCJI

- będziesz analizować przemiany energii w ruchu drgającym,
- zastosujesz zasadę zachowania energii dla ruchu drgającego nietłumionego.

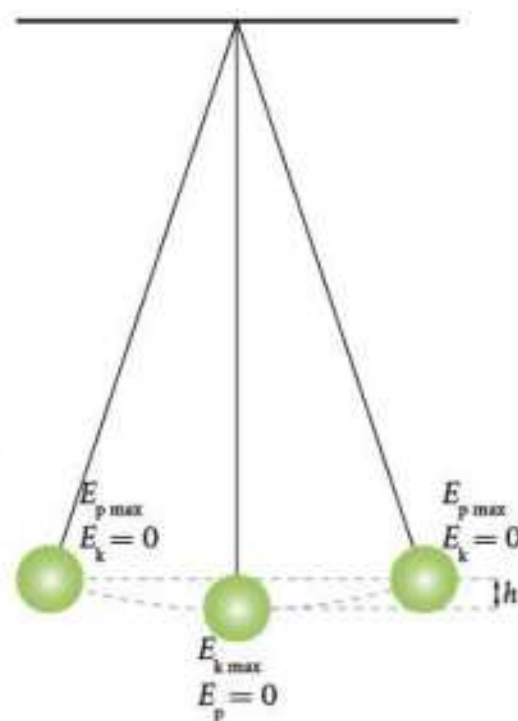
Przemiany energii w ruchu drgającego wahadła

Na całej dzisiejszej lekcji będziemy zakładać, że podczas ruchu układu drgającego nie występują żadne siły oporu. W rzeczywistości nie jest to prawdą. Na obiekt poruszający się w powietrzu działa siła oporu aerodynamicznego. Wyginająca się nieustannie sprężyna się rozgrzewa. Na łączeniach poszczególnych elementów występują siły tarcia itd. Uwzględnienie tych okoliczności będzie przedmiotem naszych rozważań w niedalekiej przyszłości. Obecnie zbadajmy przemiany energii w ruchu drgającym w przypadku idealnym.

Przyjrzyjmy się jeszcze raz ruchowi wahadła (rys. 13.). Jest to ruch niejednostajnie zmienny, ponieważ odbywa się pod działaniem zmiennej siły. W skrajnych położeniach wahadło się zatrzymuje, a w położeniu równowagi jego prędkość jest największa. W podobny sposób będzie się też zmieniać jego energia kinetyczna – będzie ona rosła w miarę zbliżania się do położenia równowagi i maleć w trakcie oddalania się od niego.

A co z energią potencjalną? Zauważmy, że w skrajnych położeniach kulka znajduje się wyżej niż w położeniu równowagi. Energia potencjalna będzie więc rosła w miarę oddalania się od położenia równowagi i maleć w trakcie zbliżania się do niego – odwrotnie niż energia kinetyczna. Przyrosty energii kinetycznej są równe ubytkom energii potencjalnej i na odwrót. Gdyby było inaczej, amplituda drgań zmieniałaby się w czasie. Ponieważ jest stała, to oznacza, że suma energii kinetycznej i potencjalnej jest w każdym momencie taka sama.

W ruchu drgającym następuje nieustanna zmiana energii kinetycznej na potencjalną i potencjalnej na kinetyczną. Jeśli nie występują siły oporu, to suma tych energii pozostaje niezmienna w czasie.



Rys. 13. Przemiany energii w drgającym wahadle.

przemiany energii
w ruchu drgającym



Przykład

Kulka w wahadle w skrajnych położeniach wznosi się na wysokość 2 cm ponad poziom równowagi. Oblicz maksymalną wartość prędkości kulki wahadła.

Rozwiązanie

Prędkość wahadła będzie maksymalna, jeśli energia potencjalna kulki mierzona względem poziomu równowagi zamieni się całkowicie w energię kinetyczną, co nastąpi w trakcie przechodzenia przez położenie równowagi. Możemy więc porównać te dwa rodzaje energii.

$$\frac{mv^2}{2} = mgh \Rightarrow v^2 = 2gh \Rightarrow v = \sqrt{2gh}$$

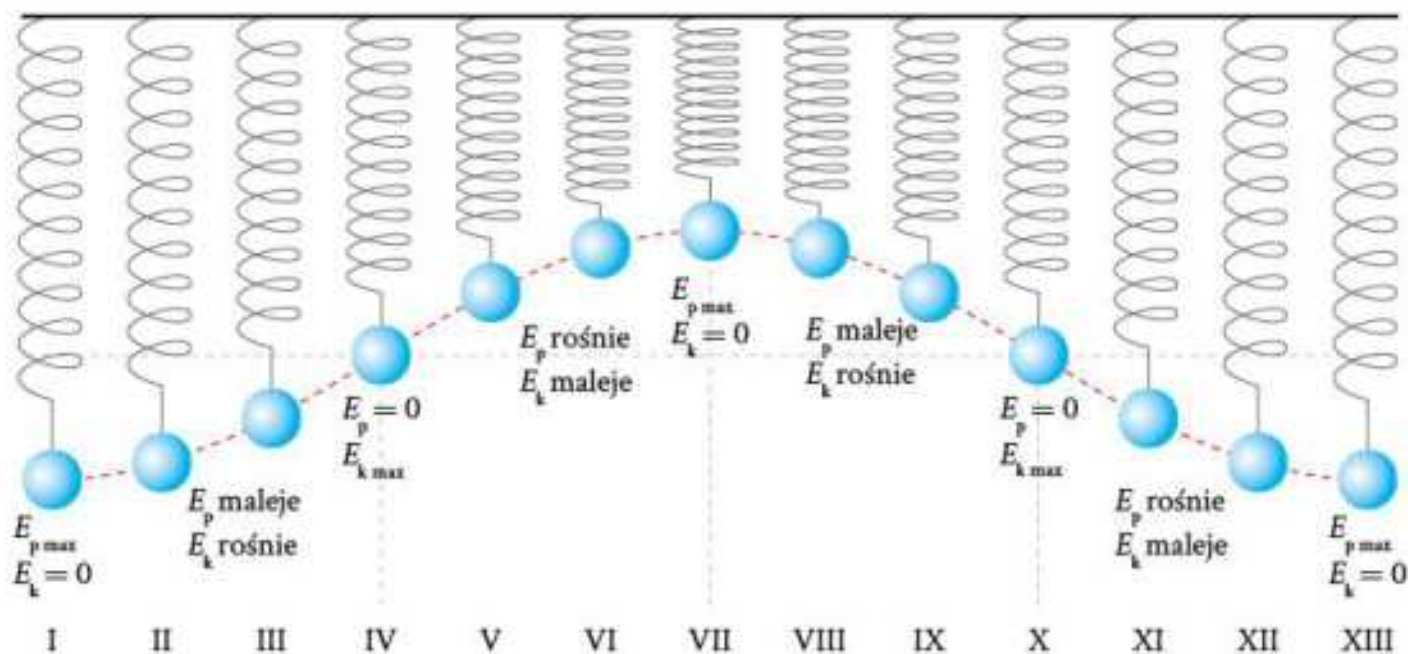
$$v = 0,63 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Zauważmy, że wynik w ogóle nie zależy od masy wahadła – ta we wzorze się skróciła. Jest to ogólna cecha ruchów odbywających się pod wpływem siły grawitacji. Ich przebieg nie zależy od masy poruszającego się ciała.

Przemiany energii w ruchu ciężarka na sprężynie

Mogłoby się wydawać, że ciężarek drgający na zawieszony pionowo sprężynie będzie zmieniać swoją energię potencjalną grawitacji i że ten rodzaj energii należy uwzględnić w ogólnym bilansie. Rzeczywistość jest jednak taka, że siła ciężkości ciężarka jest cały czas zrównoważona przez dodatkową siłę sprężystości sprężyny, która podczas całego ruchu jest przez to dodatkowo wydłużona. Ustala się więc nowy stan równowagi: układ drga tak, jakby znajdował się w stanie nieważkości, ale drgania odbywają się wokół obniżonego położenia równowagi. Siłę ciężkości (oraz energię potencjalną grawitacji) możemy więc pominąć, natomiast musimy przyjąć, że w stanie równowagi sprężyna jest nieco dłuższa.

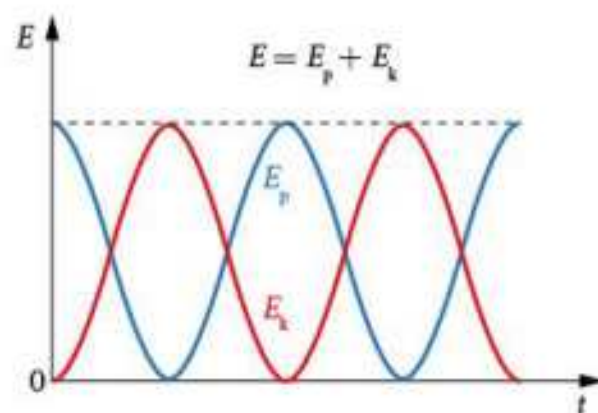
W ruchu ciężarka na sprężynie mamy do czynienia z nieustannymi przemianami energii kinetycznej w energię potencjalną sprężystości i energii potencjalnej sprężystości w energię kinetyczną. W położeniu równowagi energia potencjalna sprężystości jest równa zero (rys. 14., położenie IV oraz X). Gdy ciężarek znajduje się powyżej poziomu równowagi, sprężyna jest ściskana (rys. 14., położenia V – IX), a gdy poniżej – jest rozciągana (rys. 14., położenia I – III oraz XI – XIII). W obu tych przypadkach pojawia się energia potencjalna sprężystości – tym większa, im większe jest wychylenie z położenia równowagi. Z kolei energia kinetyczna przyjmuje wartość maksymalną w stanie równowagi, a równą zero w położeniach skrajnych. Wtedy wektor prędkości ciężarka zmienia zwrot.



Rys. 14. Przemiany energii w drgającym ciężarku na sprężynie.

Przemiany energii w obu omówionych przypadkach można przedstawić zbiorczo na wykresie (rys. 15.). W przypadku wahadła pod pojęciem energii potencjalnej należy rozumieć energię potencjalną grawitacji, a w przypadku ciężarka na sprężynie – energię potencjalną sprężystości. Wartości obu rodzajów energii oscylują – gdy jedna rośnie, druga maleje. Gdy nie ma sił oporu, ich suma pozostaje stała i jest reprezentowana przez linię poziomą na wykresie.

Rys. 15. Przemiany energii w ruchu drgającym. Każdy z rodzajów energii ulega zmianom w czasie, ale ich suma pozostaje stała.



ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Maksymalna prędkość poruszającego się wahadła wynosi $20 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$. Oblicz maksymalną wysokość, na jaką wznosi się to wahadło względem poziomu równowagi.
2. Prostopadłościenna belka pływająca po powierzchni jeziora została wciśnięta na większą głębokość i puszczona swobodnie. Wykonuje teraz ruch drgający. Opisz przemiany energii, jakie zachodzą podczas tego ruchu.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- W trakcie wykonywania ruchu drgającego następują nieustanne przemiany energii kinetycznej w potencjalną (grawitacji lub sprężystości) i potencjalnej w kinetyczną.
- Jeśli w drgającym układzie nie ma sił oporu, to suma tych energii pozostaje stała, a amplituda drgań nie ulega zmianom w czasie.

s. 19

s. 19



1.4. Badanie ruchu drgającego

NA TEJ LEKCJI

- zbadasz, czy okres drgań układu zależy od amplitudy tych drgań,
- zbadasz, w jaki sposób okres drgań ciężarka na sprężynie zależy od masy tego ciężarka.

Badanie zależności okresu drgań od ich amplitudy

Doświadczenie 1.

Pomoce naukowe: statyw, sprężyna, ciężarek na haczyku, stoper, długa linijka.

Jeden koniec sprężyny mocujemy na statywie, na drugim zawieszamy ciężarek. Masę ciężarka dobieramy w taki sposób, aby okres drgań nie był ani za krótki (wtedy trudno jest policzyć poszczególne drgania), ani za długi (wtedy doświadczenie trwa zbyt długo). Do statywu mocujemy też długą linijkę w bezpośredniej bliskości sprężyny tak, by móc na niej odczytywać położenie końca sprężyny. Dobrym pomysłem jest użycie sprężyny z zamocowaną na jej końcu poziomą wskazówką.

Odczytujemy na linijce położenie końca sprężyny (lub wskazówki, ewentualnie jakiegoś charakterystycznego punktu samego ciężarka). To będzie nasz poziom odniesienia. Następnie rozciągamy sprężynę na



Rys. 16. Układ pomiarowy do doświadczenia 1.

przykład o 1 cm i puuszczamy swobodnie. Ciężarek zaczyna drgać, a amplituda tych drgań jest równa długości, o jaką rozciągnęliśmy sprężynę. Wpatrujemy się w ciężarek, aby wczuć się w rytm jego drgań. Gdy będzie on w jakimś charakterystycznym punkcie (np. najniższym lub najwyższym), włączamy stoper i odliczamy 10 pełnych drgań, po czym stoper wyłączamy. Dzielimy odczytany czas przez 10 i otrzymujemy okres drgań. Robimy tak, by zminimalizować niepewności pomiarowe. Pojedyncze drganie trwa zbyt krótko, aby można było zmierzyć czas jego trwania z niewielkim błędem. Zarówno amplitudę drgań, jak i okres notujemy w tabelce.

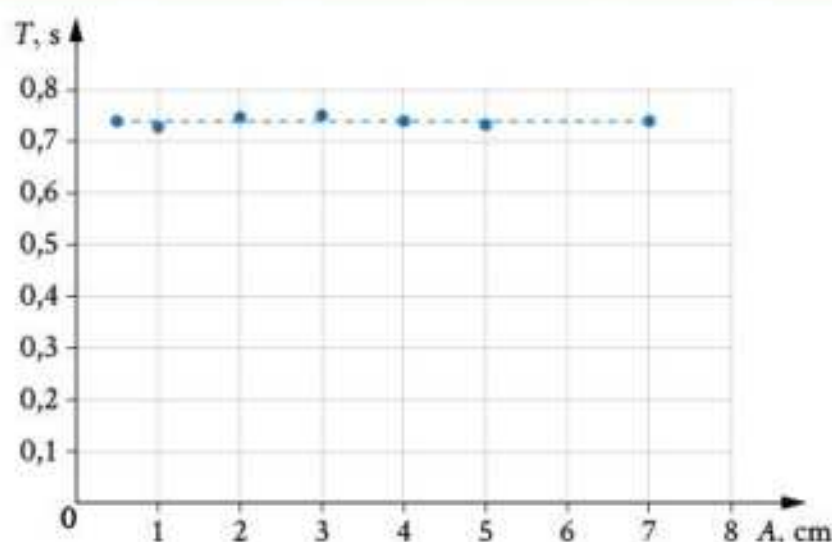
Pomiary powtarzamy dla kilku innych amplitud. Ich wartości dobieramy stosownie do właściwości sprężyny. Jeśli sprężyna jest długa i elastyczna, możemy zastosować większe amplitudy. Jeśli jest krótka i sztywna, wykonujemy pomiary dla amplitud niewielkich.

UWAGA: podczas tego doświadczenia musimy zachować umiar i rozsądek. Jeśli rozciągniemy sprężynę zbyt mocno, zachowa się ona jak proca, stwarzając zagrożenie wypadkiem. Ponadto istnieje ryzyko trwałego odkształcenia sprężyny, co uniemożliwi jej użycie do kolejnych doświadczeń.



Na podstawie wykonanych pomiarów sporządzamy wykres zależności okresu drgań ciężarka od amplitudy. Do punktów pomiarowych dopasowujemy prostą najlepiej do nich przylegającą. Możemy to zrobić ręcznie lub użyć arkusza kalkulacyjnego. Opcję dopasowywania prostej znajdziesz w menu arkusza (linia trendu). Poniższa tabelka zawiera przykładowe wyniki pomiarów. Wyniki te zostały zaznaczone na wykresie (rys. 17.).

A, cm	0,5	1	2	3	4	5	7
T, s	0,737	0,725	0,742	0,749	0,733	0,728	0,730



Rys. 17. Wykres przedstawiający przykładowe wyniki pomiarów w badaniu zależności okresu drgań ciężarka na sprężynie od amplitudy.

Wyniki przeprowadzonych pomiarów przekonują nas, że okres drgań układu nie zależy od amplitudy. Linia prosta dopasowana do punktów pomiarowych jest niemal idealnie pozioma. Gdy amplituda drgań jest większa, ciężarek ma wprawdzie do przebycia większą drogę, ale porusza się szybciej. Mocniej naciągnięta sprężyna działa na ciężarek większą siłą i nadaje mu większe przyspieszenie. Niezależność okresu drgań od ich amplitudy nazywamy **izochronizmem**. Izochronizm występuje, dopóki spełnione jest prawo Hooke'a, czyli dopóki siła wprawiająca w ruch ciężarek jest proporcjonalna do wychylenia. Zbyt mocne rozciągnięcie sprężyny (poza zakres stosowności prawa Hooke'a) spowoduje zmianę okresu drgań.

izochronizm

Chcesz wiedzieć więcej?

Izochronizm występuje we wszystkich układach drgających, w których siła sprawcza jest proporcjonalna do wychylenia. Dotyczy to również wahadeł drgających z niewielką amplitudą. Zjawisko to odkrył Galileusz na przełomie XVI i XVII wieku, obserwując ruch żyrandola zawieszonego na długiej linie w katedrze w Pizie. Okres drgań żyrandola mierzył, odliczając bicia swojego serca. Żyrandol poruszał się ze zmienną amplitudą pod wpływem podmuchów powietrza, ale okres jego drgań pozostawał niezmienny. W 1656 roku zjawisko izochronizmu wahadeł wykorzystał w praktyce holenderski uczony Christiaan Huygens (wym. kristian houhens, 1629–1695), konstruując zegar wahadłowy, w którym straty energii spowodowane siłami oporu były uzupełniane dzięki energii potencjalnej magazynowanej w ciężarkach. W urządzeniach przenośnych wahadła zostały zastąpione różnego typu oscylatorami sprężynowymi.





1. DRGANIA

Do czasu wynalezienia zegarów atomowych zegary wykorzystujące izochronizm były najdokładniejszymi urządzeniami odmierzającymi czas na świecie.



Rys. 18. Słynna lampa, która ponad 400 lat temu uświadomiła Galileuszowi istnienie izochronizmu. Obecnie jest wyeksponowana na dziedzińcu Camposanto Monumentale w Pizie.

Badanie zależności okresu drgań ciężarka na sprężynie od jego masy

Doświadczenie 2.

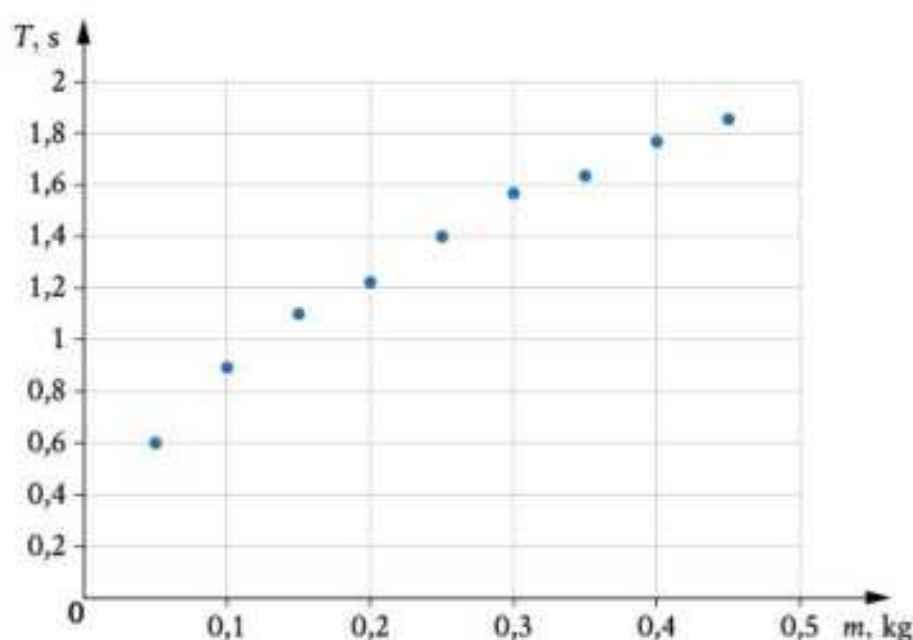
Pomoce naukowe: statyw, sprężyna, 9 jednakowych ciężarków na haczyku, stoper. Jeśli ciężarki nie są jednakowe, należy je indywidualnie zważyć.

Przygotowujemy tabelkę zawierającą w kolejnych wierszach liczbę ciężarków, ich łączną masę oraz okres drgań.

Na sprężynie zawieszamy jeden ciężarek, wpisujemy do tabelki jego masę i wprawiamy w drgania o niewielkiej amplitudzie. Mierzmy czas wykonania 10 pełnych drgań, wynik dzielimy przez 10 i wpisujemy do tabelki jako zmierzony okres. Następnie doczepiamy do sprężyny drugi ciężarek, w tabelce zapisujemy **sumę mas** ciężarków wiszących na sprężynie i ponownie mierzymy czas trwania 10 pełnych drgań. Podobnie postępujemy z trzema, czterema itd. ciężarkami, aż wykorzystamy wszystkie. Na podstawie zebranych danych sporządzamy wykres zależności okresu drgań od sumarycznej masy ciężarków.

Oto przykładowe wyniki pomiarów i odpowiadający im wykres.

liczba ciężarków	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$m, \text{ kg}$	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45
$T, \text{ s}$	0,62	0,88	1,08	1,25	1,41	1,52	1,65	1,78	1,88



Rys. 19. Wykres zależności okresu drgań ciężarka na sprężynie od jego masy.



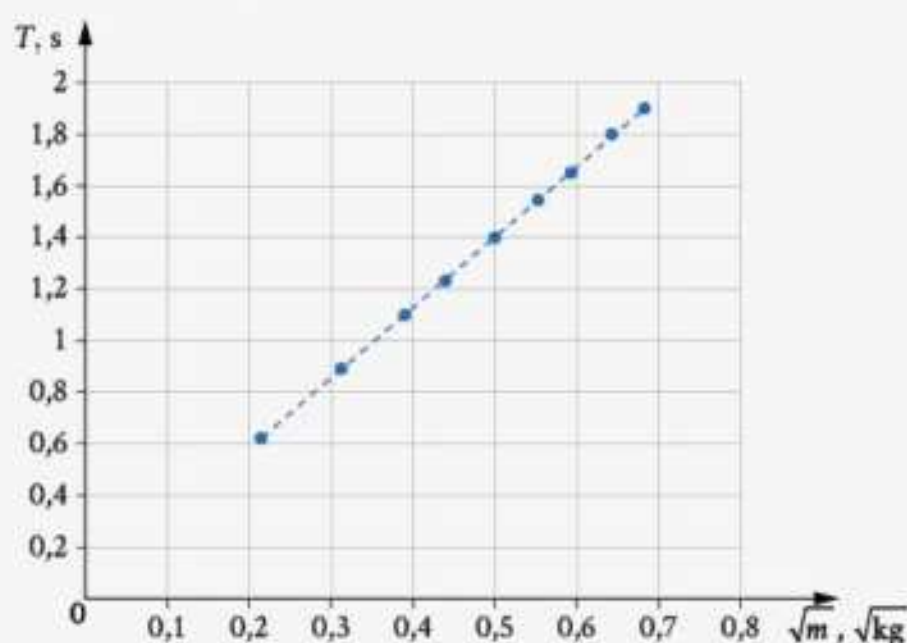
Na pierwszy rzut oka widać, że nie ma sensu dopasowywać prostej do tych punktów, ponieważ układają się one wzdłuż regularnej krzywej. Im większa masa, tym dłuższy okres, ale zależność okresu drgań ciężarka na sprężynie od jego masy nie jest liniowa.

zależności okresu
drgań ciężarka
na sprężynie

Chcesz wiedzieć więcej?

Z rozważań teoretycznych wynika, że okres drgań ciężarka na sprężynie wyraża się wzorem $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$, gdzie m jest masą ciężarka, a k współczynnikiem sprężystości sprężyny. Okres drgań powinien więc być proporcjonalny do pierwiastka z masy ciężarka i odwrotnie proporcjonalny do pierwiastka ze współczynnika sprężystości. Jak sprawdzić graficznie, czy wyniki pomiarów potwierdzają podany wzór, nie mając linijki w kształcie wykresu funkcji pierwiastkowej? Otóż najlepiej na osi odciętych odłożyć nie masy ciężarka, ale pierwiastki z mas. Wtedy na wykresie powinniśmy uzyskać linię prostą. Dodajmy więc do naszej tabeli jeden wiersz i sporządźmy nowy wykres.

liczba ciężarków	1	2	3	4	5	6	7	8	9
m, kg	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45
$\sqrt{m}, \sqrt{\text{kg}}$	0,2236	0,3162	0,3873	0,4472	0,5	0,5477	0,5916	0,6325	0,6708
T, s	0,62	0,88	1,08	1,25	1,41	1,52	1,65	1,78	1,88



Rys. 20. Wykres zależności okresu drgań ciężarka na sprężynie od pierwiastka z jego masy.

Jak widać, punkty na wykresie przylegają niemal dokładnie do linii prostej. Dowodzi to, że okres drgań ciężarka jest proporcjonalny do pierwiastka z jego masy. Podany wcześniej wzór znalazł swoje potwierdzenie w wynikach eksperymentu.





ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wyjaśnij pojęcie izochronizmu i omów warunki jego zachodzenia.
- 2*. Oblicz, jaki byłby okres drgań w doświadczeniu 2., gdyby na użytej w nim sprężynie zawiesić 16 ciężarków. Zakładamy, że nie przekroczyliśmy w ten sposób granic stosowalności prawa Hooke'a.
- 3*. Wzdłuż jakiej krzywej ułożyłyby się punkty pomiarowe, gdyby na osi odciętych odłożyć masę, a na osi rzędnych – kwadraty okresów?

PODSUMOWANIE LEKCJI

s. 23

- Okres drgań ciężarka na sprężynie nie zależy od amplitudy tych drgań, o ile nie przekracza ona granic stosowalności prawa Hooke'a. Zjawisko to nazywamy izochronizmem.

s. 25

- Okres drgań ciężarka na sprężynie zależy od masy tego ciężarka, lecz nie jest to zależność liniowa.

1.5. Drgania tłumione i wymuszone. Rezonans

NA TEJ LEKCJI

- dowiesz się, jak siła tłumienia wpływa na ruch układu drgającego,
- dowiesz się, co to są drganiami wymuszone,
- poznasz zjawisko rezonansu oraz przykłady jego skutków i zastosowań.

Drgania tłumione

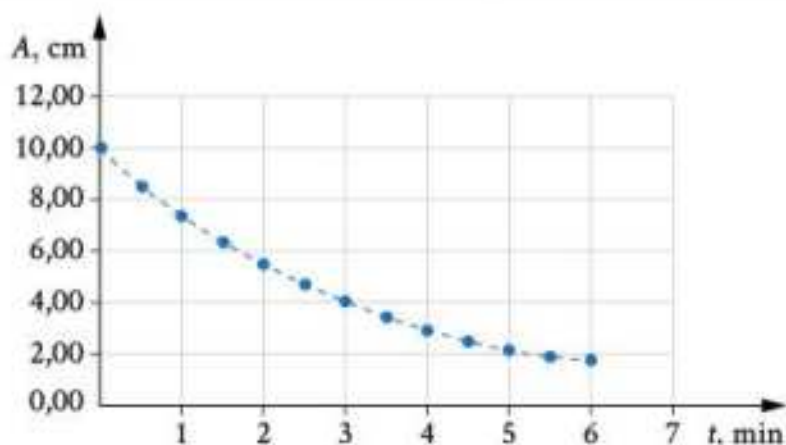
Doświadczenie 1.

Pomoce: ciężarek na sprężynie przymocowany do statywu z linijką, wahadło. Odczytaj na linijce przymocowanej do statywu położenie ciężarka zwisającego swobodnie na sprężynie. Rozciągnij sprężynę (zachowując umiar), odczytaj wartość początkowej amplitudy i pozwól ciężarkowi drgać. W równych odstępach czasu (np. co pół minuty) odczytuj i notuj wartość amplitudy drgań. Wahadło ustaw blisko ściany. Zmierz odległość pomiędzy ścianą a swobodnie zwisającym ciężarkiem. Następnie odchyl ciężarek tak, by dotknął ściany, i puść go, by mógł wykonywać ruch drgający. Początkowa amplituda tych drgań będzie równa zmierzonej odległości. Następnie w równych odstępach (np. co pół minuty) mierz odległość, na jaką ciężarek zbliża się do ściany i na tej podstawie oblicz amplitudę drgań. Wyniki pomiarów notuj w tabeli sporządzonej w zeszycie.



Przykładowe wyniki pomiarów przedstawia poniższa tabela oraz wykres.

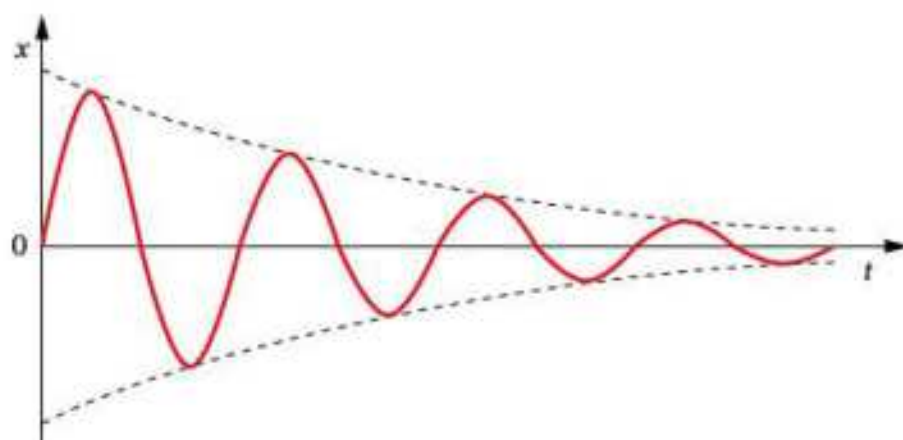
t, min	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
A, cm	10,00	8,61	7,41	6,38	5,49	4,72	4,07	3,50	3,01	2,59	2,23	1,92	1,65



Rys. 21. Zależność amplitudy drgań od czasu dla ruchu tłumionego.

Obserwując ruch układu drgającego w dłuższym czasie, zauważamy, że drgania zanikają. Ich amplituda maleje w czasie według krzywej, którą matematycy nazywają krzywą wykładniczą. Ma ona tę ciekawą właściwość, że w kolejnych równych odstępach czasu jej wartość maleje tyle samo razy. Oznacza to, że w miarę upływu czasu zbliża się ona do osi coraz wolniej. Jeśli uzbroimy się w cierpliwość, to doczekamy momentu, w którym drgania staną się niezauważalne. Taki rodzaj drgań nazywamy **drganiami gasnącymi** lub **tłumionymi**.

drgania gasnące
(tłumione)



Rys. 22. Zależność wychylenia od czasu w drganiach gasnących.

Przyczyną tłumienia drgań jest nieuwzględniany w dotychczasowych rozważaniach czynnik: występowanie sił oporu. Zarówno wahadło, jak i ciężarek na sprężynie poruszają się w powietrzu. Wprawiają więc w ruch cząsteczki powietrza, przekazując im część swej energii kinetycznej. W punkcie mocowania drgającego wahadła występuje tarcie. Drgająca sprężyna rozgrzewa się pod wpływem oddziaływań między atomami, zachodzi więc przemiana energii mechanicznej w energię wewnętrzną (efekt ten można łatwo zaobserwować, zginając wielokrotnie drut w palcach – jeśli będziemy to robić odpowiednio szybko, możemy się nawet poparzyć). Malejąca energia drgań przekłada się na ich malejącą amplitudę. Im wolniej układ drga, tym wolniej traci energię, dlatego właśnie zanik amplitudy nie jest liniowy, tylko wykładniczy.



Drgania wymuszone

Doświadczenie 2.

Pomoc naukowa: przyrząd do badania rezonansu mechanicznego zbudowany z ramy, na której rozciągnięty jest sznurek. Do sznurka należy przywiązać 6 waha-
dła: 2 długie (jednakowej długości), 2 średnie i 2 krótkie (też parami jednako-
we). Kolejność mocowania waha-
dła nie ma znaczenia.

Na początku wszystkie waha-
dła zwisają swobod-
nie w położeniu równowagi. Odchylamy o nie-
wielki kąt jedno z waha-
dła i puszczamy swobod-
nie. Cierpliwie obserwujemy, co się dzieje.

Obserwacja: po jakimś czasie energia drgają-
cego waha-
dła została przekazana do waha-
dła o tej samej długości. Po upływie dalszego cza-
su drugie waha-
dło przekazało energię z po-
wrotem pierwszemu. Pozostałe waha-
dła po-
zostają niemal nieruchome.

Zatrzymujemy ruch waha-
dła i wprawiamy
w drgania waha-
dło o innej długości. Znowu za-
obserwujemy, że po jakimś czasie przeka-
że on energię bliźniaczemu waha-
dłu, a pozostałe będą
wykonywać drgania o znikomej amplitudzie.

Podobny efekt zaobserwujemy, gdy wprawi-
my w ruch waha-
dło o trzeciej długości.

Jak wyjaśnić zaobserwowane zjawisko?



Rys. 23. Układ do badania rezo-
nansu mechanicznego.

dr-
gania
wymuszone

Aby wytłumaczyć, co się dzieje, musimy wprowadzić nowe pojęcie: **dr-
gania wymuszo-
ne**. Są to takie drgania, w których oprócz wewnętrznej siły sprężystości, która wprawia
w ruch cały układ (oraz ewentualnie siły tłumienia), występuje jeszcze inna, zewnętrzna
siła, zwana **siłą wymuszającą**. Ale nie każda postać siły zewnętrznej jest znacząca.

Doświadczenie 3.

Pomoc naukowa: waha-
dło.

Zadziałaj na waha-
dło jakąś stałą siłą, np. wychyl je w lewo.

Obserwacja: waha-
dło jest wychylone w lewo i się nie porusza.

Potrząśnij waha-
dło z przypadkową częstotliwością (za dużą lub za małą) albo ude-
rzaj je lekko z przypadkową częstotliwością.

Obserwacja: ruch waha-
dła jest chaotyczny, a amplituda drgań niewielka.

Zatrzymaj waha-
dło i postaraj się je teraz rozkołysać, dmuchając na nie. Wymaga
to dmuchnięć dawkowanych z odpowiednią częstotliwością. Z pewnością uda
ci się to zrobić w sposób intuicyjny – na pewno nieraz kołysałaś/kołysałeś na
huśtawce koleżankę lub kolegę.

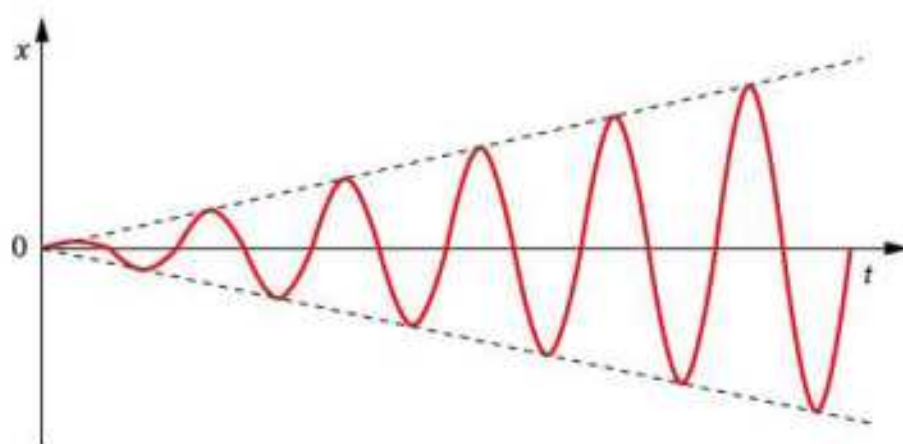
Obserwacja: w miarę przekazywania kolejnych impulsów amplituda drgań ro-
śnie, osiągając duże wartości.



Jak widać, najciekawsze efekty wywołują siły zewnętrzne działające w sposób okresowy. Skuteczność takiej siły zależy nie tylko od jej wartości, ale przede wszystkim od częstotliwości jej działania. Gdy częstotliwość jest źle dobrana, amplituda drgań układu jest niewielka. Jeśli „wczujemy się” z częstotliwością siły wymuszającej, możemy sprawić, że w przypadku braku tłumienia amplituda drgań będzie rosnąć w sposób nieograniczony. Zjawisko to nazywamy **rezonansem**. Częstotliwość siły wymuszającej, która powoduje rezonans, to tzw. **częstotliwość rezonansowa**, równa częstotliwości drgań własnych (lub inaczej swobodnych) – takich, z jaką drga układ, gdy pozostawimy go samemu sobie. Aby rozkołysać układ z częstotliwością rezonansową, wystarczą niewielkie impulsy siły, takie jak dmuchnięcia w doświadczeniu 3. lub delikatne ruchy nitki w doświadczeniu 2.

Rezonans jest to zjawisko przekazywania energii drgań pomiędzy układami, jeśli częstotliwość działania siły wymuszającej jest równa częstotliwości drgań własnych układu. W przypadku braku tłumienia amplituda takich drgań może rosnąć w sposób nieograniczony.

rezonans



Rys. 24. Zależność wychylenia od czasu układu drgającego nietłumionego, pobudzanego w sposób rezonansowy.

Możliwość wzbudzenia drgań o dużej amplitudzie za pomocą niewielkich impulsów o odpowiedniej częstotliwości może być groźna w skutkach. Historia zna kilka spektakularnych katastrof wywołanych zjawiskiem rezonansu. W roku 1850 w Angers we Francji na skutek rezonansu zawalił się most, po którym maszerował batalion żołnierzy. Zginęło 226 osób. Obecnie podczas przemarszu wojsk przez mosty dowódcy mają obowiązek wydawać komendę „swobodny krok”, aby miarowy tupot nóg nie wprowadził konstrukcji w drgania. 7 listopada 1940 roku zawalił się most wiszący Tacoma Narrows w USA. Mierzące 840 metrów główne przęsło mostu zaczęło się wyginać pod wpływem podmuchów wiatru wiejącego z częstotliwością rezonansową. Amplituda drgań osiągnęła takie wartości, że konstrukcja mostu, obliczona na wielkie obciążenia, się rozsypała.

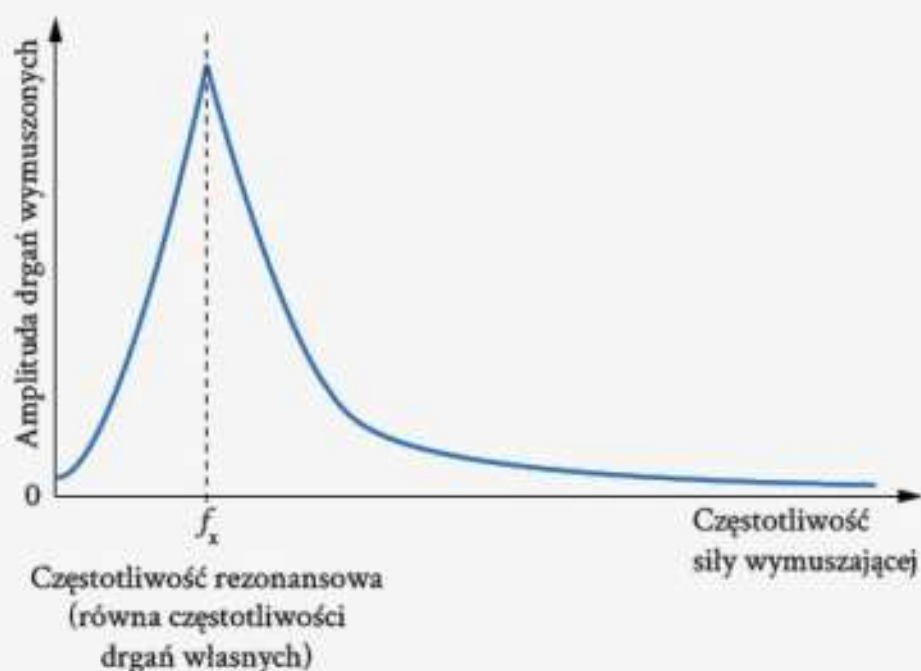


Rys. 25. Katastrofa mostu Tacoma Narrows.



Chcesz wiedzieć więcej?

W praktyce w każdym układzie drgającym występują siły tłumiące. Dlatego też amplituda drgań wymuszonych nie rośnie nieograniczenie, tylko osiąga pewne konkretne wartości opisane tzw. krzywą rezonansową. Pokazuje ona, jak wielką wartość może przyjąć amplituda drgań wymuszonych o określonej częstotliwości.



Rys. 26. Krzywa rezonansowa.

Jak widać, krzywa rezonansowa ma maksimum w częstotliwości rezonansowej. Im dalej od tej częstotliwości, tym amplituda jest mniejsza, co oznacza, że układ słabiej reaguje na impulsy siły o częstotliwości znacznie różniącej się od częstotliwości drgań własnych.

Przypomnijmy sobie wyniki doświadczenia 2. Gdy wprowadziliśmy w ruch wahadło o średniej długości, po jakimś czasie drgania udzieliły się wahadłu o tej samej długości. Miało ono bowiem tę samą częstotliwość drgań własnych. Pozostałe wahadła miały inną długość i inną częstotliwość drgań własnych, w związku z czym częstotliwość siły wymuszającej była dla nich nieodpowiednia.

Spójrzmy teraz na kształt krzywej rezonansowej. Dla bliźniaczego wahadła o średniej długości częstotliwość siły wymuszającej była „w sam raz” – trafiła w maksimum krzywej. Bliźniacze wahadło drgało z dużą amplitudą. Dla wahadła dłuższego częstotliwość siły wymuszającej była zbyt wielka – na prawo od maksimum. Dla krótszego wahadła częstotliwość była zbyt mała – na lewo od maksimum. Oba te wahadła drgały, ale z małą amplitudą – tym mniejszą, im bardziej ich długości różniły się od długości wahadła średniego.

Zastosowania rezonansu

Zjawisko rezonansu znalazło liczne zastosowania praktyczne. Dotyczy ono nie tylko drgań mechanicznych, lecz także elektrycznych (w elektrycznych obwodach drgających) i jądrowych.



Drgania struny mogą się udzielać otoczeniu za pośrednictwem fal dźwiękowych. Dlatego wiele instrumentów muzycznych jest wyposażonych w tzw. pudła rezonansowe, których zadaniem jest wzmacniać i utrzymywać wibracje generowane przez strunę.

Rezonans elektryczny wykorzystuje się we wszelkiego rodzaju odbiornikach fal elektromagnetycznych – radiach, telewizorach, telefonach komórkowych. Przestrzeń jest wypełniona falami radiowymi o różnej długości i częstotliwości, pochodzącymi ze wszelkich możliwych źródeł. Docierają one do anteny odbiornika radiowego. Gdy wybieramy określoną stację radiową, dostrajamy częstotliwość rezonansową układu elektrycznego radia. Będzie ono reagowało tylko na fale o interesującej nas częstotliwości. Pozostałe fale będą przez układ ignorowane.

W medycynie szerokie zastosowanie znalazł magnetyczny rezonans jądrowy, wykorzystujący absorpcję fal elektromagnetycznych o określonej częstotliwości przez atomy niektórych pierwiastków.

Zjawisko rezonansu uwzględniamy też w procesie projektowania mostów, aby uniknąć w przyszłości katastrof budowlanych wywołanych drganiami.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Amplituda drgań tłumionych zmalała o połowę w ciągu 40 sekund. Oblicz, po jakim czasie zmalałaby do jednej czwartej.
2. Znajdź w internecie i obejrzyj film przedstawiający katastrofę mostu Tacoma Narrows.
3. Poszukaj w internecie lub literaturze i zreferuj inne zastosowania rezonansu, niewymienione w tym podręczniku.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Jeśli w układzie drgającym występują siły rozpraszające energię (siły tłumienia), to układ będzie wykonywać drgania gasnące. Ich amplituda maleje w czasie wykładniczo, czyli w jednakowych odstępach czasu o taki sam czynnik (tyle samo razy). s. 27
- Jeśli na układ drgający działa dodatkowa siła zewnętrzna (tzw. siła wymuszająca), to oprócz drgań własnych układ będzie też wykonywać ruchy wynikające z działającej siły. s. 28
- Jeśli siła wymuszająca ma charakter okresowy i jej częstotliwość jest równa częstotliwości drgań własnych układu, to dochodzi do rezonansu – absorpcji energii przez układ drgający i wzrostu amplitudy drgań. s. 29
- Rezonans bywa szkodliwy (może prowadzić do katastrof), lecz ma również liczne zastosowania praktyczne. s. 30



Analiza tekstu: Rezonans akustyczny

Wszyscy doskonale wiemy, że aby pociągnąć kogoś na huśtawce, nie możemy jej popychać zbyt często, ani zbyt rzadko, gdyż efekt naszych wysiłków będzie mizerny. Częstotliwość impulsów siły musi być „w sam raz”, zgodna z częstotliwością drgań własnych huśtawki. Wtedy nasza energia będzie maksymalnie absorbowana, co przełoży się na wzrost (teoretycznie nieograniczony) amplitudy drgań. Zjawisko to nazywamy rezonansem [...].

Rezonans jest zjawiskiem powszechnym i dotyczy drgań o dowolnym charakterze. Wykorzystujemy go np. w odbiorniku radiowym. Aby nastawić odbiór na pożądaną stację, używamy pokręteł lub przycisków, które w istocie zmieniają pojemność i indukcyjność obwodu elektrycznego, a co za tym idzie – częstotliwość elektrycznych drgań własnych tego obwodu. Do anteny docierają fale elektromagnetyczne o zupełnie dowolnych długościach i częstotliwościach, próbując wprowadzić w drgania znajdujące się w przewodach swobodne elektrony. Ale tylko fale o częstotliwości rezonansowej, na którą jest aktualnie nastrojony odbiornik, odniosą skutek – pozostałych stacji w ogóle nie usłyszymy.

Rezonans może być też groźny w skutkach. Powoduje pękanie szyb i ścian pod wpływem drgań pobliskiej drogi wywołanych przejazdem ciężarówek. Wstrząs tektoniczny o określonej częstotliwości może spowodować (z dala od epicentrum) wybiórcze zawalenie się domów – o tej samej częstotliwości drgań własnych, związanej z ich wysokością. Historia odnotowała też serię spektakularnych katastrof mostów, związanych z przemarszem wojska (żołnierze [...] przypadkiem tupali z częstotliwością rezonansową) lub z podmuchami wiatru.

Nie zdziwi zatem, że rezonans pełni też doniosłą funkcję w akustyce. Aby się przekonać o jego istnieniu, wystarczy wykonać proste doświadczenie z dwoma identycznymi kamertonami, rys. 27.



Rys. 27. Rezonans akustyczny zachodzący pomiędzy dwoma identycznymi kamertonami.



Gdy uderzymy młoteczkiem widelki jednego z nich, a następnie przytrzymamy ręką, by stłumić jego drgania, usłyszymy wyraźny dźwięk wydobywający się z drugiego kamertonu. Siła sprzęgająca obydwa kamertony jest niezwykle słaba. Zauważmy, że kamertony przytwierdzone są do drewnianych, pustych w środku prostopadłościanów pozbawionych jednej ściany – pudła rezonansowych. Ich długość została tak wyliczona, by akurat pomieścić ćwiartkę fali biegnącej (czyli odległość między węzłem i strzałką) odpowiadającej częstotliwości drgań własnych widełek (435 Hz). Drgania widełek udzielają się na zasadzie rezonansu cząsteczkom powietrza w pudle rezonansowym, następnie docierają do drugiego pudła i poprzez śrubę mocującą pobudzają do drgań widelki drugiego kamertonu. Proszę sobie wyobrazić, jak słabe musi być oddziaływanie cząsteczek powietrza na ciężką mosiężną śrubę wewnątrz pudła. A jednak efekt jest wyraźnie słyszalny!

Wiele instrumentów muzycznych oprócz zasadniczego elementu drgającego (wibratora) posiada również rezonator – układ wspomagający drgania na zasadzie rezonansu akustycznego. Na przykład w instrumentach smyczkowych, gitarze i mandolinie wibratorem są struny, a rezonatorem – pudła rezonansowe. Funkcję rezonatora w fortepianie pełni płyta rezonansowa w odpowiednio ukształtowanej obudowie itp.

Jaki sens ma pudło rezonansowe? Otóż jego zadaniem jest podtrzymywanie drgań wibratora. Rezonator magazynuje energię tych drgań i uczestniczy w wysyłaniu dźwięku w przestrzeń. Dzięki rezonatorowi dźwięk instrumentu jest głośniejszy, głębszy, pełniejszy i dłużej wybrzmiewa.

Pudło rezonansowe może też posłużyć do wyselekcjonowania dźwięków z otoczenia. Jeśli w pomieszczeniu wypełnionym białym szumem umieścimy kawałek rury, będzie ona wzmacniać fale o odpowiedniej długości i po pewnym (dość krótkim) czasie spostrzeżemy, że z rury wydobywa się dźwięk o konkretnej wysokości.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

Odpowiedz na poniższe pytania.

1. Na czym polega rezonans akustyczny i jak można się przekonać o jego istnieniu?
2. Na jakiej zasadzie działa większość tradycyjnych instrumentów muzycznych?
3. W jaki sposób możemy wzmacniać dźwięki o określonej częstotliwości?

**PODSUMOWANIE PRZED SPRAWDZIANEM**

- s. 9 1. Sprężystość to cecha ciał odkształcanych, polegająca na zdolności do odzyskiwania przez nie pierwotnej postaci. Siła sprężystości ma taki zwrot, że przeciwstawia się odkształceniu. Wyróżniamy sprężystość kształtu i sprężystość objętości.
- s. 11 2. Sprężystością ciał rządzi prawo Hooke'a mówiące, że odkształcenie ciała jest wprost proporcjonalne do działającej siły. Jest ono spełnione tylko w pewnym zakresie sił. Po ich przekroczeniu ciało ulega trwałemu odkształceniu lub zniszczeniu.
- s. 11 3. Współczynnik proporcjonalności w prawie Hooke'a nosi nazwę współczynnika sprężystości. Jego jednostką jest niuton na metr.
- s. 15 4. Ruchem drgającym nazywamy ruch okresowy, czyli taki, w którym położenie, prędkość i przyspieszenie powtarzają się w równych odstępach czasu.
- s. 17 5. Parametrami charakteryzującymi ruch drgający są:
a) amplituda, czyli maksymalne wychylenie z położenia równowagi,
b) okres, czyli czas potrzebny na wykonanie jednego pełnego drgania,
c) częstotliwość, czyli liczba drgań na sekundę.
- s. 19 6. Podczas ruchu drgającego następują nieustanne przemiany energii kinetycznej w potencjalną (grawitacji lub sprężystości) i potencjalnej w kinetyczną. Jeśli w drgającym układzie nie ma sił oporu, to suma tych energii pozostaje stała, a amplituda drgań nie ulega zmianom w czasie.
- s. 23 7. W granicach stosowalności prawa Hooke'a okres drgań ciężarka na sprężynie nie zależy od amplitudy tych drgań. Zjawisko to nazywamy izochronizmem. Izochronizm dotyczy też innych układów drgających, w których siła jest proporcjonalna do wychylenia i przeciwnie skierowana.
- s. 27 8. Drgania, w których nie występują siły oporu ani dodatkowe siły zewnętrzne, to drgania swobodne, albo drgania własne. Odbywają się one z charakterystyczną dla danego układu częstotliwością drgań własnych.
- s. 28 9. Drgania, w których występują siły oporu, to drgania tłumione. Ich amplituda maleje w czasie wykładniczo.
- s. 28 10. Drgania, w których występuje dodatkowa okresowa siła zewnętrzna (siła wymuszająca), to drgania wymuszone.
- s. 29 11. Jeśli częstotliwość siły wymuszającej jest równa częstotliwości drgań własnych układu, to dochodzi do rezonansu – absorpcji energii przez układ drgający i wzrostu amplitudy drgań.
- s. 30 12. Rezonans może być przyczyną katastrof, lecz ma również liczne zastosowania praktyczne.



W tym dziale zagłębimy się w zjawiska towarzyszące zmianom energii wewnętrznej ciał. Pojęcie to, podobnie jak pojęcie temperatury, poznałeś/ poznałaś już w szkole podstawowej. Dostarczając ciału energii, możemy zmienić jego stan skupienia, zmienić jego objętość, spowodować, że wykona ono pracę itd. Próby zaprzęgnięcia sił przyrody do wykonywania pracy użytecznej dla człowieka legły u podstaw dziedziny nauki, jaką jest termodynamika. Zajmuje się ona szeroko rozumianymi zjawiskami cieplnymi. Formułując zasady termodynamiki, uświadomiono sobie, że energia nie może zostać stworzona z niczego, ani zniszczona, że aby dowolne urządzenie działało, musi być zasilane itd. Dotyczy to nie tylko przyrody nieożywionej. Twoje ciało też jest takim urządzeniem. Możesz chodzić i wykonywać różne czynności dzięki temu, że dostarczasz mu energii wewnętrznej za pośrednictwem pożywienia.

Termodynamika jest nierozłącznie związana z budową wewnętrzną materii. Wiesz już, że temperatura jest miarą średniej energii kinetycznej ruchu drgającego cząsteczek ciała. Poznasz teraz inne aspekty tego ruchu, a także właściwości substancji, bez której nie byłoby możliwe życie na Ziemi – wody.

2. Termodynamika



- ▶ Rozszerzalność cieplna ciał stałych
- ▶ Rozszerzalność cieplna cieczy i gazów
- ▶ Energia wewnętrzna i ciepło
- ▶ Metody przekazywania energii
- ▶ Pierwsza zasada termodynamiki
- ▶ Ciepło właściwe
- ▶ Przemiany fazowe
- ▶ Bilans cieplny
- ▶ Wyznaczanie ciepła właściwego metalu
- ▶ Wartość energetyczna paliw i żywności
- ▶ Woda i jej właściwości
- ▶ Zjawisko dyfuzji
- ▶ Analiza tekstu: Historia *perpetuum mobile*. W poszukiwaniu wiecznego ruchu



2.1. Rozszerzalność cieplna ciał stałych

NA TEJ LEKCJI

- poznasz prawo liniowej rozszerzalności cieplnej ciał stałych,
- dowiesz się, dlaczego pod wpływem wzrostu temperatury ciała na ogół się rozszerzają,
- poznasz niektóre zastosowania praktyczne i negatywne skutki zjawiska liniowej rozszerzalności cieplnej.

Pojęcie rozszerzalności cieplnej

Doświadczenie 1.

Pomoce: dylatoskop, zapalniczka, świeczki podgrzewacze, ewentualnie denaturat.

Dylatoskop to urządzenie służące do obserwacji zjawiska rozszerzalności termicznej ciał stałych. Jego zasadniczym elementem jest pręt metalowy, przymocowany sztywno jednym końcem do podstawy. Drugi koniec przechodzi swobodnie przez otwór wspornika i dotyka dźwigni poruszającej wskazówkę na tle skali. Pręt może być podgrzewany za pomocą świeczek lub rynienki z denaturatem. Istnieją też rozbudowane wersje dylatoskopów, wyposażone w kilka prętów wykonanych z różnych materiałów.

Wyreguluj dylatoskop tak, by w temperaturze pokojowej wskazówka wskazywała zero i nie było luzu pomiędzy końcem pręta a dźwignią wskazówki. Zapal ogień pod prętem i w ciągu kolejnych minut obserwuj zachowanie wskazówki.

UWAGA: podczas wykonywania doświadczenia należy zachować szczególną ostrożność. Nigdy nie należy dolewać denaturatu do płonącej rynienki, gdyż spowoduje to wybuch i pożar! Pręt rozgrzewa się do temperatury kilkuset stopni Celsjusza. Jego dotknięcie spowoduje oparzenie!



Rys. 1. Dylatoskop.



Doświadczenie 2.

Pomoce: pierścień Gravesanda, palnik, zapalniczka.

Pierścień Gravesanda składa się z dwóch elementów: zasadniczego pierścienia metalowego na uchwycie oraz kuli metalowej na łańcuszku przymocowanym do drugiego uchwytu. W temperaturze pokojowej średnica kuli jest niemal identyczna jak średnica wewnętrzna pierścienia, dzięki czemu kula swobodnie przechodzi przez pierścień.

Za pomocą palnika podgrzej teraz kulę do wysokiej temperatury i spróbuj ją przelożyć przez pierścień. Co zauważyłeś/zauważyłaś?



Rys. 2. Pierścień Gravesanda.

W trakcie podgrzewania pręta wskazówka dylatoskopu się podniosła. Wskazania przyrządu były tym większe, im dłużej był podgrzewany, a zatem im wyższa była jego temperatura. Gdy temperatura osiągnęła maksymalną wartość jaką można uzyskać za pomocą danego palnika, dalsze ogrzewanie nie przynosiło już żadnego efektu. W miarę ochładzania się pręta wskazówka opadała. Po całkowitym ostygnięciu przyrząd znowu pokazywał zero.

Zimna kulka z łatwością przechodzi przez pierścień Gravesanda. Podgrzanie jej do wysokiej temperatury powoduje, że kulka przestaje się mieścić w otworze. Po ostygnięciu sytuacja wraca do stanu początkowego.

Powyższe doświadczenia ilustrują powszechne zjawisko, zwane **rozszerzalnością cieplną (termiczną) ciał**. Dotyczy ono wszystkich rodzajów substancji, przy czym zakres temperatur jest różny i niektóre wykazują zachowanie anomalne, np. stosowane w elektronice tworzywa termokurczliwe, a w pewnym zakresie temperatur również woda, co będzie przedmiotem naszych rozważań w niedalekiej przyszłości.

rozszerzalność
cieplna (termiczna)
ciał

Ciała stałe mają określony kształt, w związku z czym rozszerzalność cieplną można odnieść do ich rozmiarów wyrażonych w metrach. Taką rozszerzalność nazywamy **rozszerzalnością liniową**. Ciecze i gazy nie mają określonego kształtu, więc nie możemy mówić o ich rozmiarach liniowych. Mają natomiast ustaloną objętość (w przypadku gazów – w warunkach stałego ciśnienia). Objętość ta zmienia się wraz z temperaturą. Mówimy wtedy o **rozszerzalności objętościowej** tych substancji.

Zastanówmy się, od czego zależy przyrost długości pręta. Widzieliśmy w doświadczeniu, że im wyższa była temperatura, tym wyżej wznosiła się wskazówka. Dokładne pomiary wykazują, że w pewnym zakresie temperatur pręt wydłuża się proporcjonalnie do przyrostu temperatury.

Przyrost długości pręta jest proporcjonalny do przyrostu temperatury.

$$\Delta l \sim \Delta T$$

Przyjmijmy, że w naszym doświadczeniu pręt o długości początkowej $l_0 = 10 \text{ cm}$ wydłużył się o 1 mm. O ile wydłużyłby się pręt o długości początkowej $l_0 = 20 \text{ cm}$,



podgrzany do tej samej temperatury? Możemy sobie wyobrazić, że powstał on ze złączenia dwóch prętów o długości 10 cm i każdy z nich wydłużył się o 1 mm. Tak więc pręt dwa razy dłuższy zwiększył swój rozmiar o 2 mm. Podobnie pręt o długości początkowej 5 cm wydłużył się o 0,5 mm.

Przyrost długości pręta jest proporcjonalny do jego długości początkowej.

$$\Delta l \sim l_0$$

Jeśli wykonałeś/wykonałaś doświadczenie z użyciem dylatoskopu zawierającego pręty wykonane z różnych metali, to zapewne zauważyłeś/zauważyłaś, że pomimo jednakowych długości początkowych i jednakowych przyrostów temperatury wydłużyły się one w różnym stopniu. Wynika z tego, że wielkość przyrostu długości ciała zależy od substancji, z której wykonano to ciało.

Przyrost długości pręta zależy od rodzaju substancji, z której go wykonano.

Jeśli zbierzemy wyniki wszystkich poczynionych tu obserwacji, to możemy sformułować prawo rozszerzalności liniowej ciał stałych:

cieplny (termiczny)
przyrost długości
ciała

Cieplny (termiczny) przyrost długości ciała jest wprost proporcjonalny do długości początkowej tego ciała i do przyrostu temperatury oraz zależy od rodzaju substancji, z której zbudowane jest ciało.

$$\Delta l = l_0 \lambda \Delta T,$$

gdzie: Δl – przyrost długości ciała, l_0 – długość początkowa ciała, λ – współczynnik proporcjonalności, a ΔT – przyrost temperatury.

Współczynnik λ to **współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej**. Charakteryzuje on rodzaj substancji. Pełni więc funkcję stałej materiałowej. Można go wyliczyć, przekształcając powyższy wzór:

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta T}$$

Ponieważ zarówno przyrost długości ciała, jak i długość początkową mierzymy w metrach, które się skracają, jednostką współczynnika λ jest $\frac{1}{K}$.

Jeśli przyjmiemy $l_0 = 1$ m oraz $\Delta T = 1$ K, wtedy liczbowo $\lambda = \Delta l$. To spostrzeżenie prowadzi do następującej interpretacji współczynnika λ :

współczynnik
liniowej
rozszerzalności
cieplnej

Współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej mówi nam, o ile wydłuży się ciało wykonane z danej substancji o długości początkowej 1 metra, jeśli podgrzejemy je o 1 kelwin.

W doświadczeniu z dylatoskopem podgrzaliśmy pręt o kilkaset kelwinów, a mimo to przyrost jego długości był bardzo niewielki. Można go było dostrzec dzięki zastosowaniu specjalnej dźwigni przy wskazówce. Oznacza to, że termiczny współczynnik rozszerzalności liniowej przyjmuje bardzo niewielkie wartości. Typowy pręt o długości 1 metra, podgrzany o 1 stopień, wydłuża się mniej więcej o 0,01 mm. Wartości współczynnika λ dla kilku przykładowych substancji przedstawiono w tabeli. Proszę zwrócić uwagę, że wartości współczynnika λ wyrażone są w milionowych częściach $\frac{1}{K}$.



Tabela 1. Współczynniki liniowej rozszerzalności cieplnej dla wybranych substancji.

Nazwa substancji	$\lambda, 10^{-6} \frac{1}{K}$
aluminium	23
beton	12
inwar	0,44
miedź	16
olów	29
stal	12
szkło	8
szkło kwarcowe	0,4

Wyjaśniliśmy, jak ciała rozszerzają się pod wpływem wzrostu temperatury, a teraz odpowiemy na pytanie, dlaczego tak się dzieje. Będzie to możliwe dzięki znajomości cząsteczkowej teorii budowy materii. Wiemy, że temperatura jest miarą średniej energii kinetycznej ruchu drgającego cząsteczek. Im wyższa temperatura, tym większa amplituda tych drgań, a co za tym idzie – większa odległość między atomami. To zaś powoduje makroskopowy wzrost rozmiarów ciała. W zakresie temperatur, w którym nie zmienia się stan skupienia badanego ciała, proces jest w pełni odwracalny. Gdy temperatura obniża się, maleje amplituda drgań, cząsteczki zbliżają się do siebie i ciało się kurczy.

Przykład 1.

Oblicz, o ile wydłuży się szyna kolejowa o długości początkowej 30 metrów, jeśli podgrzejemy ją o 25 stopni.

Rozwiązanie

Szyna kolejowa jest wykonana ze stali. W tabeli 1. odnajdujemy wartość

$\lambda = 12 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$. W takim razie:

$$\Delta l = l_0 \lambda \Delta T$$

$$\Delta l = 30 \text{ m} \cdot 12 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K} \cdot 25 \text{ K} = 9000 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 0,009 \text{ m} = 9 \text{ mm}$$

Odpowiedź: Szyna wydłuży się o 9 milimetrów.

Przykład 2.

O ile stopni należy podgrzać drut aluminiowy o długości 50 metrów, by jego długość wzrosła o 2 cm?

Rozwiązanie

Dla aluminium $\lambda = 23 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$. Przekształcamy wzór do postaci $\Delta T = \frac{\Delta l}{l_0 \lambda}$.

$$\Delta T = \frac{0,02 \text{ m}}{50 \text{ m} \cdot 23 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}} = 17,4 \text{ K}$$

Odpowiedź: Drut należy ogrzać o 17,4 stopnia.

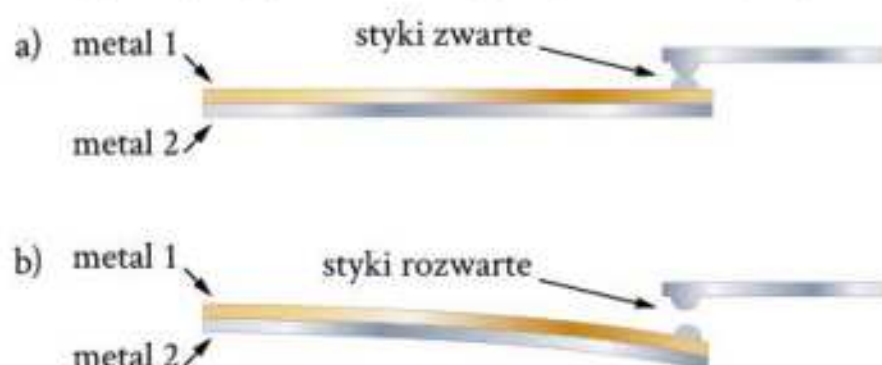


Praktyczne zastosowania liniowej rozszerzalności cieplnej

Rozszerzalność cieplna ciał ma liczne zastosowania w technice i życiu codziennym. Poniżej omówimy kilka z nich.

Zwróćmy uwagę, że liniowe współczynniki rozszerzalności cieplnej stali i betonu są jednakowe. Pod wpływem zmian temperatury beton i stal jednakowo się kurczą i rozszerzają. Stwarza to doskonałą możliwość łączenia tych materiałów w budownictwie. Stalowe pręty zbrojeniowe wzmacniają konstrukcję, a beton odgrywa rolę wypełniacza. Zmienne warunki pogodowe nie będą wpływać negatywnie na stan budowli, gdyż oba te materiały doskonale współpracują. Gdybyśmy zamiast stali użyli do zbrojenia betonu innego metalu, zmiany temperatury mogłyby powodować kruszenie ścian.

Jeśli połączymy ze sobą dwa paski metali o różnych współczynnikach liniowej rozszerzalności cieplnej, np. żelazo i miedź, to pod wpływem zmian temperatury przyrost długości każdego z nich będzie inny. Wtedy taki układ będzie się wyginał w jedną lub drugą stronę. Układ taki nazywamy **bimetalem**. Bimetalem znalazły powszechne zastosowanie w termostatach – elementach zapewniających stałość temperatury w takich urządzeniach, jak żelazko lub lodówka. Wraz ze wzrostem temperatury bimetal się wygina, rozwiera styk elektryczny i wyłącza urządzenie. Gdy temperatura zmaleje, bimetal prostuje się i układ elektryczny znów zaczyna przewodzić prąd.



Rys. 3. Zastosowanie bimetalu w termostacie. Wzrost temperatury powoduje odgięcie bimetalu i rozłączenie obwodu elektrycznego.

Kolejnym zastosowaniem rozszerzalności cieplnej jest stosowane dawniej **nitowanie na gorąco**. Nit jest elementem trwale łączącym elementy konstrukcji. Ma postać trzpienia z główką. Przekłada się go przez otwór przewiercony przez elementy, które chcemy połączyć, a następnie rozklepuje końcówkę trzpienia z drugiej strony. Jeśli



zakładany nit zostanie wcześniej rozgrzany, to stygnąc, skurczy się i dodatkowo docisnie łączone detale. W ten sposób buduje się wielkie stalowe mosty, łączy ze sobą arkusze blachy w kadłubach statków itd. Tworzone w ten sposób konstrukcje są szczelne i równie wytrzymałe, jak uzyskane metodą spawania lub zgrzewania.

Rys. 4. Nitowanie na gorąco.



Podobną technologię stosuje się w produkcji kół w pociągach. Koło w kontakcie z szyną ulega szybkiemu zużyciu, dlatego powinno być wykonane z materiałów o jak największej wytrzymałości, a więc drogich. Odlewanie z najlepszej stali całych kół wraz z osiami byłoby nieekonomiczne, a ponadto, w razie zużycia, wymagałoby wymiany całej osi. Dlatego większą część koła wraz z osią wykonuje się ze zwykłej stali, a na to nakłada się obręcz ze stali o podwyższonej jakości. Obręcz przed założeniem podgrzewa się do około 250°C i wciska na zewnętrzną część koła (tzw. koło bosc). Po ostygnięciu obręcz tak mocno dociska się do reszty koła, że jej zdjęcie jest niemożliwe – operacja ta wymaga przecięcia obręczy palnikiem.

W dawnych czasach kowale w podobny sposób zakładali stalowe obręcze na drewniane koła wozów konnych. Obecnie produkuje się tak łożyska kulkowe, wykorzystywane np. w rowerach. Element dociskający kulki w łożysku nakładany jest na gorąco. Po ostygnięciu łożysko jest trwale i się nie rozsypuje.

Negatywne skutki liniowej rozszerzalności cieplnej

Rozszerzalność cieplna pociąga też za sobą negatywne skutki lub zmusza do stosowania dodatkowych zabezpieczeń na etapie projektowania różnych budowli i urządzeń.

negatywne skutki
liniowej
rozszerzalności
cieplnej

Wlewanie gorącej wody do naczyń kamiennych lub z grubego szkła może spowodować ich pęknięcie. Nierównomierne nagrzewanie substancji powoduje nierównomierne rozszerzanie i powstawanie naprężeń wewnętrznych. Wady tej nie mają np. szklanki z cienkiego szkła. Cienka ścianka po wlewniu wrzątku nagrzewa się natychmiast w całej objętości i wewnętrzne naprężenia nie występują.

Projektując urządzenia, w których będzie panowała wysoka temperatura, np. kotły, musimy z góry przewidzieć, że się rozszerzą podczas pracy. Z kolei formy odlewnicze projektujemy z zapasem wielkości, mając świadomość, że wlany do nich metal po skrzepnięciu i wystygnięciu się skurczy.

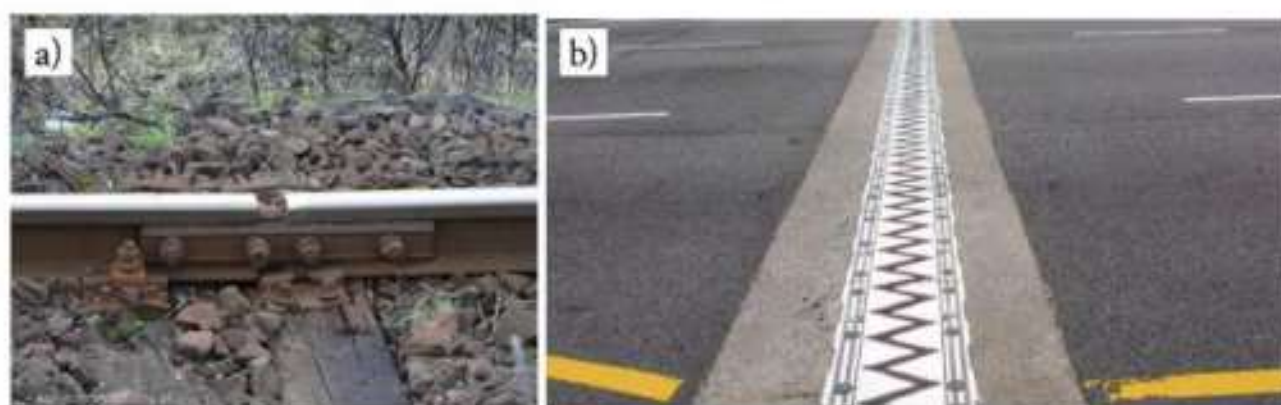
Jeśli chcemy, by taśmy miernicze i inne urządzenia pomiarowe były niewrażliwe na zmiany temperatury, musimy je wykonać z materiałów o znikomym współczynniku rozszerzalności cieplnej, np. ze specjalnego stopu zwanego inwarem. W przeciwnym razie wyniki pomiarów w nieodpowiedniej temperaturze będą zawyżone lub zaniżone.

Beton jest uważany za materiał trwalszy do budowy dróg niż asfalt. Zarówno beton, jak i asfalt rozszerzają się pod wpływem wzrostu temperatury. Asfalt jest plastyczny i dostosowuje się do panujących warunków. Beton jest sztywny i pod wpływem naprężeń uległby pokruszeniu. Dlatego jeśli chcemy, by betonowa droga nie wymagała remontu przez dziesięciolecia, jej powierzchnię nacina się w regularnych odstępach. Nacięcia niwelują naprężenia i dają pewien margines przestrzeni, w której beton może się rozszerzać i kurczyć.



Aby szyny kolejowe nie uległy odkształceniu podczas upałów, można zastosować specjalne przerwy, tzw. **szczeliny dylatacyjne** i łączyć szyny za pomocą śrub dających swobodę rozszerzania się i kurczenia. To właśnie szczeliny dylatacyjne są odpowiedzialne za charakterystyczne stukanie kół pociągu o tory. Współcześnie, zwłaszcza na liniach kolejowych dużych prędkości, stosuje się udoskonaloną technologię budowy torów, pozwalającą na sztywne łączenie szyn w większe odcinki i eliminację szczelin dylatacyjnych.

Dłuższe mosty i wiadukty nie są przymocowywane do przyczółków na stałe, bo uległyby pokruszeniu. Przęsła oparte są na walcach, na których mogą się toczyć, a na powierzchni jezdni stosuje się szczeliny dylatacyjne w kształcie grzebienia, aby nie tworzyć bruzdy, w którą może wpaść koło lub noga człowieka.



Rys. 5. Szczeliny dylatacyjne: a) w szynie kolejowej, b) na moście.

Napowietrzne przewody elektryczne wydłużają się i skracają zależnie od temperatury. W przypadku linii wysokiego napięcia stosuje się odpowiedni zapas długości przewodów. W lecie zwisają one niżej. Podczas mrozów skracają się, ale bez groźby ich zerwania.

W kolejowej lub tramwajowej sieci trakcyjnej wysokość zawieszenia przewodów ma kluczowe znaczenie, dlatego stosuje się specjalne napinacze. Gdy długość przewodu wzrasta, ciężar zastosowany w napinaczu się obniża, ale wysokość przewodu jezdniowego pozostaje stała.



Rys. 6. a) W linii wysokiego napięcia w lecie przewody zwisają luźno, dzięki czemu podczas mrozów się nie zrywają. b) Urządzenie do napinania przewodów w sieci trakcyjnej gwarantuje, że przewód jezdny znajduje się na właściwej wysokości niezależnie od temperatury otoczenia.



Rurociągi prowadzone nad powierzchnią ziemi nie biegają prosto, tylko co pewną odległość są wygięte w kształcie litery U. Dzięki temu mogą elastycznie dopasowywać się do zmian temperatury i nie pękają podczas mrozów.

Rozszerzalność cieplna jest zjawiskiem powszechnym i musimy być cały czas świadomi jej istnienia, aby nie tworzyć rzeczy, które pod wpływem zmiany temperatury ulegną uszkodzeniu.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Taśma miernicza o zakresie 5 m, wykonana z inwaru, wskazuje prawidłowe wyniki w temperaturze $+15^{\circ}\text{C}$. Oblicz, z jakim błędem zostanie tą taśmą zmierzona długość 5 m, jeśli temperatura otoczenia będzie wynosić -5°C .
2. Oblicz, o ile procent wydłuży się pręt miedziany, jeśli podgrzejemy go o 100°C .
3. Szyna stalowa w temperaturze 20°C ma długość 30 m. Oblicz, w jakiej temperaturze jej długość będzie wynosić 29,99 m.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Większość substancji nieorganicznych wykazuje zjawisko rozszerzalności cieplnej (termicznej). W przypadku ciał stałych mówimy o rozszerzalności liniowej, a w przypadku cieczy i gazów – o rozszerzalności objętościowej. s. 37
- Ciepły (termiczny) przyrost długości ciała jest wprost proporcjonalny do długości początkowej tego ciała i do przyrostu temperatury oraz zależy od rodzaju substancji. s. 38
- Czynnikiem charakteryzującym daną substancję jest współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej. Jest on liczbowo równy przyrostowi długości ciała o długości początkowej 1 metra, gdy podgrzejemy to ciało o 1 kelwin. s. 38
- Rozszerzalność cieplna znalazła zastosowania w termostatach, nitowaniu na gorąco, nakładaniu stalowych obręczy na koła, produkcji łożysk i w wielu innych urządzeniach i procesach. s. 40
- Brak świadomości istnienia rozszerzalności cieplnej bywa szkodliwy. Aby wyeliminować niekorzystne skutki tego zjawiska, musimy je uwzględnić podczas projektowania oraz budowy urządzeń, a także m.in. torów kolejowych, sieci trakcyjnych, linii wysokiego napięcia czy mostów drogowych. s. 41



2.2. Rozszerzalność cieplna cieczy i gazów

NA TEJ LEKCJI

- poznasz podstawowe prawo rządzące zjawiskiem objętościowej rozszerzalności cieplnej,
- poznasz praktyczne zastosowania objętościowej rozszerzalności cieplnej.

rozszerzalność
objętościowa ciał

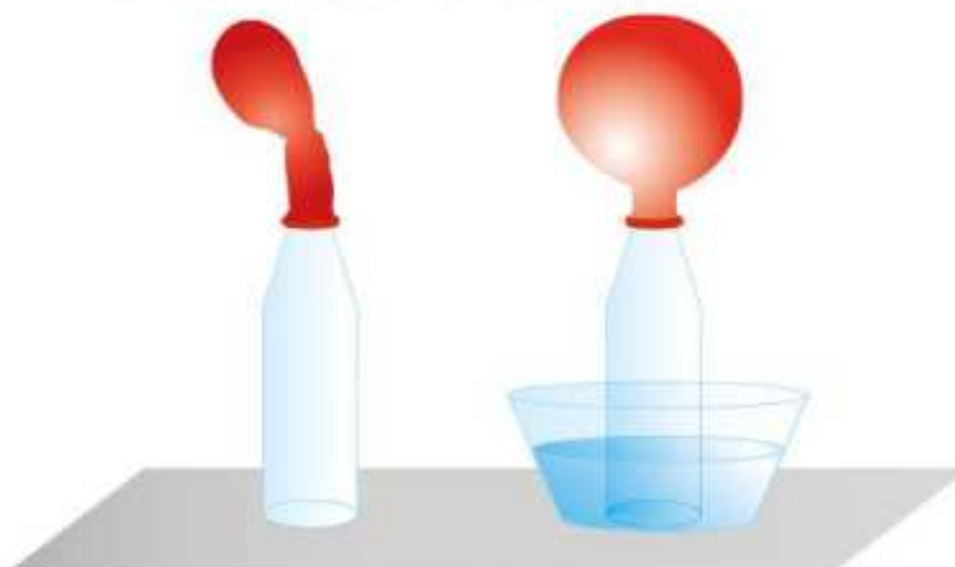
Pojęcie objętościowej rozszerzalności cieplnej

Gdy ciało stałe pod wpływem wzrostu temperatury zwiększa swoje wymiary liniowe, zwiększa również swoją objętość. W odniesieniu do ciał stałych posługujemy się raczej pojęciem rozszerzalności liniowej. W przypadku płynów (cieczy i gazów) nie możemy już mówić o rozmiarach liniowych, więc badamy zmiany ich objętości.

Doświadczenie

Pomoce: butelka, balonik, miska z ciepłą wodą.

Na szyjkę otwartej, pustej butelki naciągnij pusty balonik. Następnie włóż butelkę do miski z gorącą wodą i przytrzymaj ją tam przez jakiś czas. Co stwierdzasz?



Rys. 7. Badanie rozszerzalności objętościowej powietrza.

Doświadczenie wykazało, że w miarę wzrostu temperatury powietrza zamkniętego w butelce jego objętość rosła. Obniżanie się temperatury powodowało zmniejszanie się objętości powietrza. Dokładne pomiary wykazują, że zmiany objętości powietrza (i większości innych płynów) są wprost proporcjonalne do zmian temperatur.

Aby ustalić, od jakich innych czynników zależy przyrost objętości, przeprowadźmy rozumowanie podobne do tego, jakie przeprowadziliśmy dla ciał stałych. Podzielmy objętość płynu w myślach na kilka części. Objętość każdej z tych części wzrośnie o pewną wartość. Przyrost objętości całości płynu będzie sumą przyrostów objętości jego części składowych. Zatem możemy stwierdzić, że cieplny (termiczny) przyrost objętości ciała jest wprost proporcjonalny do jego objętości początkowej.



Przeprowadzając dokładne pomiary, ustalono, że różne substancje o tej samej objętości początkowej, podgrzane o tyle samo stopni osiągają różne objętości końcowe. Stąd wniosek, że współczynnik proporcjonalności jest inny dla każdej substancji. Prawo rozszerzalności objętościowej ciał formułujemy więc następująco:

Ciepły (termiczny) przyrost objętości ciała jest wprost proporcjonalny do objętości początkowej tego ciała i do przyrostu temperatury oraz zależy od rodzaju substancji, z której zbudowane jest ciało.

$$\Delta V = V_0 \alpha \Delta T,$$

gdzie: ΔV – przyrost objętości ciała, V_0 – objętość początkowa ciała, α – współczynnik proporcjonalności, a ΔT – przyrost temperatury.

Współczynnik α to **współczynnik objętościowej rozszerzalności cieplnej**. Wyraża go wzór:

$$\alpha = \frac{\Delta V}{V_0 \Delta T}$$

Jego jednostką jest $\frac{1}{K}$. Jest on liczbowo równy przyrostowi objętości danej substancji o objętości początkowej 1 m^3 , gdy podgrzejemy ją o 1 kelwin. Wartość tego współczynnika zależy w dużym stopniu od stanu skupienia substancji:

- w przypadku ciał stałych można wykazać, że w przybliżeniu $\alpha = 3\lambda$;
- dla wszystkich gazów pod stałym ciśnieniem współczynnik α jest taki sam i wynosi około $\frac{1}{273} = 0,00366$, co wynika z ogólnych właściwości gazów;
- wartości współczynnika α dla wybranych cieczy przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Współczynniki objętościowej rozszerzalności cieplnej dla wybranych cieczy.

Substancja	$\alpha, \frac{1}{K}$
alkohol etylowy	0,00111
nafta	0,00104
rtęć	0,00018
woda (powyżej 4°C)	0,00021

Porównując wartości współczynnika α dla różnych stanów skupienia, dochodzimy do wniosku, że dla cieczy jest on wielokrotnie większy niż dla ciał stałych, natomiast dla gazów jest zdecydowanie największy. Fakt ten został wykorzystany w konstrukcji silników – wykonują one pracę, gdy gazy, rozprężając się, naciskają na tłok.

Przykład

Buteleczka o pojemności 10 cm^3 została całkowicie napełniona alkoholem etylowym. W otworze w korku butelki zamontowano cienką rurkę (tzw. kapilarę) o średnicy wewnętrznej 1 mm , zachowując szczelność całego układu. Alkohol w butelce podgrzano o 20 K . Oblicz, na jaką wysokość podniesie się słup alkoholu w kapilarze. Rozszerzalność cieplną samej butelki pomijamy.

ciepły (termiczny)
przyrost objętości

współczynnik
objętościowej
rozszerzalności
cieplnej

zależność
objętościowej
rozszerzalności
cieplnej od stanu
skupienia
substancji

**Rozwiązanie**

Pod wpływem przyrostu temperatury objętość alkoholu wzrośnie o $\Delta V = V_0 \alpha \Delta T$.

$$\Delta V = 10 \text{ cm}^3 \cdot 0,0111 \frac{1}{\text{K}} \cdot 20 \text{ K} = 0,222 \text{ cm}^3$$

Objętość ta zostanie wepchnięta do kapilary, tworząc słup w kształcie walca o średnicy $d = 1 \text{ mm}$ i wysokości h .

$$\Delta V = \pi \frac{d^2}{4} h \quad \Rightarrow \quad h = \frac{4 \Delta V}{\pi d^2}$$

$$h = \frac{4 \cdot 0,222 \text{ cm}^3}{3,14 \cdot 0,1^2 \text{ cm}^2} = 28,3 \text{ cm}$$

Odpowiedź: Poziom alkoholu w kapilarze podniesie się o 28,3 cm.

Zwróćmy uwagę, że chociaż butelka z alkoholem była niewielka, wynik jest znaczny. Jest to spowodowane tym, że kapilara była cienka.

Zastosowania rozszerzalności objętościowej

Termiczna rozszerzalność objętościowa znalazła szerokie zastosowanie w budowie termometrów cieczowych. Ideę ich działania wyjaśnia rozwiązany wyżej przykład. Użycie zbiornika na ciecz roboczą oraz cienkiej kapilary pozwala mierzyć przyrosty objętości cieczy spowodowane zmianą temperatury z dużą dokładnością. Przykładem do budowy termometru cieczowego czynił już Newton w 1701 roku, ale pierwsze precyzyjne termometry oparte na rtęci lub alkoholu skonstruował w 1717 roku urodzony w Polsce fizyk niemieckiego pochodzenia **Daniel Gabriel Fahrenheit** (czyt. farenhait, 1686–1736). Skala Fahrenheita jest do dzisiaj używana w niektórych krajach, np. w USA. W większości państw świata stosuje się obecnie skalę zaproponowaną w 1742 roku przez szwedzkiego astronoma **Andersa Celsiusa** (1701–1744).



Rys. 8. Termometry cieczowe.

Rozszerzający się pod wpływem wzrostu temperatury gaz zmniejsza swoją gęstość, co zostało wykorzystane do budowy balonów na ogrzane powietrze. Objętość powłoki takiego balonu wprawdzie pozostaje stała i nie zmienia się w związku z tym siła wyporu działająca na balon, ale zawarte w nim ogrzane powietrze jest lżejsze. To powoduje, że balon unosi się do góry i może zabrać ze sobą ładunek.



Rys. 9. Startujący balon braci Montgolfier.

Pierwszej publicznej demonstracji lotu balonu na ogrzane powietrze dokonali we Francji bracia **Montgolfier** (czyt. mągolfje) 4 lipca 1783 roku. W październiku tego roku odbył się pierwszy lot załogowy – człowiek w balonie na uwięzi wzniósł się na wysokość 26 metrów.

Rozszerzalność cieplna leży też u podstaw działania komina. Powietrze rozgrzane w palenisku, mimo że zawiera więcej ciężkiego dwutlenku węgla i pyłów, i tak ma mniejszą gęstość niż zimne powietrze w otoczeniu. Dlatego wędruje do góry, umożliwiając zasysanie do paleniska nowych porcji powietrza, bogatych w tlen. Jest to przykład zjawiska często spotykanego w przyrodzie – **konwekcji**.

Będzie o niej mowa na jednej z najbliższych lekcji.

konwekcja

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wyjaśnij, który termometr będzie miał większą rozdzielczość: posiadający cieńszą kapilarę czy grubszą.
2. Który termometr będzie dokładniejszy: posiadający większy czy mniejszy zbiornik na ciecz? Odpowiedź uzasadnij.
3. Dwa termometry mają zbiorniki o identycznej objętości i kapilary o identycznej średnicy. Jeden jest wypełniony alkoholem, a drugi rtęcią. Na skali którego z nich będą większe odstęp między kreskami oznaczającymi kolejne stopnie? Odpowiedź uzasadnij.
4. Kapilara termometru rtęciowego ma pole przekroju $0,5 \text{ mm}^2$. Odległość pomiędzy kreskami na skali oznaczającymi kolejne stopnie wynosi 6 mm. Oblicz objętość zbiorniczka z rtęcią.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Większość ciał stałych i cieczy oraz wszystkie gazy zwiększają swoją objętość pod wpływem wzrostu temperatury. s. 44
- Cieplny (termiczny) przyrost objętości ciała jest wprost proporcjonalny do objętości początkowej tego ciała i przyrostu temperatury oraz zależy od rodzaju substancji. s. 45
- Współczynnik proporcjonalności we wzorze opisującym prawo rozszerzalności objętościowej to współczynnik objętościowej rozszerzalności cieplnej. Mówi on, o ile wzrośnie objętość ciała o objętości początkowej 1 m^3 , gdy podgrzejemy go o 1 stopień. s. 45
- Największą rozszerzalność cieplną wykazują gazy, mniejszą – ciecze, a najmniejszą – ciała stałe. s. 45
- Objętościowa rozszerzalność cieplna płynów znalazła zastosowanie w termometrach cieczowych i balonach na ogrzane powietrze. s. 45
- Objętościowa rozszerzalność cieplna płynów i gazów wywołuje zjawisko zwane konwekcją. Dzięki niej działa np. komin. s. 47



2.3. Energia wewnętrzna i ciepło

NA TEJ LEKCJI

- przypomnisz sobie i ugruntujesz pojęcie energii wewnętrznej,
- zrozumiesz różnicę pomiędzy energią wewnętrzną a ciepłem.

Energia wewnętrzna

Z pojęciem energii wewnętrznej spotkałeś/spotkałaś się już w szkole podstawowej. Przypomnijmy sobie definicję:

energia
wewnętrzna ciała

Energia wewnętrzną ciała spoczywającego nazywamy sumę wszystkich rodzajów energii cząsteczek tego ciała, a więc ich energii kinetycznych i energii ich wzajemnego oddziaływania.



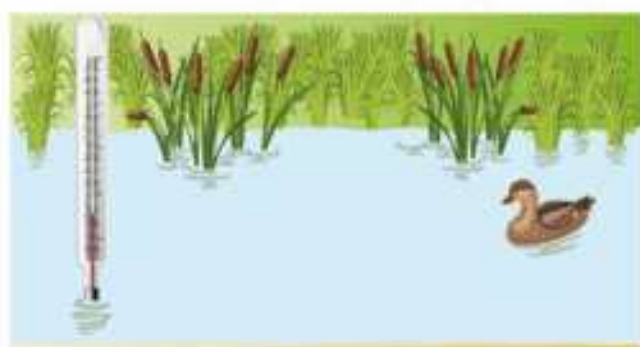
Ze względu na skomplikowany charakter oddziaływań między cząsteczkami całkowita energia wewnętrzna ciała jest trudna do oszacowania. O wiele łatwiej jest obliczyć jej zmiany. Przybliżymy sobie to pojęcie na zasadzie szeregu porównań.

Rys. 10. Ciała o identycznej masie i identycznym składzie chemicznym, ale różnej temperaturze.

Porównajmy dwie identyczne szklanki z jednakową ilością wody, przy czym w jednej woda jest gorąca, a w drugiej – zimna. Cząsteczki wody o wyższej temperaturze mają większą energię kinetyczną niż cząsteczki o niższej temperaturze. Liczba cząsteczek w obydwu szklankach jest jednakowa. Suma energii kinetycznych cząsteczek w pierwszej szklance jest większa. Gorąca woda ma większą energię wewnętrzną niż ta sama ilość wody zimnej.

Energia wewnętrzna ciała zależy od jego temperatury.

Woda w szklance i jeziorze ma tę samą temperaturę. Energie kinetyczne cząsteczek wody w obu zbiornikach są jednakowe. Ale wody w jeziorze jest znacznie więcej. Suma energii kinetycznych cząsteczek wody w jeziorze będzie miała więcej skład-



ników. Energia wewnętrzna wody w jeziorze jest większa niż energia wewnętrzna wody w szklance. Porównanie wypadnie na korzyść jeziora nawet w sytuacji, gdy woda w szklance będzie gorąca. Zimny ocean jest w stanie wpływać na klimat całej planety, szklanka wrzątku – nie.

Rys. 11. Ciała o tej samej temperaturze i składzie chemicznym, ale różnej masie.



Energia wewnętrzna ciała zależy od jego wielkości.

Woda i lód na rysunku 12. mają tę samą masę i tę samą temperaturę. Energie kinetyczne cząsteczek w obu przypadkach są jednakowe, jednakowa jest również ich



Rys. 12. Ciała o tej samej temperaturze, tej samej masie, tym samym składzie chemicznym, ale różniące się stanem skupienia.

liczba. Zatem suma energii kinetycznych cząsteczek w obu szklankach jest ta sama. Jest jednak coś, co różni cząsteczki w obu przypadkach – energia wzajemnego oddziaływania. Cząsteczki lodu są uwięzione w sieci krystalicznej. Cząsteczki wody mają większą swobodę. Aby wyswobodzić cząsteczki z sieci (stopić lód), trzeba im dostarczyć energii, która spowoduje wzrost energii potencjalnych wzajemnych oddziaływań. Woda ma większą energię wewnętrzną niż ta sama ilość lodu w tej samej temperaturze.

Energia wewnętrzna ciała zależy od jego stanu skupienia.



Rys. 13. Ciała o tej samej masie, tej samej temperaturze, tym samym stanie skupienia, ale różniące się składem chemicznym.

Na rysunku 13. w lewej szklance jest woda, a w prawej – benzyna. Obie cieczki mają tę samą masę, tę samą temperaturę i ten sam stan skupienia. Różnica polega na tym, że benzynę można podpalić. Powstanie z niej dwutlenek węgla i para wodna – substancje, w których energia potencjalna wiązań chemicznych jest mniejsza niż w benzynie. Różnica tych energii wydzielą się jako ciepło. Możliwości wydobywania energii z wody za pomocą reakcji chemicznych są mocno ograniczone. Energia wewnętrzna benzyny jest większa niż energia wewnętrzna wody o tej samej masie i temperaturze.

Energia wewnętrzna ciała zależy od jego składu chemicznego.

Podane przykłady nie wyczerpują wszystkich możliwości, gdyż energia wewnętrzna ma dużo składników. Niemniej dają prawidłowe wyobrażenie na temat sensu tego pojęcia. Reasumując, energia wewnętrzna zawarta jest we wnętrzu ciała i nie ma związku z jego ruchem jako całością ani położeniem w polu grawitacyjnym. Zależy natomiast od masy tego ciała, jego temperatury, stanu skupienia i energii wiązań chemicznych.

zależność energii wewnętrznej ciała



jednostka energii
wewnętrznej ciała

Energię wewnętrzną, dla odróżnienia od innych form energii, oznaczamy literą U . Jednostką energii wewnętrznej (tak jak każdego innego rodzaju energii) jest **dżul**.

Ciepło

Każde ciało o temperaturze wyższej niż 0 K może samorzutnie przekazać część swojej energii wewnętrznej ciału o niższej temperaturze. Sposoby przekazywania tej energii zostaną szczegółowo omówione na następnej lekcji, teraz zajmijmy się jednym z przypadków.

Co cię stanie, gdy ciało o wyższej temperaturze zetkniemy z ciałem o niższej temperaturze? Cząsteczki obydwu ciał drgają, przy czym energia kinetyczna drgań cząsteczek ciała o wyższej temperaturze jest większa. Cząsteczki jednego ciała będą się zderzać z cząsteczkami drugiego ciała i przekazywać im część swojej energii kinetycznej. Temperatura pierwszego ciała będzie maleć, a drugiego rosnąć. Ciało pierwsze będzie przekazywać część swojej energii wewnętrznej ciału drugiemu. Proces ten będzie trwał tak długo, aż temperatury obydwu ciał się wyrównają. Zjawisko to nazywamy przekazem ciepła.

ciepło

Ciepło to ta część energii wewnętrznej, która może zostać samorzutnie przekazana przez ciało o wyższej temperaturze ciału o niższej temperaturze.

jednostka ciepła

Ciepło oznaczamy literą Q . Jednostką ciepła jest **dżul**.



Chcesz wiedzieć więcej?

Chociaż już od wieków dostrzegano związek zjawisk cieplnych na przykład z tarciem, mniej więcej do połowy XIX wieku nie rozumiano, na czym polega istota ciepła. Dominował pogląd, że ciepło jest pewnym fluidem – bezbarwną, nienamacalną, nieważką i niezniszczalną substancją, zdolną przenikać wszystkie inne substancje i się w nich magazynować. Polski uczony, Jędrzej Śniadecki nadał mu nazwę „cieplik”. Przez pewien czas cieplik był nawet umieszczany na liście pierwiastków chemicznych razem ze „światlikiem” – fluidem światła.

Wyobrażano sobie, że cząsteczki cieplika przyciągają się do cząsteczek zwykłych substancji, natomiast odpychają się między sobą, co miało być powodem ich samorzutnego przepływu z ciał o wyższej temperaturze do ciał o niższej temperaturze. Cząsteczki cieplika, wpychając się między atomy zwykłych substancji, miały powodować rozszerzalność cieplną. Cieplik dodany do lodu miał tworzyć wodę itd. Na podstawie teorii cieplika udało się nawet stworzyć poprawną teorię działania silników cieplnych.

Dopiero odkrycie zasady zachowania energii przez Juliusza Mayera (czyt. majera), Jamesa Prescottta Joule'a (czyt. dżejmsa preskota dżula) i Hermana von Helmholtza (czyt. fon helmholca) dowiodło, że cieplik nie istnieje, a ciepło jest jedną z form energii i ma bezpośredni związek z pracą i energią wewnętrzną (mechaniczną).



ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Czy każde ciało posiada energię wewnętrzną? Odpowiedź uzasadnij.
2. Wyjaśnij, dlaczego nie jest możliwy samorzutny przekaz ciepła pomiędzy ciałami o tej samej temperaturze.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Energia wewnętrzna to suma wszystkich rodzajów energii cząsteczek ciała spoczywającego, a więc ich energii kinetycznych i energii potencjalnych związanych ze wzajemnym oddziaływaniem. s. 48
- Energia wewnętrzna zależy od temperatury ciała, jego wielkości, stanu skupienia i składu chemicznego. s. 49
- Ciało może przekazać część swojej energii wewnętrznej innemu ciału o niższej temperaturze w postaci ciepła. s. 50
- Jednostką energii wewnętrznej i ciepła jest dżul. s. 50

2.4. Sposoby przekazywania energii

NA TEJ LEKCJI

- uzupełnisz swoje wiadomości na temat przewodnictwa cieplnego, promieniowania cieplnego i konwekcji,
- poznasz rolę tych zjawisk w przyrodzie i technice.

Jak zapewne pamiętasz ze szkoły podstawowej, wyróżniamy trzy sposoby przekazywania energii w postaci ciepła z jednego ciała do drugiego: **przewodnictwo cieplne**, **konwekcję** i **promieniowanie**. Zjawiska, o których tu mowa, towarzyszą ci na każdym kroku w życiu codziennym.

sposoby
przekazywania
energii

Przewodnictwo cieplne

Doświadczenie 1.

Pomoce: lodówka lub pojemnik z lodem, naczynie z gorącą wodą, dwa dowolne przedmioty metalowe (np. łyżeczki), dwa dowolne przedmioty z drewna, styropianu lub plastiku.

Umieść w lodówce lub w lodzie jeden przedmiot metalowy i jeden z innego materiału. Drugi przedmiot metalowy oraz drewniany/styropianowy/plastikowy włóż do gorącej wody. Zaczekaj, aż ciała osiągną stan równowagi termicznej – ich temperatury zrównają się odpowiednio z lodem lub gorącą wodą. Wyjmij oba przedmioty z lodu i przyłóż do nich ręce. Porównaj wrażenia z dotykania obu przedmiotów. Wyjmij oba przedmioty z gorącej wody i również przyłóż do nich ręce. Porównaj wrażenia.



Metalowy przedmiot wyjęty z lodu w trakcie dotykania cały czas wydaje się zimny. Wrażenia z dotykania drugiego z przedmiotów bardzo szybko stały się neutralne. Metalowy przedmiot wyjęty z gorącej wody bardzo długo sprawia wrażenie gorącego. Drugi z przedmiotów nie sprawia takiego wrażenia. Jak wyjaśnić ten fenomen?

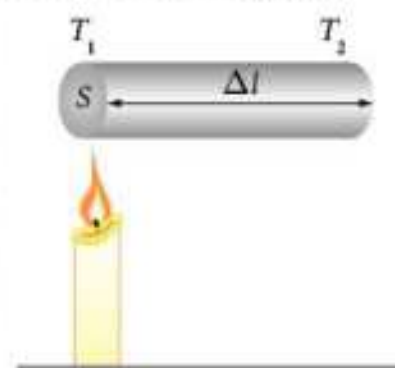
Otóż ciała wydają się gorące lub zimne nie tylko z powodu swojej temperatury, ale również różnej zdolności do przewodzenia ciepła. Metale to substancje, które dobrze przewodzą ciepło. Gdy przedmiot metalowy ma temperaturę niższą od temperatury twoich palców, pobiera z nich ciepło i rozprowadza w całej swojej objętości. Wydaje się zimny. Z kolei metal o temperaturze wyższej od temperatury twojego ciała będzie dostarczał ci ciepła z całej swojej objętości. Będzie się wydawał ciepły.

Pozostałe substancje użyte w doświadczeniu raczej słabo przewodzą ciepło (izolują termicznie). W kontakcie z twoim ciałem dostarczają ci ciepła lub je odbierają tylko z obszarów bezpośrednio przylegających do twoich palców. Temperatury lokalnie szybko się wyrównują i wrażenia cieplne stają się obojętne.

mechanizm
przewodnictwa
cieplnego

Przewodnictwo cieplne wymaga obecności substancji. Zachodzi w obrębie jednego ciała (np. gdy podgrzewamy jeden koniec metalowego pręta) lub na styku dwóch ciał – na przykład w momencie, gdy trzymasz w ręce metalowy przedmiot. Mechanizm **przewodnictwa cieplnego** polega na przekazywaniu energii kinetycznej ruchu drgającego atomów kolejnym atomom. Nieprzypadkowo dobrymi przewodnikami ciepła są dobre przewodniki elektryczności. W ich wnętrzu oprócz atomów uwięzionych w sieci krystalicznej występują też swobodne elektrony, które poruszają się ruchem chaotycznym w całej objętości. Odbierają one energię kinetyczną atomom „cieplejszym” i przekazują ją na duże odległości, zderzając się z atomami „zimniejszymi”. W substancjach słabo przewodzących ciepło ten mechanizm nie występuje.

Gdybyśmy chcieli zbadać, od czego zależy ilość energii przekazywanej w jednostce czasu przez pręt (rys. 14.), okazałoby się, że zależy ona wprost proporcjonalnie od różnicy temperatur na jego końcach, wprost proporcjonalnie od pola przekroju pręta, odwrotnie proporcjonalnie od jego długości oraz zależy od materiału, z którego wykonany jest pręt. Łatwiej to sobie wyobrazić, przyjmując, że ten pręt jest elementem ściany. Przez ścianę tym szybciej będzie „uciekać” ciepło, im będzie ona większa (większe S), cieńsza (mniejsze Δl) i im zimniej będzie na dworze (większa różnica temperatur T_1 i T_2). Zależać też będzie od materiału konstrukcyjnego ściany.



Rys. 14. Przewodnictwo cieplne.

przekaz ciepła

Czasami chcemy wykorzystać zjawisko dobrego przewodnictwa cieplnego, dlatego na przykład kaloryfery, radiatory, płyty grzejne i garnki wykonujemy z metali. Często przewodnictwo cieplne jest niepożądane. Używamy wtedy materiałów izolacyjnych, na przykład na domach lub rurociągach z ciepłą wodą.

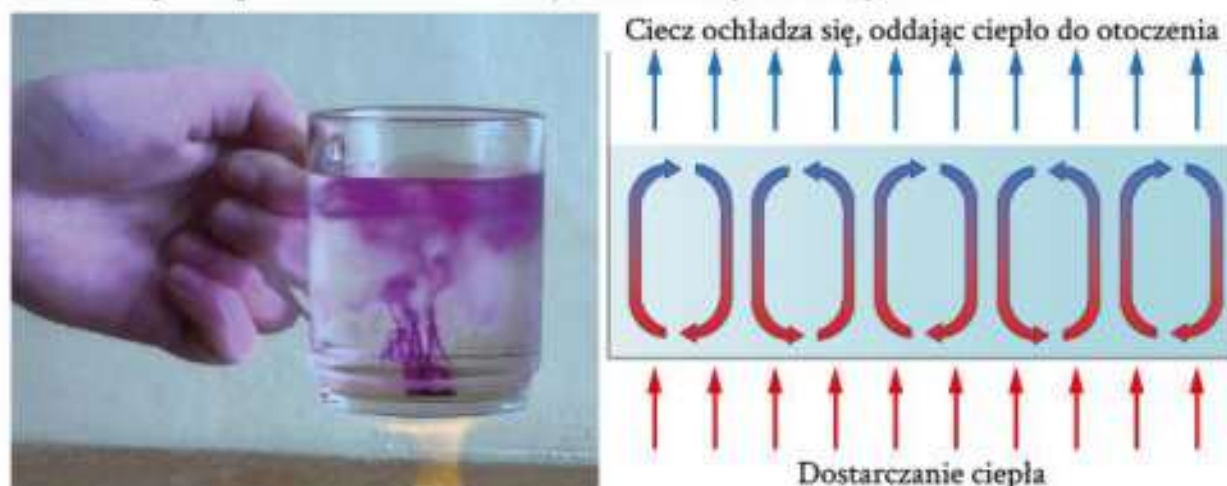


Konwekcja

Doświadczenie 2.

Pomoce: naczynie szklane z wodą, palnik, kryształek nadmanganianu potasu lub innej barwiącej substancji albo kropla atramentu.

Wrzuć do naczynia z wodą kryształek nadmanganianu potasu. Zaczynij podgrzewać wodę nad palnikiem. Obserwuj ruch cieczy w naczyniu.



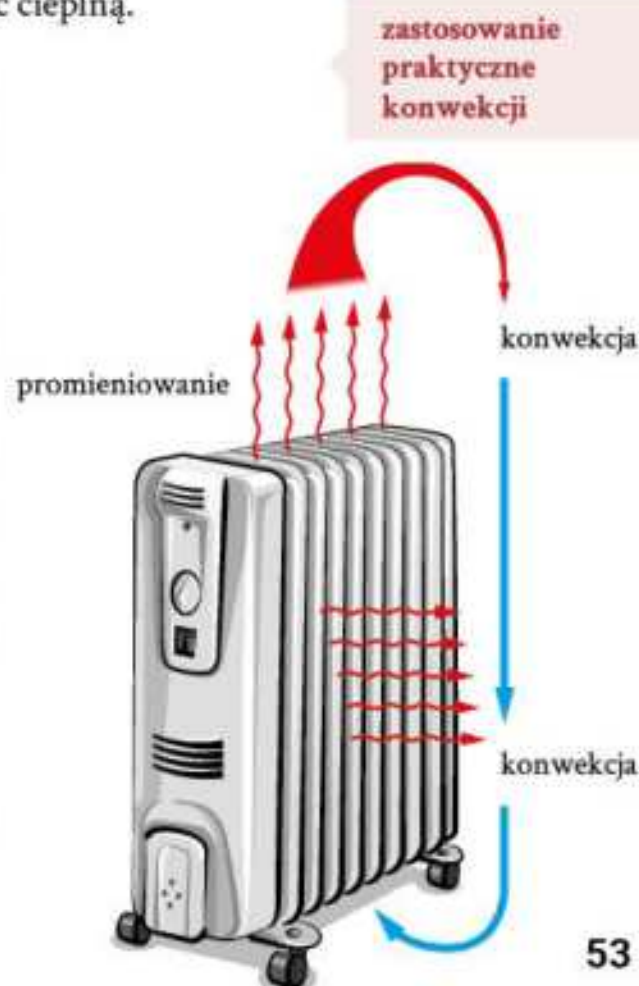
Rys. 15. Konwekcja.

Przewodnictwo cieplne nie jest zbyt wydajnym sposobem przekazywania energii w postaci ciepła. O wiele skuteczniejsza jest zaobserwowana w doświadczeniu 2. **konwekcja**. Zachodzi ona w płynach (cieczach i gazach). Rozgrzany płyn na skutek rozszerzalności cieplnej ma większą objętość, wobec tego działa na niego większa siła wyporu. Unosi się więc do góry, ustępując miejsca płynowi chłodniejszemu, który dociera do źródła ciepła. Wznoszące się i opadające strugi płynu tworzą tzw. komórki konwekcyjne, które można było zaobserwować w doświadczeniu. Prądy konwekcyjne przenoszą energię w postaci ciepła wraz z materią. Dzieje się tak nawet wtedy, gdy poruszająca się substancja jest izolatorem ciepła. Konwekcja zachodzi automatycznie w warunkach grawitacji, o ile tylko płyn wykazuje rozszerzalność cieplną.

Dzięki konwekcji możemy na przykład ugotować zupę. Gdyby nie konwekcja, zupa przypaliłaby się od dołu, a u góry pozostawałaby zimna. Dzięki konwekcji możliwe jest także palenie się płomienia. Gorący dym unosi się do góry, a w jego miejsce dopływa zimne powietrze bogate w tlen. Zapalka zapalona na stacji kosmicznej w warunkach nieważkości szybko gaśnie. Otacza się dwutlenkiem węgla, który jest równie nieważki, jak zimne powietrze. Nie ma prądów konwekcyjnych i dopływ tlenu do zapalki zostaje odcięty.

Konwekcję wykorzystujemy w centralnym ogrzewaniu – zarówno do transportu ciepłej wody w kaloryferach, jak i do rozprowadzania powietrza ogrzanego przez kaloryfer w całym pomieszczeniu.

Rys. 16. Podgrzewanie powietrza przez kaloryfer.



**wpływ konwekcji
na klimat Ziemi**

Komórki konwekcyjne mogą być olbrzymie i rozciągać się na całe kontynenty. Ogrzane masy powietrza unoszą się nad równikiem, stygną i skrapla się w nich woda, która opada w postaci deszczów w lasach równikowych. Pozbawione wody masy powietrza opadają na ziemię w okolicach zwrotników i dlatego występują tam suche pustynie. Prądami konwekcyjnymi są też prądy morskie, kształtujące klimat na całej planecie. W jeszcze większej skali konwekcja występuje w gwiazdach, np. w Słońcu. Dzięki niej energia wyzwolana w jądrach gwiazd dociera do ich powierzchni, skąd jest następnie wypromieniowywana.

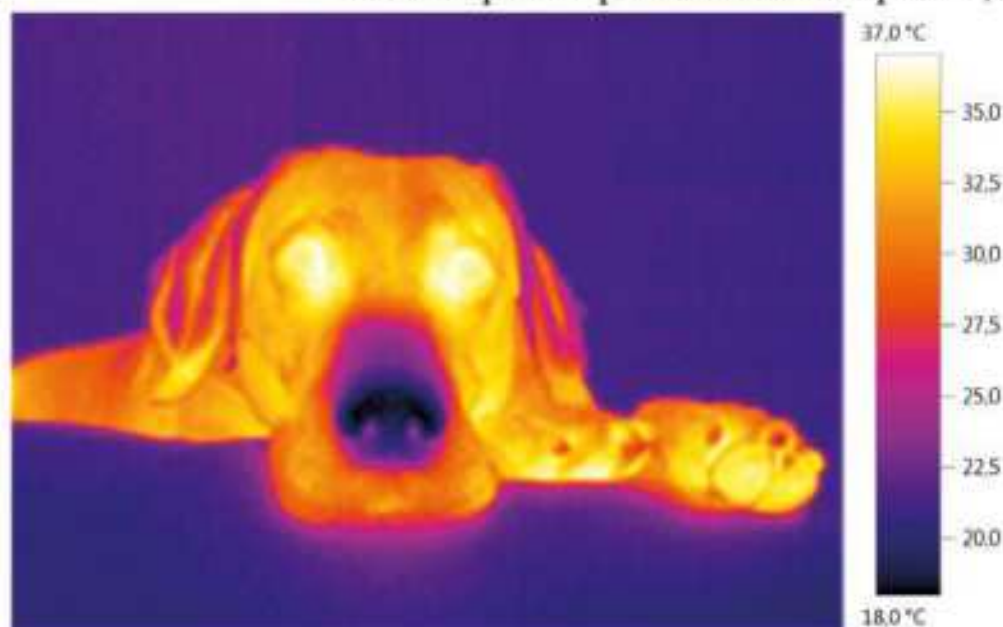
Konwekcja nie zachodzi, gdy przestrzeń zajęta przez płyn jest zbyt mała. Zostało to wykorzystane w produkcji materiałów izolacyjnych. Wełna i puchowa kołdra wydają się „cieple”, ponieważ ich włókna dzielą powietrze na zbyt małe obszary. Nie ruchome powietrze uwięzione w porowatej strukturze materiałów budowlanych i w tkaninach stanowi doskonały izolator ciepła.

Promieniowanie ciepłe

Wymienione dotychczas sposoby transportu energii w postaci ciepła wymagały pośrednictwa materii. W przypadku przewodnictwa materia pozostawała nieruchoma, a podczas konwekcji przemieszczała się wraz z energią. Trzeci sposób, **promieniowanie**, nie potrzebuje pośrednictwa materii – ona wręcz przeszkadza. Promieniowanie najłatwiej rozchodzi się w próżni. Między Słońcem a Ziemią jest 150 milionów kilometrów pustej przestrzeni, którą promienie słoneczne pokonują z największą łatwością.

Wszystkie ciała o temperaturze większej od zera bezwzględnego promieniują energię. Odbywa się to za pomocą fal elektromagnetycznych o różnych długościach. Wraz ze wzrostem temperatury silnie wzrasta intensywność tego promieniowania, a długości emitowanych fal maleją.

Ciała o temperaturze pokojowej i nieco wyższej emitują promieniowanie podczerwone. Jest ono niewidzialne dla oka ludzkiego, natomiast skóra odbiera je jako wrażenie ciepła. To promieniowanie sprawia, że czujemy na odległość ciepło „bijące” od



Rys. 17. Przykładowy obraz termowizyjny. Promieniowanie podczerwone o różnych długościach fal zostało przetworzone na światło widzialne o różnych kolorach.

Słońca lub kaloryfera. Promieniowanie to można rejestrować za pomocą noktowizorów i kamer termowizyjnych oraz przetwarzać na światło widzialne. Za pomocą takich kamer można na przykład badać szczelność izolacji cieplnej budynków lub wyszukiwać w gruzach ludzi zasypanych podczas trzęsienia ziemi. Zjawisko promieniowania cieplnego wykorzystuje się także w powszechnie już stosowanych termometrach bezdotykowych.



Gdy temperatura ciała przekracza kilkaset stopni, oprócz podczerwieni emituje ono również fale krótsze, z zakresu widzialnego. W miarę wzrostu temperatury kolor tego promieniowania zmienia się z czerwonego na pomarańczowy, żółty i biały. Źródła o bardzo wysokich temperaturach, takich jak powierzchnia Słońca i łuk elektryczny, emitują również promieniowanie nadfioletowe, o falach jeszcze krótszych, niewidzialne i szkodliwe dla zdrowia. Dlatego w lecie należy ograniczać przebywanie na słońcu. Z podobnej przyczyny spawacze muszą używać specjalnych masek zasłaniających całą twarz i ręce.

Promieniowanie ciepłe rozchodzi się w próżni z prędkością światła i jest dominującą metodą przekazu energii w przestrzeni kosmicznej.

prędkość
rozchodzenia się
promieniowania
ciepłego

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wyjaśnij, dlaczego zapaloną zapalkę można z łatwością utrzymać w palcach niemal do momentu kontaktu z płomieniem.
2. Wyjaśnij, dlaczego puchowa kurtka wydaje się „ciepła”.
3. Wyszukaj w literaturze lub internecie i opisz praktyczne zastosowania konwekcji inne niż wymienione w podręczniku.
4. Wyszukaj w literaturze lub internecie opisy urządzeń, które w swoim działaniu wykorzystują promieniowanie ciepłe.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Energia wewnętrzna może być przekazywana od ciała o wyższej temperaturze do ciała o niższej temperaturze na drodze przewodnictwa ciepłego, konwekcji lub promieniowania. s. 51
- Przewodnictwo ciepłe zachodzi w materii i polega na stopniowym przekazywaniu kolejnym atomom energii kinetycznej ruchu drgającego. s. 52
- Różne substancje w tych samych warunkach przewodzą różne ilości ciepła. s. 52
- Ilość ciepła przenikającego przez przegrodę zależy od jej pola powierzchni, grubości oraz różnicy temperatur. s. 52
- Konwekcja to przekazywanie energii wewnętrznej wraz z ruchem materii, spowodowanym zmianą gęstości tej materii na skutek rozszerzalności cieplnej. s. 53
- Konwekcja znalazła liczne zastosowania praktyczne. s. 53
- Konwekcja jest odpowiedzialna za kształtowanie klimatu na Ziemi i pełni doniosłą funkcję w życiu gwiazd. s. 54
- Promieniowanie energii w postaci ciepła nie wymaga pośrednictwa materii. Rozchodzi się za pomocą fal elektromagnetycznych o różnych długościach. s. 54
- Wszystkie ciała o temperaturze większej od zera bezwzględnej emitują promieniowanie. s. 54
- Promieniowanie energii w postaci ciepła rozchodzi się w próżni z prędkością światła. s. 55



2.5. Pierwsza zasada termodynamiki

NA TEJ LEKCJI

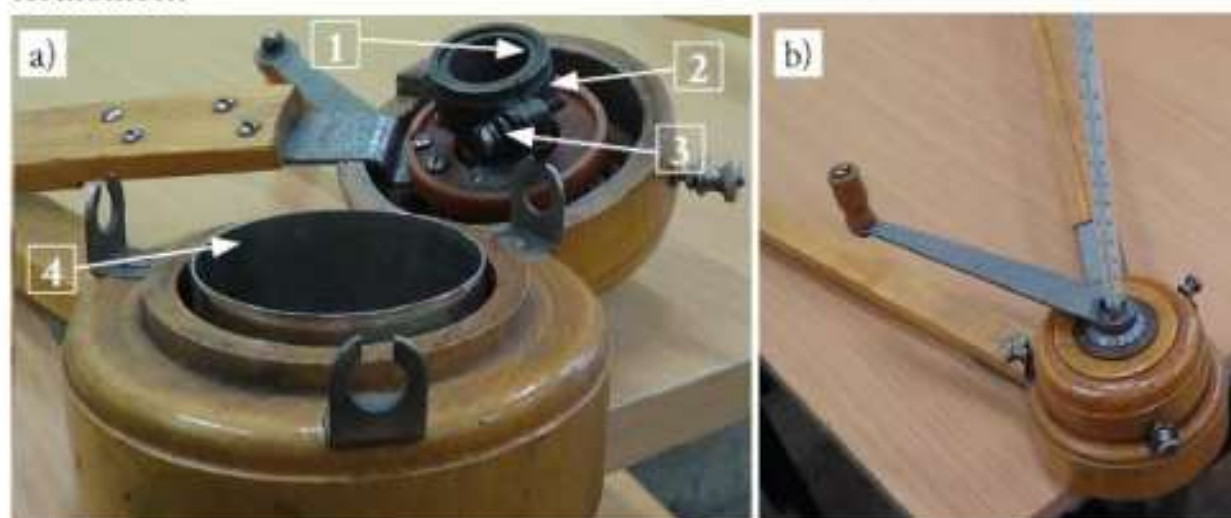
- przekonasz się o równoważności pracy i ciepła,
- poznasz dokładniej jedno z fundamentalnych praw przyrody – pierwszą zasadę termodynamiki.

Doświadczenie Joule'a

O tym, że pracę mechaniczną można łatwo zamienić na energię wewnętrzną, możemy się przekonać, pocierając o siebie dwie ręce. Metodę pocierania patyczków wykorzystywał już człowiek prehistoryczny do wzniesienia ognia. Obecnie zbadamy sprawę nieco dokładniej.

Doświadczenie

Pomocne naukowe: termoergometr, nafta lub inna ciecz niepowodująca korozji, termometr.



Rys. 18. Termoergometr: a) budowa wewnętrzna (1 – tuleja, 2 – jarzmo, 3 – śruba zaciskowa, 4 – naczynie na ciecz), b) wygląd zewnętrzny po zmontowaniu.

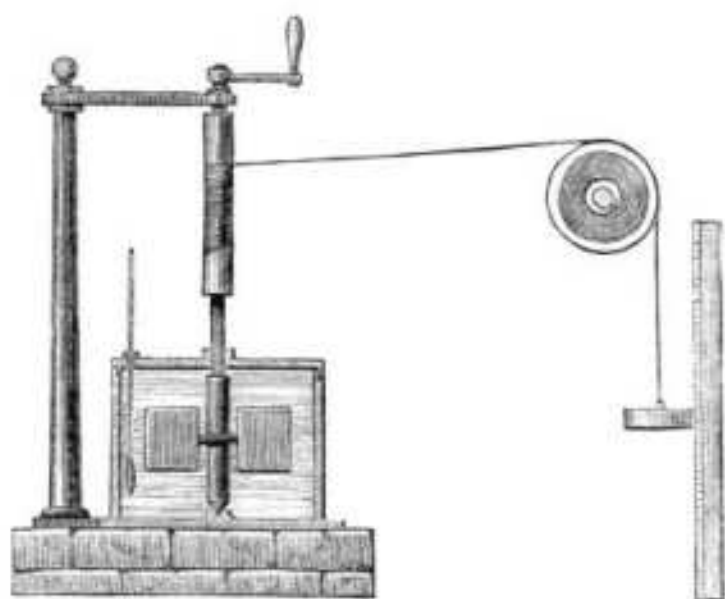
Termoergometr to urządzenie służące do wykazywania równoważności pracy i ciepła. Składa się z drewnianej podstawy mocowanej do stołu, w której znajduje się metalowe naczynie na ciecz. Górna część zawiera metalową tuleję połączoną z korbką. Tuleja jest otoczona metalowym jarzmem o średnicy regulowanej śrubą. Przekręcając śrubę, regulujemy siłę docisku jarzma do tulei, a tym samym – siłę tarcia. Obie części termoergometru są wyposażone w drewniane wysięgniki, do których można przyczepić siłomierz, aby kontrolować wartość siły wykonującej pracę. Mocujemy dolną część urządzenia do stołu. Do naczynia wlewamy pewną ilość nafty lub oleju. Nie używamy wody, gdyż spowodowałaby ona korozję urządzenia. Ponadto woda ma duże ciepło właściwe, więc efekt, jaki chcielibyśmy zaobserwować, byłby mniejszy. Regulujemy jarzmo za pomocą śruby, aby kręcenie korbką wymagało niewielkiego wysiłku. Następnie mocujemy za pomocą śrub górną część termoergometru tak, by jarzmo i tuleja zanurzyły się w nalanej cieczy. Przez otwór w osi korby wkładamy termometr i mierzymy temperaturę początkową cieczy.



Po zmierzeniu temperatury wyjmujemy termometr, by go nie uszkodzić, i wykonujemy korbą 200 szybkich obrotów. Następnie ponownie wkładamy termometr do otworu i odczytujemy temperaturę końcową.

Obserwacja: temperatura nafty (i zanurzonych w niej elementów) wzrosła o kilka stopni.

Podobne eksperymenty były wykonywane w latach czterdziestych XIX wieku przez angielskiego fizyka Jamesa Prescottta Joule'a (czyt. dżejmsa preskota dżula). Zasadniczym elementem jego aparatury było izolowane termicznie naczynie z cieczą roboczą. W różnych wersjach eksperymentu była to woda, olej lub rtęć. Temperatura cieczy była mierzona niezwykle czułymi termometrami. Wewnątrz cieczy wirowały łopatki mieszadła napędzane energią mechaniczną, np. poprzez obniżanie się ciężarków zawieszonych w odpowiedni sposób na sznurkach. Idea eksperymentu polegała na tym, że energia potencjalna ciężarków miała się zamieniać na energię kinetyczną łopatek mieszadła, a ta – w energię wewnętrzną cieczy. Joule mierzył pracę wykonywaną podczas wprawiania mieszadła w ruch i porównywał ją z ilością ciepła niezbędną do podniesienia się temperatury cieczy o zmierzoną wartość. Wielokrotnie powtarzane eksperymenty z różnymi cieczami i różnymi sposobami napędzania mieszadła dawały zawsze taki sam przelicznik ilości wykonanej pracy na wytworzone ciepło. W ten sposób Joule udowodnił, że można zwiększyć energię wewnętrzną ciała poprzez wykonanie nad nim pracy i ten sposób niczym się nie różni od dostarczenia ciepła do układu.



Rys. 19. Schemat aparatury w doświadczeniu Joule'a – pomiarze mechanicznego równoważnika ciepła.



Rys. 20. James Prescott Joule (1818–1889), wybitny angielski fizyk eksperymentator. Jeden ze współodkrywców zasady zachowania energii. Udowodnił, że ciepło nie jest fluidem, tylko jedną z form energii. Na jego cześć jednostkę pracy i energii nazwano *dżulem*.

Chcesz wiedzieć więcej?

Stosowana jeszcze do dzisiaj, zwłaszcza w dietetyce, jednostka ciepła – kaloria – wywodzi się z czasów, kiedy myślano, że ciepło jest czymś zupełnie innym niż zwykłą formą energii i że nie ma ono związku ze zjawiskami mechanicznymi. Dlatego do mierzenia ilości ciepła potrzebna była niezależna jednostka.





Kalorię zdefiniowano jako ilość ciepła niezbędną do podgrzania 1 grama czystej chemicznie wody o 1 stopień Celsjusza – konkretnie od $14,5^{\circ}\text{C}$ do $15,5^{\circ}\text{C}$.

Doświadczenie Joule'a wykazało, że aby mechanicznie zwiększyć energię wewnętrzną ciała o 1 kalorię, trzeba zawsze wykonać taką samą pracę, około 4,19 dżula. Ten przelicznik, $4,19 \frac{\text{J}}{\text{cal}}$, nosi nazwę mechanicznego równoważnika ciepła. Odkrycie, że ciepło jest formą energii, spowodowało, że kaloria stała się niepotrzebna, niemniej ciągle funkcjonuje ona w świadomości ludzi i nadal jest używana w niektórych dziedzinach.

Sformułowanie pierwszej zasady termodynamiki

Przypomnijmy podstawowy wniosek płynący z doświadczenia Joule'a:

Energia mechaniczna może zostać zamieniona na energię wewnętrzną ciała poprzez wykonanie pracy nad tym ciałem.

Oczywiście znamy też prostszy sposób zwiększenia energii wewnętrznej ciała – dostarczenie mu ciepła:

Energia wewnętrzna może zostać przekazana z jednego ciała do drugiego w postaci ciepła.

Jeśli otrzymamy do zbadania naczynie z ciepłą naftą, w żaden sposób nie ustalimy, czy wzrost temperatury nafty nastąpił poprzez dostarczenie jej ciepła na drodze przewodnictwa, promieniowania lub konwekcji, czy też naczynie zostało wstawione do termoergometru i wzrost temperatury był skutkiem wykonania pracy mechanicznej. Efekt dostarczenia ciepła do układu jest nieodróżnialny od efektu wykonania pracy nad układem.

zmiana energii
wewnętrznej
układu

Praca i ciepło stanowią dwa równoważne sposoby zmiany energii wewnętrznej układu.

Co się stanie, jeśli do układu dostarczymy ciepło oraz wykonamy nad nim pracę? Oczywiście każdy z tych procesów odniesie skutki, które się zsumują. Fakt ten stanowi sedno jednego z najważniejszych praw w fizyce – **pierwszej zasady termodynamiki**:

pierwsza zasada
termodynamiki

Zmiana energii wewnętrznej ciała lub układu równa jest sumie ciepła dostarczonego do tego ciała lub układu oraz wykonanej nad nim pracy.

$$\Delta U = Q + W,$$

gdzie ΔU – zmiana energii wewnętrznej układu, Q – ciepło dostarczone do układu, W – praca wykonana nad układem.



uogólnienie zasady
zachowania energii
mechanicznej

Zasada ta obejmuje wszystkie formy energii i jest uogólnieniem zasady zachowania energii mechanicznej, której uczyłeś/uczyłaś się w klasie pierwszej. Ponadto każda ze zmiennych występujących w równaniu może przyjmować wartości dodatnie, ujemne lub być równa zero. Znak plus przypisujemy ciepłu dostarczonemu do układu i pracy wykonanej nad układem. Znakiem minus oznaczamy ciepło oddane przez układ oraz pracę wykonaną przez układ. Możliwe są wobec tego liczne przypadki, z których najciekawsze to:

1. $Q = 0$, $\Delta U = W$. Układ jest izolowany cieplnie i nie ma wymiany ciepła z otoczeniem. Jeżeli praca jest wykonywana nad układem, wtedy jego energia wewnętrzna rośnie. Układ może też wykonywać pracę, wtedy jego energia wewnętrzna maleje. Mówimy, że układ wykonuje pracę kosztem swojej energii wewnętrznej.
2. $W = 0$, $\Delta U = Q$. Układ tylko pobiera ciepło, a wtedy jego energia wewnętrzna rośnie, lub tylko oddaje ciepło i jego energia wewnętrzna maleje. Nie jest wykonywana praca.
3. $Q > 0$, $W < 0$, $\Delta U = 0$. Układ pobiera ciepło i zamienia je na pracę mechaniczną. Energia wewnętrzna układu nie ulega zmianie.
4. $W > 0$, $Q < 0$, $\Delta U = 0$. Nad układem jest wykonywana praca i układ oddaje równoważną ilość ciepła do otoczenia. Jego energia wewnętrzna się nie zmienia.

W każdym innym przypadku zmianie ulegają wszystkie trzy wielkości fizyczne.

Przykład

Gaz pobrał 1800 J ciepła i wykonał 2000 J pracy. Oblicz zmianę energii wewnętrznej tego gazu.

Rozwiązanie

Dane:

$Q = 1800 \text{ J}$ (ciepło dostarczone)

$W = -2000 \text{ J}$ (praca oddana)

$\Delta U = Q + W$

$\Delta U = 1800 \text{ J} - 2000 \text{ J} = -200 \text{ J}$

Odpowiedź: Energia wewnętrzna gazu zmalała o 200 J.

Z analizy przypadku 3. wynika, że jeśli jakieś urządzenie ma wykonywać pracę, należy mu dostarczać energię. W przeciwnym wypadku jego energia wewnętrzna będzie maleć, aż się wyczerpie i urządzenie przestanie działać. Przez całe wieki wierzono, że uda się skonstruować maszynę, która raz wprowadzona w ruch będzie zdolna wykonywać pracę wiecznie, bez zasilania. To hipotetyczne urządzenie nazwano *perpetuum mobile*. Podjęto liczne próby skonstruowania go. Odkrycie pierwszej zasady termodynamiki uświadomiło ludziom, że te próby były daremne. Pierwsza zasada termodynamiki jest równoważna stwierdzeniu, że *perpetuum mobile* nie może istnieć.



ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Kawalkowi żelaza dostarczono 300 J ciepła. Drugi, taki sam kawałek żelaza pocierano, wykonując nad nim pracę 300 J. Temperatura którego kawałka żelaza wzrośnie bardziej? Odpowiedź uzasadnij.
2. Stalowy gwóźdź można rozgrzać, uderzając go młotkiem. Kowal rozgrzał gwóźdź do temperatury 100°C , wykonując nad nim pracę 250 kJ. Ile ciepła odda gwóźdź otoczeniu, stygnąc do pierwotnej temperatury?

PODSUMOWANIE LEKCJI

s. 58

- Energię wewnętrzną układu możemy zmienić, wykonując nad nim pracę lub dostarczając mu ciepło. Oba te sposoby są równoważne.

s. 58

- Zmiana energii wewnętrznej układu jest równa sumie ciepła dostarczonego do układu i wykonanej nad nim pracy. Jest to treść pierwszej zasady termodynamiki.

s. 59

- Pierwsza zasada termodynamiki jest uogólnieniem zasady zachowania energii mechanicznej na wszystkie rodzaje energii.

2.6. Ciepło właściwe

NA TEJ LEKCJI

- przypomnisz sobie pojęcie ciepła właściwego,
- będziesz rozwiązywać zadania dotyczące ciepła właściwego.

Doświadczenie

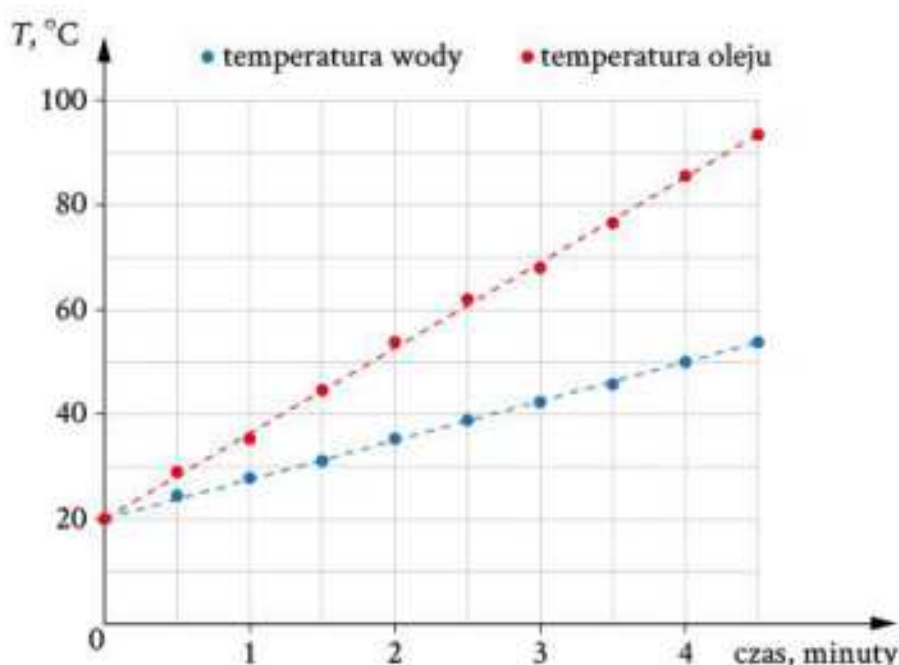
Pomoce: palnik, dwa identyczne naczynia, woda i jakaś inna ciecz niepalna, np. olej jadalny, termometr, waga.

Do naczynia wlewamy pewną ilość wody, ważymy ją, mierzymy jej temperaturę początkową, stawiamy na palniku i w regularnych odstępach czasu (np. co pół minuty) odczytujemy temperaturę. Wyniki pomiarów notujemy w tabeli sporządzonej w zeszycie. Następnie do identycznego naczynia nalewamy taką samą masę (nie objętość – dlatego posługujemy się wagą) innej cieczy i postępujemy podobnie. W trakcie doświadczenia nie zmieniamy intensywności płomienia.

Wyniki przykładowych pomiarów dla wody i oleju lnianego przedstawiono w tabeli i na wykresie (rys. 21.).



czas, min	$T_{\text{wody}}^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{oleju}}^{\circ}\text{C}$
0	20	20
0,5	24	29
1	27	36
1,5	31	44
2	35	53
2,5	39	62
3	42	68
3,5	46	77
4	50	85
4,5	54	93



Rys. 21. Wykres zależności temperatury wody i oleju od czasu ogrzewania.

Przeanalizujmy wyniki tego doświadczenia. Płomień pali się z jednakową intensywnością. Można więc założyć, że w jednakowych przedziałach czasu jedna i druga ciecz otrzymuje jednakowe ilości ciepła. Pomijamy tutaj straty energii wynikające z rozpraszania ciepła w otoczeniu oraz parowania – rozważania mają charakter wyłącznie jakościowy. Widzimy na wykresie, że temperatury cieczy rosną wprost proporcjonalnie do czasu, a więc również wprost proporcjonalnie do ilości dostarczonego ciepła.

Przyrost temperatury ciała jest wprost proporcjonalny do ilości dostarczonego mu ciepła.

$$\Delta T \sim Q, \text{ stąd } Q \sim \Delta T$$

przyrost
temperatury ciała

Codzienne doświadczenie uczy, że do ogrzania większej ilości danej cieczy potrzeba więcej ciepła. Dwa litry wody możemy w myślach podzielić na dwie porcje po 1 litrze. Ogrzanie o pewną liczbę stopni 2 litrów wody będzie więc wymagało 2 razy więcej ciepła niż ogrzanie 1 litra.

Ilość ciepła potrzebna do ogrzania ciała o określony przyrost temperatury jest wprost proporcjonalna do masy tego ciała.

$$Q \sim m$$

W przeprowadzonym doświadczeniu masa obydwu cieczy była jednakowa, ilość dostarczonego ciepła również. A mimo to przyrosty temperatur okazały się różne. Dla oleju były ponad dwukrotnie większe. Ciała o tej samej masie, wykonane z różnych substancji, potrzebują różnych ilości ciepła, aby ich temperatury wzrosły o tyle samo stopni. Dzieje się tak, gdyż w grę wchodzi jeszcze jeden czynnik charakteryzujący daną substancję. Pełni on funkcję współczynnika proporcjonalności i nosi nazwę **ciepła właściwego**. Ostatecznie ilość ciepła potrzebnego do ogrzania masy m danej substancji o ΔT zapiszemy następującym wzorem:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T,$$

gdzie $c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}$ jest ciepłem właściwym.



ciepło właściwe

Ciepło właściwe danej substancji to ilość energii, jaką wymienia z otoczeniem 1 kilogram tej substancji podczas zmiany temperatury o 1 kelwin:

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}$$

jednostka ciepła właściwego

Jego jednostką jest $1 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$.

Zwróćmy uwagę, że przyrost temperatury może być dodatni lub ujemny. Podczas stygnięcia o 1 stopień ciało oddaje dokładnie tyle samo ciepła, ile potrzeba do ogrzania go o 1 stopień. Wartości ciepła właściwego dla wybranych substancji przedstawiono w tabeli 3. Zauważmy na przykładzie wody, że ciepło właściwe zależy nie tylko od składu chemicznego, lecz także od stanu skupienia.

Tabela 3. Ciepło właściwe wybranych substancji w $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$.

Ciała stałe		Ciecze	
lód	2100	woda	4190
aluminium	920	benzyna	2100
cynk	389	etanol	2380
mosiądz	377	gliceryna	2386
piasek	800	nafta	2100
styropian	1200	olej lniany	1840
złoto	129	rtęć	139
żelazo	452		

Przykład 1.

Bryle żelaza o masie 250 g dostarczono 6 kJ ciepła. O ile wzrosła temperatura tej bryły?

Rozwiązanie

Dane:

$$m = 0,25 \text{ kg}$$

$$Q = 6000 \text{ J}$$

$$c = 452 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Szukane:

$$\Delta T = ?$$

Przekształcamy wzór $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$ tak, aby obliczyć przyrost temperatury.

$$\Delta T = \frac{Q}{c \cdot m}$$

$$\Delta T = \frac{6000 \text{ J}}{452 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 0,25 \text{ kg}} = 53 \text{ K}$$

Odpowiedź: Temperatura bryły żelaza wzrosła o 53 kelwiny.

**Przykład 2.**

Ile wody o temperaturze początkowej 20°C można podgrzać do wrzenia, dostarczając 50 kJ ciepła?

Rozwiązanie

Dane:

$\Delta T = 100^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C} = 80^{\circ}\text{C} = 80\text{ K}$ (różnica temperatur w skali Celsjusza jest równa różnicy temperatur w skali Kelwina)

$$Q = 50\,000\text{ J}$$

$$c = 4190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Szukane:

$$m = ?$$

Tym razem przekształcamy wzór na ciepło lub ciepło właściwe tak, by obliczyć masę.

$$m = \frac{Q}{c \cdot \Delta T}$$

$$m = \frac{50\,000\text{ J}}{4190 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot 80\text{ K}} = 0,149\text{ kg}$$

Odpowiedź: Dostarczając 50 kJ ciepła można doprowadzić do wrzenia 149 g wody o temperaturze początkowej 20°C .

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

- Wykaż, do czego potrzeba więcej energii: do podgrzania 400 g aluminium o 50°C czy do ogrzania 500 g żelaza o 100°C . Obliczenia zapisz w zeszycie.
- Cylinder z mosiądzu ostygł o 60°C , oddając $3,2\text{ kJ}$ energii. Oblicz masę tego cylindra.
- O ile stopni można podgrzać 50 g złota, dostarczając mu tyle ciepła, ile potrzebuje 120 g cynku, aby jego temperatura wzrosła o 25°C ?
- Prostopadłościan z metalu A ma masę $2,5\text{ kg}$. Prostopadłościan z metalu B ma masę 4 kg . Aby ogrzać prostopadłościan z metalu A o 80°C , potrzeba tyle samo ciepła, ile jest konieczne, by prostopadłościan z metalu B ogrzać o 90°C . Który z metali – A czy B – ma większe ciepło właściwe i ile razy?

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Ilość ciepła potrzebna do ogrzania ciała jest proporcjonalna do masy tego ciała i oczekiwanego przyrostu temperatury oraz zależy od rodzaju substancji. s. 61
- Współczynnik charakteryzujący rodzaj substancji nosi nazwę ciepła właściwego. Jest to ilość ciepła, jaką wymienia z otoczeniem 1 kg danej substancji, gdy jego temperatura zmienia się o 1 K . s. 62
- Jednostką ciepła właściwego jest $1 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$. s. 62



2.7. Przemiany fazowe

NA TEJ LEKCJI

- pogłębisz swoje wiadomości na temat zmian stanu skupienia,
- dowiesz się, co to jest ciepło topnienia i ciepło parowania,
- poznasz dokładniej różnice pomiędzy ciałami krystalicznymi i bezpostaciowymi.

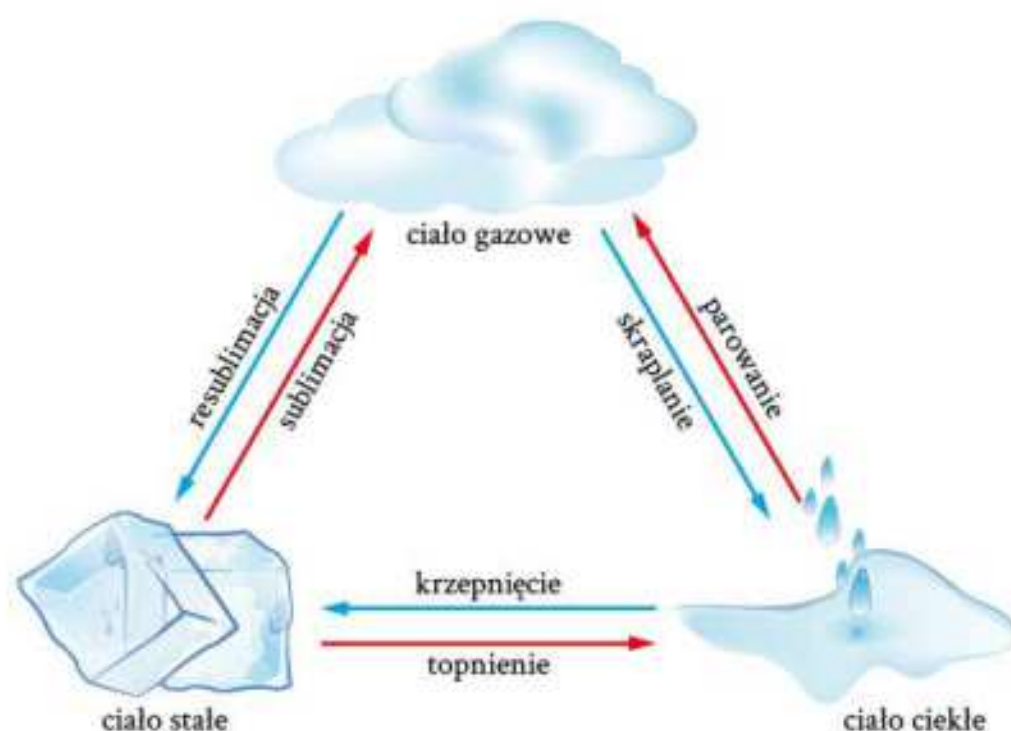
Ogólne wiadomości o przemianach fazowych

Pojęcie fazy danej substancji jest w fizyce bardzo szerokie i może dotyczyć różnych właściwości materii. My zajmiemy się najbardziej znanym przypadkiem faz – stanami skupienia oraz ich przemianami, czyli zmianami stanu skupienia. W tym ujęciu **fazą** (stanem skupienia) będziemy nazywać obszar zajęty przez daną substancję, która jest jednorodna pod względem właściwości fizycznych, to znaczy która w każdym punkcie ma takie same właściwości. Wyróżniamy trzy stany skupienia.

faza (stan skupienia)
substancji

- 1. Stały.** Zarówno kształt ciała, jak i jego objętość są ściśle określone (w danej temperaturze). Cząsteczki ciała stałego znajdują się blisko siebie („stykają się”) i silnie ze sobą oddziałują. Wykonują ruch drgający wokół ustalonych położeń równowagi – możliwość ich przemieszczania się jest bardzo mocno ograniczona. Gęstość ciał stałych jest duża.
- 2. Ciekły.** Ciała ciekłe zachowują swoją objętość (zależną od temperatury), natomiast przyjmują kształt naczynia. Jeśli nie wypełniają całego naczynia, od góry ogranicza je pozioma powierzchnia swobodna. W warunkach nieważkości przybierają kształt kuli. Cząsteczki cieczy również się stykają, ale oddziaływania między nimi są znacznie słabsze – podzielenie cieczy na mniejsze porcje nie wymaga wielkiego wysiłku. Cząsteczki cieczy przemieszczają się względem siebie. Gęstość cieczy jest porównywalna z gęstością ciała stałego.
- 3. Gazowy.** Gaz nie ma określonego kształtu ani objętości – rozprzestrzenia się zawsze w całej dostępnej objętości. Cząsteczki gazu znajdują się na ogół daleko od siebie, przemieszczają się z łatwością i oddziałują ze sobą jedynie podczas zderzeń. Gęstość gazu w warunkach normalnych jest znacznie mniejsza od gęstości ciał stałych i cieczy.

Pod wpływem zmian ciśnienia i temperatury ciała mogą zmieniać stan skupienia, co przedstawiono na rysunku 22.



Rys. 22. Zmiany stanu skupienia ciał.

Ciała krystaliczne, co zaraz omówimy bardziej szczegółowo, mają ściśle określoną **temperaturę topnienia**, która jest równa **temperaturze krzepnięcia**. Temperatura ta w niewielkim stopniu zależy od ciśnienia zewnętrznego. Na przykład lód bez dostarczania ciepła topi się w kontakcie z łyżwą, która wywiera na niego bardzo duże ciśnienie. Łyżwiarz ślizga się bez trudu po warstewce wody. Gdy łyżwa przemieści się dalej, woda z powrotem zamarza, nie pozostawiając śladu.

Parowanie i skraplanie zachodzi w każdej temperaturze, w której możliwy jest kontakt cieczy i pary, przy czym intensywność parowania wzrasta wraz z temperaturą. Po osiągnięciu pewnej temperatury ciecz zaczyna parować w całej objętości. Zjawisko to nazywamy **wrzeniem**. Temperatura wrzenia cieczy bardzo mocno zależy od ciśnienia. Na przykład, gdy ciśnienie zewnętrzne maleje do zera, temperatura wrzenia wody maleje nieomal do 0°C . Dlatego na Marsie nie mogą istnieć zbiorniki wodne – ciśnienie atmosferyczne jest tam ponad 100 razy mniejsze niż na Ziemi i woda natychmiast by z nich wyparowała lub zamarzła. Niektóre substancje lotne, np. dwutlenek węgla, propan i butan, można łatwo skroplić bez ich oziębiania – wystarczy odpowiednio zwiększyć ciśnienie. Skroplony w temperaturze pokojowej propan-butan wykorzystujemy w butlach turystycznych i w samochodach napędzanych gazem. Podając temperaturę wrzenia danej substancji, zawsze należy zaznaczyć, do jakiego ciśnienia ją odnosimy. Gdy tego nie zrobimy, przyjmujemy domyślnie, że chodzi o ciśnienie atmosferyczne.

temperatura
topnienia
i krzepnięcia ciał
krystalicznych

wrzenie

Doświadczenie 1.

Pomoce: szczelna strzykawka, woda (najlepiej gorąca).

Napełnij strzykawkę do połowy wodą tak, aby nie było w niej powietrza. Zatkaj otwór strzykawki palcem i pociągnij za tłok.

Obserwacja: w wodzie pojawiają się bąbelki pary wodnej. Pociągając za tłok, nad powierzchnią wody wytworzyłeś/wytworzyłaś próżnię i woda zaczęła wrzeć.



Sublimacja i resublimacja również zachodzą w dowolnych temperaturach, w których możliwe jest współistnienie fazy stałej i lotnej, natomiast warunki (temperatura i ciśnienie) nie pozwalają na istnienie fazy ciekłej. W zimie resublimacja pary wodnej objawia się w sposób widowiskowy w postaci osiadania **szadzi**. Gdy temperatura wzrasta lub wilgotność powietrza maleje, to szadź sublimuje – zamienia się z powrotem w parę wodną z pominięciem fazy ciekłej. Sublimacja dotyczy wielu substancji stałych. Na przykład czujemy zapach pachnącego mydła dlatego, że śladowe jego ilości wysublimowały i drogą lotną dotarły do naszego nosa.

Dodajmy, że wszystkie pierwiastki i większość prostych substancji chemicznych może występować we wszystkich stanach skupienia. Substancje o skomplikowanej strukturze, a zwłaszcza substancje organiczne (np. drewno), pod wpływem wzrostu temperatury nie topią się ani nie parują, tylko rozkładają się na prostsze związki chemiczne.

Tabela 4. Temperatuty topnienia i wrzenia (pod ciśnieniem atmosferycznym 1013,25 hPa) dla wybranych substancji.

Nazwa substancji	Temperatura topnienia, °C	Temperatura wrzenia, °C
wodór	-259	-253
azot	-210	-196
tlen	-219	-183
propan	-188	-42
butan	-138	-0,5
etanol	-114	78
chlor	-101	-34
rtęć	-39	357
woda	0	100
olów	327	1755
złoto	1064	2856
żelazo	1538	2861
wolfram	3420	5660
diamant	3540	4347



Chcesz wiedzieć więcej?

Jako czwarty stan skupienia wymienia się często plazmę. Jest to gaz o tak wysokiej temperaturze, że na skutek zderzeń pomiędzy atomami dochodzi do odrywania elektronów od jąder. Proces ten nazywamy jonizacją. Proces odwrotny – łączenie się elektronów z atomami – to rekombinacja. Rekombinacji towarzyszy emisja światła. Plazma nie składa się więc z atomów elektrycznie obojętnych, ale z jonów dodatnich i swobodnych elektronów. Ponieważ oba te rodzaje cząstek są nośnikami ładunków elektrycznych, plazma jest przewodnikiem prądu elektrycznego.

Z plazmy zbudowane są wszystkie świecące gwiazdy, w tym Słońce. W warunkach ziemskich plazma występuje m.in. w łukach elektrycznych, np. podczas wylądowań atmosferycznych.



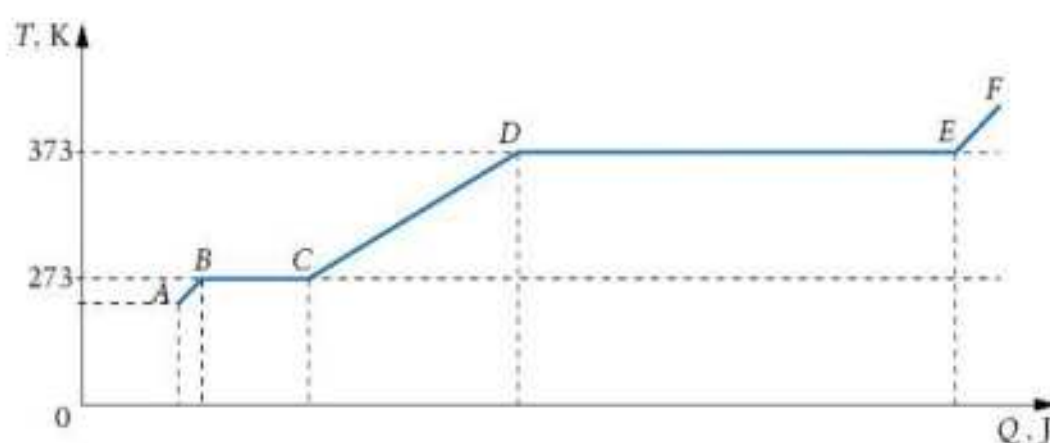
Energia a zmiany stanu skupienia ciał krystalicznych

Zajmiemy się teraz energetycznym aspektem przemian fazowych. Rozważania dotyczące topnienia i krzepnięcia odniesiemy na początku do **ciał krystalicznych**, czyli takich, których atomy układają się w regularne struktury. Do ciał krystalicznych zaliczamy m.in. wszystkie pierwiastki oraz wiele mineralów i związków nieorganicznych.

Doświadczenie 2.

Pomoce: lód wyjęty z zamrażarki i potłuczony w drobne kostki, termometr o zakresie co najmniej od -20°C do ponad 100°C , naczynie, palnik.

Lód w naczyniu stawiamy na palniku. W regularnych odstępach czasu odczytujemy temperaturę zawartości naczynia. Wyniki notujemy w zeszycie i sporządzamy wykres zależności temperatury od czasu.



Rys. 23. Zmiany temperatury lodu, wody i pary wodnej w miarę dostarczania kolejnych porcji ciepła.

Rysunek 23. przedstawia modelowy wykres zależności temperatury wody w różnych stanach skupienia od ilości równomiernie dostarczanego ciepła. Nie jest on tożsamy z wykresem zależności temperatury od czasu, o którym była mowa w doświadczeniu. W miarę zbliżania się do temperatury wrzenia coraz większa ilość energii będzie uchodzić z wody wraz z parą wodną, dlatego wykres przed punktem *D* będzie się zakrzywiać. Niemniej wykres uzyskany w wyniku doświadczenia powinien być podobny do przedstawionego na rysunku.

Przeanalizujmy krok po kroku, co się dzieje w trakcie tego doświadczenia.

Odcinek *AB* przedstawia ogrzewanie lodu. Jego temperatura początkowa była niższa od 0°C . Ciepło jest dostarczane w stałym tempie i zostaje zużyte na przyrost energii kinetycznej ruchu drgającego cząsteczek lodu w sieci krystalicznej. Przyrost temperatury jest wprost proporcjonalny do ilości dostarczonego ciepła, które można wyrazić wzorem:

$$Q_1 = c_L \cdot m \cdot \Delta T,$$

gdzie: Q_1 oznacza ciepło dostarczone podczas całego procesu podgrzewania lodu, c_L – ciepło właściwe lodu, m – masę lodu, a ΔT – przyrost temperatury lodu.



W temperaturze 0°C (273 K) lód zaczyna się topić. W miarę upływu czasu mieszanina będzie zawierać coraz mniej lodu i coraz więcej wody. Jeśli podgrzewanie będzie zachodzić powoli, a zawartość naczynia będziemy mieszać, aby zapewnić stan równowagi, stwierdzimy, że temperatura mieszaniny się nie zmienia. Będzie tak do momentu, aż stopi się ostatni kawałek lodu.

Stalność temperatury oznacza, że energia kinetyczna cząsteczek się nie zmienia. Na co wobec tego jest zużywane dostarczane ciepło? Na niszczenie struktury krystalicznej lodu. Cząsteczki H_2O wyswabdzają się z tej struktury, zwiększając swoją energię potencjalną względem sąsiednich cząsteczek. Ciepło dostarczone do mieszaniny na odcinku BC można wyrazić wzorem:

$$Q_2 = L \cdot m,$$

gdzie L to pewna stała materiałowa (w tym przypadku charakteryzująca lód) o nazwie ciepło topnienia.

ciepło topnienia

Ciepło topnienia to ilość energii, jaką wymienia z otoczeniem 1 kilogram danej substancji podczas topnienia lub krzepnięcia bez zmiany ciśnienia i temperatury.

Jednostką ciepła topnienia jest $1 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$.

W punkcie C wykresu mamy więc wodę o temperaturze 0°C . Dostarczanie kolejnych porcji ciepła będzie powodować proporcjonalny wzrost temperatury, zgodnie ze znanym już równaniem:

$$Q_3 = c_w \cdot m \cdot \Delta T,$$

gdzie Q_3 to ilość ciepła dostarczonego podczas etapu CD , a c_w to ciepło właściwe wody. Ciepło Q_3 zostaje zużyte na wzrost energii kinetycznej poruszających się cząsteczek cieczy.

W miarę wzrostu temperatury rośnie intensywność parowania wody. W końcu po osiągnięciu temperatury około 100°C (to zależy od ciśnienia zewnętrznego) woda zaczyna wrzeć. Stwierdzamy, że w miarę upływu czasu wody w naczyniu ubywa, natomiast jej temperatura nie ulega zmianie. Dostarczane ciepło jest ponownie zużywane na wzrost energii potencjalnej cząsteczek wody, niezbędnej do całkowitego wyzwolenia się z obszaru cieczy. Ciepło dostarczone na odcinku DE wyrażamy wzorem:

$$Q_4 = R \cdot m,$$

gdzie R to parametr charakteryzujący daną ciecz, zwany ciepłem parowania.

ciepło parowania

Ciepło parowania to ilość energii, jaką wymienia z otoczeniem 1 kilogram danej substancji podczas parowania lub skraplania bez zmiany ciśnienia i temperatury.

Jednostką ciepła parowania jest $1 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$.

$$R = \frac{Q}{m}$$

Jeśli będziemy nadal podgrzewać powstałą parę wodną, to jej temperatura będzie rosnąć, a ciepło dostarczane na odcinku EF będzie można zapisać w znany już sposób:

$$Q_5 = c_p \cdot m \cdot \Delta T,$$

gdzie c_p to ciepło właściwe pary wodnej.



Gdybyśmy teraz zaczęli oziębiać parę, to jej temperatura najpierw by spadła (wydzielona energia byłaby równa energii potrzebnej na jej podgrzanie), następnie ta para by się skropliła (wydzielając tyle energii, ile pobrała podczas parowania), później zmalałaby temperatura wody, a potem woda by skrzepla, a powstały lód ostygł. Układ wróciłby do stanu początkowego po tej samej łamanej na wykresie, tylko w przeciwną stronę, wydzielając dokładnie tyle energii, ile pochłonął podczas doświadczenia.

Tabela 5. Ciepło topnienia i parowania wybranych substancji.

Nazwa substancji	Ciepło topnienia, $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	Ciepło parowania, $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
woda/lód	335	2 260
alkohol etylowy	105	850
tlen	14	210
aluminium	400	10 900
olów	25	860
rtęć	12	300
żelazo	270	6 200

Przykład

Oblicz, ile ciepła potrzeba, aby 400 g lodu o temperaturze -20°C zmienić w parę wodną o temperaturze 100°C .

Rozwiązanie

Proces zmiany lodu w parę będzie się składał z 4 etapów: podgrzania lodu, stopienia lodu, podgrzania wody powstałej z lodu i odparowania tej wody.

Podgrzanie lodu do temperatury topnienia:

$$Q_1 = c_l m \Delta T = 2,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 0,4 \text{ kg} \cdot 20 \text{ K} = 16,8 \text{ kJ}$$

Topnienie lodu:

$$Q_2 = L \cdot m = 335 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 0,4 \text{ kg} = 134 \text{ kJ}$$

Podgrzanie wody do temperatury wrzenia:

$$Q_3 = c_w m \Delta T = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 0,4 \text{ kg} \cdot 100 \text{ K} = 167,6 \text{ kJ}$$

Odparowanie wody:

$$Q_4 = R \cdot m = 2260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 0,4 \text{ kg} = 904 \text{ kJ}$$

Łączna ilość zużytego ciepła:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 1222,4 \text{ kJ}$$

Odpowiedź: Aby 400 g lodu o temperaturze -20°C zmienić w parę wodną o temperaturze 100°C , potrzeba 1222 kJ ciepła.

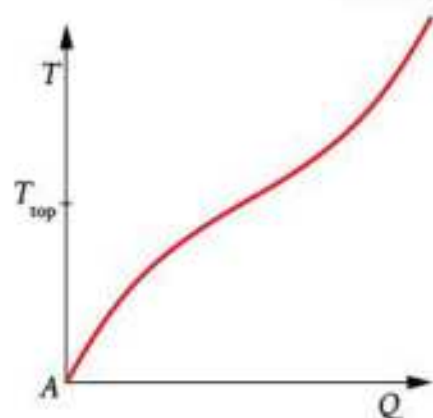


Topnienie i krzepnięcie ciał amorficznych (bezpostaciowych)

Oprócz substancji krystalicznych znamy również takie, w których atomy nie tworzą regularnych struktur. Zaliczamy do nich różne substancje szkliste, wiele tworzyw sztucznych o długich łańcuchach (polimerów), wosk, żywicę, smołę itd. Gdy ochładzamy fazę płynną takiej substancji, nie krystalizuje się ona, tylko stopniowo

zastyga (twardnieje), a jej cząsteczki pozostają ułożone chaotycznie tak jak w cieczy. Podczas ogrzewania substancje te nie topią się w ściśle określonej temperaturze, tylko mięknią w pewnym zakresie temperatur, a ich cząsteczki stopniowo zyskują na ruchliwości.

Proces topnienia i krzepnięcia **ciał amorficznych (bezpostaciowych)** przedstawiono na wykresie 24. Fragment o mniejszym nachyleniu odpowiada przedziałowi temperatur, w którym następuje mięknięcie lub twardnienie. Podczas tego procesu zmienia się zarówno energia kinetyczna, jak i energia potencjalna cząsteczek ciała.



Rys. 24. Proces topnienia ciał amorficznych.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wskaż, które z substancji wymienionych w tabeli 4. występują w stanie ciekłym pod ciśnieniem atmosferycznym w temperaturze -100°C .
2. Oblicz, ile potrzeba energii, aby całkowicie stopić kawałek ołowiu o masie 150 g i temperaturze początkowej 25°C . Ciepło właściwe ołowiu wynosi $130 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$.
3. Wrzącej pod ciśnieniem atmosferycznym wodzie o objętości 2 l dostarczono 1 MJ ciepła. Oblicz, ile procent wody uległo dzięki temu odparowaniu.
4. Wyjaśnij, dlaczego odcinek CD na rys. 23. jest nachylony do osi poziomej pod większym kątem niż odcinki AB i EF.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- s. 64 • Faza substancji to obszar, w którym substancja ma jednakowe właściwości fizyczne. Przykładem fazy jest stan skupienia.
- s. 65 • Ciała krystaliczne topią się i krzepną w ściśle określonych temperaturach. Ciała bezpostaciowe mięknią i twardnieją w pewnych zakresach temperatur.
- s. 65 • Temperatura wrzenia cieczy zależy od ciśnienia zewnętrznego.
- s. 68 • Ciepło topnienia to ilość energii, jaką wymienia z otoczeniem 1 kg danej substancji podczas topnienia lub krzepnięcia bez zmiany ciśnienia i temperatury. Jednostką ciepła topnienia jest $\frac{\text{J}}{\text{kg}}$.
- s. 68 • Ciepło parowania to ilość energii, jaką wymienia z otoczeniem 1 kg danej substancji podczas parowania lub skraplania bez zmiany ciśnienia i temperatury. Jednostką ciepła parowania jest $\frac{\text{J}}{\text{kg}}$.



2.8. Bilans cieplny

NA TEJ LEKCJI

- dowiesz się, co to jest bilans cieplny,
- będziesz rozwiązywać zadania z wykorzystaniem zasady zachowania energii (posługując się bilansem cieplnym).

W praktyce często mamy do czynienia z kontaktem ciał o różnych temperaturach. Jak już wiesz, w takich przypadkach możliwy jest samorzutny przekaz energii w postaci ciepła z ciała o wyższej temperaturze do ciała o niższej temperaturze, trwający aż do momentu wyrównania się temperatur. Jeśli uwzględnimy wszystkie ciała biorące udział w tym procesie, to możemy je potraktować jako **układ izolowany** – niemający kontaktu z żadnymi innymi ciałami. Układ izolowany nie pobiera ani nie oddaje ciepła na zewnątrz i nie wykonuje pracy nad obiektami zewnętrznymi. Energia wewnętrzna układu izolowanego nie ulega zmianie.

układ izolowany

Jeśli tak, to energia oddawana przez jedne elementy układu musi być dokładnie równa energii pobieranej przez pozostałe elementy. Zysk energetyczny jednych elementów musi być równy stracie energii pozostałych.

$$Q_{\text{pobrane}} = Q_{\text{oddane}}$$

równanie bilansu cieplnego

Zapisane powyżej równanie nosi nazwę **równania bilansu cieplnego**. Umożliwia ono, w zależności od typu zadania, wyznaczenie temperatury końcowej mieszaniny, masy jakiegoś składnika albo też jego ciepła właściwego. Równanie bilansu ma zawsze taką samą postać ogólną, natomiast w konkretnych przypadkach trzeba właściwie uwzględnić poszczególne składniki i prawidłowo przekształcić całe równanie. Prześledźmy to na przykładach.

Przykład 1.

Do 200 g wody o temperaturze 15°C, znajdującej się w izolowanym naczyniu, wrzucono bryłę mosiądzu o masie 50 g i temperaturze 80°C. Oblicz temperaturę końcową wody i mosiądzu.

Rozwiązanie

Dane:

$$m_w = 0,2 \text{ kg}$$

$$T_w = 15^\circ\text{C}$$

$$c_w = 4190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$m_m = 0,05 \text{ kg}$$

$$T_m = 80^\circ\text{C}$$

$$c_m = 377 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Szukane:

$$T_k = ?$$

Każde zadanie tego typu rozpoczynamy od napisania równania bilansu cieplnego.



$$Q_{\text{pobrane}} = Q_{\text{oddane}}$$

Ciałem pobierającym ciepło jest woda, która ogrzewa się od temperatury 15°C do nieznanej temperatury końcowej T_k . Ciałem oddającym ciepło jest mosiądz, który ochładza się od temperatury 80°C do tej samej, nieznanej temperatury końcowej. Zapisujemy wzory na ciepło pobrane i ciepło oddane:

$$Q_{\text{pobrane}} = c_w \cdot m_w \cdot \Delta T_w = c_w \cdot m_w \cdot (T_k - T_w)$$

$$Q_{\text{oddane}} = c_m \cdot m_m \cdot \Delta T_m = c_m \cdot m_m \cdot (T_m - T_k)$$

Zwróćmy uwagę, że z żadnego z tych równań nie da się samodzielnie obliczyć temperatury końcowej, gdyż nie znamy wartości ciepła, które przepłynęło z mosiądzu do wody. Zauważmy również, że zapisując wzory na przyrost temperatury, zawsze od temperatury wyższej odejmujemy temperaturę niższą, tak aby oba obliczone ciepła miały wartość dodatnią. Znajdą się one bowiem po przeciwnych stronach znaku równości. Równanie bilansu przyjmuje więc postać:

$$c_w \cdot m_w \cdot (T_k - T_w) = c_m \cdot m_m \cdot (T_m - T_k)$$

Poszukiwana temperatura końcowa znajduje się po obu stronach znaku równości, w dodatku wewnątrz nawiasów. Po wykonaniu mnożenia otrzymujemy:

$$c_w m_w T_k - c_w m_w T_w = c_m m_m T_m - c_m m_m T_k$$

Wyrazy zawierające temperaturę końcową przenosimy na jedną stronę równania, a wszystkie pozostałe na drugą:

$$c_w m_w T_k + c_m m_m T_k = c_m m_m T_m + c_w m_w T_w$$

Niewiadoma T_k występuje w dwóch miejscach. W tej sytuacji najlepiej wyciągnąć ją przed nawias:

$$T_k (c_w m_w + c_m m_m) = c_m m_m T_m + c_w m_w T_w$$

Pozostaje już tylko podzielić równanie obustronnie przez nawias:

$$T_k = \frac{c_m m_m T_m + c_w m_w T_w}{c_w m_w + c_m m_m}$$

$$T_k = 16,43^{\circ}\text{C}$$

Odpowiedź: temperatura końcowa wody i mosiądzu wynosi $16,43^{\circ}\text{C}$.

Jak widać, temperatura wody wzrosła niewiele, o niespełna półtora stopnia, mimo że bryła mosiądzu była gorąca. Otrzymany wynik nie dziwi jednak, jeśli porównamy ciepło właściwe wody i mosiądzu. Do ogrzania wody potrzeba kilkanaście razy więcej ciepła niż do ogrzania identycznej masy mosiądzu o tyle samo stopni.

Przykład 2.

Do 300 g wody o temperaturze 20°C wrzucono pewną ilość żelaza o temperaturze 90°C . Temperatura końcowa ustaliła się na poziomie 24°C . Oblicz masę wrzuconego żelaza.

Rozwiązanie

Dane:

$$m_w = 0,3 \text{ kg}$$

$$T_w = 20^{\circ}\text{C}$$

$$c_w = 4190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$



$$T_z = 90^\circ\text{C}$$

$$c_z = 452 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$T_k = 24^\circ\text{C}$$

Szukane:

$$m_z = ?$$

Rozwiązanie wszystkich zadań z wykorzystaniem bilansu cieplnego rozpoczynamy tak samo. Ponieważ brak jest wzmianki o innych ciałach uczestniczących w procesie, traktujemy układ jako izolowany.

$$Q_{\text{pobrane}} = Q_{\text{oddane}}$$

$$Q_{\text{pobrane}} = c_w \cdot m_w \cdot \Delta T_w = c_w \cdot m_w \cdot (T_k - T_w)$$

$$Q_{\text{oddane}} = c_z \cdot m_z \cdot \Delta T_z = c_z \cdot m_z \cdot (T_z - T_k)$$

$$c_w \cdot m_w \cdot (T_k - T_w) = c_z \cdot m_z \cdot (T_z - T_k)$$

To zadanie jest znacznie łatwiejsze do rozwiązania, ponieważ niewiadoma m_z występuje tylko w jednym miejscu i wystarczy wykonać jedno przekształcenie.

$$m_z = \frac{c_w \cdot m_w \cdot (T_k - T_w)}{c_z \cdot (T_z - T_k)}$$

$$m_z = 0,169 \text{ kg}$$

Odpowiedź: Do wody wrzucono 169 g żelaza.

W analizowanych procesach mogą zachodzić przemiany fazowe, co ilustrują kolejne przykłady.

Przykład 3.

Do 500 g wody o temperaturze 20°C wrzucono 50 g lodu o temperaturze -10°C . Oblicz temperaturę wody po stopieniu się lodu.

Rozwiązanie

Dane:

$$m_w = 0,5 \text{ kg}$$

$$T_w = 20^\circ\text{C}$$

$$c_w = 4190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$m_L = 0,05 \text{ kg}$$

$$T_L = -10^\circ\text{C}$$

$$c_L = 2100 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$L = 335\,000 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

Szukane:

$$T_k = ?$$

$$Q_{\text{pobrane}} = Q_{\text{oddane}}$$

Traktujemy układ woda – lód jako izolowany. Ciałem oddającym ciepło będzie 500 g wody o temperaturze początkowej 20°C :

$$Q_{\text{oddane}} = c_w \cdot m_w \cdot \Delta T_w = c_w \cdot m_w \cdot (T_w - T_k)$$



Ciałem, które będzie pobierało ciepło, jest lód, który najpierw musi się podgrzać do temperatury topnienia, następnie stopić, a potem woda powstała z lodu musi się ogrzać do poszukiwanej temperatury końcowej. Ciepło pobrane będzie się więc składało z trzech składników:

$$Q_{\text{pobrane}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = c_L m_L (0^\circ - T_L) + L m_L + c_w m_L (T_k - 0^\circ)$$

$$c_L m_L (0^\circ - T_L) + L m_L + c_w m_L (T_k - 0^\circ) = c_w m_w (T_w - T_k)$$

Po wymnożeniu nawiasów i pominięciu wyrazów zawierających 0°C otrzymujemy:

$$-c_L m_L T_L + L m_L + c_w m_L T_k = c_w m_w T_w - c_w m_w T_k$$

Ponownie przegrupowujemy wyrazy i wyłączamy T_k przed nawias.

$$T_k (c_w m_L + c_w m_w) = c_w m_w T_w + c_L m_L T_L - L m_L$$

$$T_k = \frac{c_w m_w T_w + c_L m_L T_L - L m_L}{c_w m_L + c_w m_w}$$

$$T_k = 10,5^\circ\text{C}$$

Odpowiedź: Wrzucenie kostek lodu spowoduje ochłodzenie wody do $10,5^\circ\text{C}$.

Przykład 4.

Oblicz, ile lodu o temperaturze -20°C trzeba wrzucić do 500 g wody o temperaturze 30°C , aby obniżyć jej temperaturę do 20°C .

Rozwiązanie

Dane:

$$m_w = 0,5 \text{ kg}$$

$$T_w = 30^\circ\text{C}$$

$$c_w = 4190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$T_L = -20^\circ\text{C}$$

$$c_L = 2100 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$L = 335\,000 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$T_k = 20^\circ\text{C}$$

Szukane:

$$m_L = ?$$

Równanie bilansu cieplnego przybiera identyczną postać, jak w poprzednim zadaniu. Jego rozwiązanie jest jednak łatwiejsze z uwagi na mniejszą liczbę koniecznych przekształceń.

$$Q_{\text{pobrane}} = Q_{\text{oddane}}$$

$$c_L m_L (0^\circ - T_L) + L m_L + c_w m_L (T_k - 0^\circ) = c_w m_w (T_w - T_k)$$

Na początku usuńmy wyrazy równe zero:

$$-c_L m_L T_L + L m_L + c_w m_L T_k = c_w m_w (T_w - T_k)$$

Teraz wystarczy wyciągnąć przed nawias masę lodu, a następnie podzielić obustronnie równanie przez utworzony nawias:

$$m_L (-c_L T_L + L + c_w T_k) = c_w m_w (T_w - T_k)$$

$$m_L = \frac{c_w m_w (T_w - T_k)}{-c_L T_L + L + c_w T_k}$$



$$m_L = 0,045 \text{ kg}$$

Odpowiedź: Do wody należy wrzucić 45 g lodu.

W wymianie ciepła może uczestniczyć więcej ciał, na przykład również naczynie. Przeanalizuj dokładnie poniższy przykład, gdyż będzie on podstawą wykonania doświadczenia na następnej lekcji.

Przykład 5.

Do aluminiowego naczynia o masie 90 g, zawierającego 200 g wody o temperaturze 22°C , wrzucono prostopadłościan wykonany z nieznanego metalu o masie 140 g i temperaturze 100°C . Temperatura końcowa układu ustaliła się na poziomie 28°C . Wyznacz ciepło właściwe tego metalu.

Rozwiązanie

Dane:

$$m_{Al} = 0,09 \text{ kg}$$

$$T_{Al} = T_w = 22^\circ\text{C}$$

$$c_{Al} = 920 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$m_w = 0,2 \text{ kg}$$

$$c_w = 4190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$T_m = 100^\circ\text{C}$$

$$m_m = 0,14 \text{ kg}$$

$$T_k = 28^\circ\text{C}$$

Szukane:

$$c_m = ?$$

Ponieważ aluminium jest przewodnikiem ciepła, naczynie aluminiowe zawsze będzie miało taką samą temperaturę, jak jego zawartość. Jak zwykle, zaczynamy od równania bilansu:

$$Q_{\text{pobrane}} = Q_{\text{oddane}}$$

Ciałem oddającym ciepło będzie bryła nieznanego metalu:

$$Q_{\text{oddane}} = c_m m_m \Delta T_m = c_m m_m (T_m - T_k)$$

Ciałami przyjmującymi ciepło są woda oraz naczynie aluminiowe:

$$Q_{\text{pobrane}} = c_w m_w (T_k - T_w) + c_{Al} m_{Al} (T_k - T_w) = (c_w m_w + c_{Al} m_{Al}) (T_k - T_w)$$

Równanie bilansu ma więc postać:

$$c_m m_m (T_m - T_k) = (c_w m_w + c_{Al} m_{Al}) (T_k - T_w)$$

Stąd otrzymujemy wzór na ciepło właściwe:

$$c_m = \frac{(c_w m_w + c_{Al} m_{Al}) (T_k - T_w)}{m_m (T_m - T_k)}$$

$$c_m = 548 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Odpowiedź: Ciepło właściwe nieznanego metalu wynosi $548 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$.

Zaprezentowane rozumowanie pełni kluczową funkcję w doświadczalnym wyznaczaniu ciepła właściwego.



ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Zmieszano ze sobą 1 kg wody o temperaturze 10°C i 0,5 kg etanolu o temperaturze 40°C . Oblicz temperaturę tej mieszaniny.
2. Zaproponuj i opisz metodę pomiaru ciepła właściwego nieznanej cieczy mieszającej się z wodą. Wyprowadź odpowiedni wzór.
3. Ile lodu o temperaturze -20°C należy wrzucić do 1 l wody o temperaturze $+20^{\circ}\text{C}$, aby cały lód się roztopił, a temperatura powstałej mieszaniny wynosiła 0°C ?
4. Do 600 g nafty o temperaturze 20°C wrzucono kawałek mosiądzu o masie 120 g, skutkiem czego temperatura nafty wzrosła o 2°C . Oblicz temperaturę początkową mosiądzu.

PODSUMOWANIE LEKCJI

s. 71

- Aby przeanalizować wymianę ciepła pomiędzy ciałami, wyodrębniamy je z otoczenia jako układ izolowany. W skład układu izolowanego muszą wchodzić wszystkie ciała uczestniczące w tym procesie.

s. 71

- Równanie bilansu cieplnego ma zawsze taką samą postać: *ciepło pobrane* = *ciepło oddane*.

s. 71

- Z równania bilansu można obliczyć temperatury początkowe, temperaturę końcową, masy ciał lub ich ciepła właściwe.

2.9. Wyznaczanie ciepła właściwego metalu

NA TEJ LEKCJI

- wyznaczysz doświadczalnie ciepło właściwe metalu,
- przećwiczysz posługiwanie się sprzętem laboratoryjnym i pracę w grupach.

doświadczalne
wyznaczanie ciepła
właściwego

Przystąpimy obecnie do doświadczalnego wyznaczenia ciepła właściwego nieznanej substancji. Do wykonania tego zadania pomocny będzie wzór wyprowadzony podczas rozwiązywania przykładu 5. (str. 75.). W doświadczeniu posłużymy się podstawowym przyrządem stosowanym w termodynamice – kalorymetrem.

W skład kalorymetru wchodzi dwa naczynia aluminiowe, z których jedno jest większe, a drugie mniejsze. Podczas pomiarów to mniejsze wstawiamy do większego, rozdzielając je drewnianą podkładką. Oba naczynia nie mają ze sobą kontaktu cieplnego – dzieli je drewno i powietrze. Dlatego w równaniu bilansu cieplnego nie uwzględniamy większego naczynia – pełni ono funkcję osłony termicznej dla naczynia mniejszego. Mniejsze naczynie posiada również przykrywkę z otworami na termometr i mieszadło. Masę przykrywki i mieszadła uwzględniamy jedynie



wtedy, jeśli będą w użyciu podczas wykonywania doświadczenia. Całość jest przykryta tekturową osłoną, aby zapobiec stratom ciepła (głównie wskutek konwekcji).

Analiza wspomnianego przykładu 5. dostarcza nam informacji, jakich danych będziemy potrzebować. Doświadczenie będzie polegało na włożeniu kawałka gorącego metalu do kalorymetru z zimną wodą i odczekaniu, aż temperatury się wyrównają. Następnie obliczymy ciepło właściwe metalu, posługując się bilansem cieplnym. Musimy więc zmierzyć masę metalu, masę wody i masę kalorymetru – potrzebna będzie waga. Do pomiaru temperatury początkowej i końcowej niezbędny będzie termometr. Konieczne będzie również źródło ciepła w postaci palnika spirytusowego, gazowego lub płyty grzejnej. Doświadczenie najlepiej wykonywać w małych grupach. Można wtedy podzielić się zadaniami i pomagać sobie w bardziej skomplikowanych czynnościach.

Doświadczenie

Pomoce naukowe: palnik i statyw lub inne źródło ciepła, naczynie, kalorymetr, waga, woda, bryłka badanego metalu, sznurek lub nitka.

Pierwszą czynnością jest zważenie wszystkich ciał uczestniczących w wymianie ciepła, a więc badanej bryłki metalu, wewnętrznej części kalorymetru oraz wody w kalorymetrze. Należy używać jak najmniejszej ilości wody, tak aby ledwo zakryła badany metal. Pamiętajmy, że woda ma duże ciepło właściwe. Użycie zbyt wielkiej ilości wody spowoduje, że przyrost jej temperatury w trakcie doświadczenia będzie mały i trudny do zmierzenia.

Kolejną czynnością jest ustalenie temperatury początkowej wody, a więc i kalorymetru. Dobrze, jeśli będzie zbliżona do temperatury otoczenia, co dodatkowo zmniejszy wymianę ciepła z otoczeniem.

Badany metal powinien mieć wysoką i łatwą do zmierzenia temperaturę początkową. Najłatwiej ją zapewnić, ogrzewając metal we wrzątku. Możemy arbitralnie przyjąć, że temperatura wrzenia wynosi 100°C lub zmierzyć ją dla pewności termometrem o odpowiednim zakresie. Najlepiej, jeśli w klasie będzie jedno naczynie z wrzącą wodą, dostępne dla wszystkich uczniów. Bryłę metalu przewiązujemy nitką lub cienkim sznurkiem. Drugi koniec sznurka przywiązujemy do ołówka. Wkładając bryłę do wrzątku, opieramy ołówek o krawędzie naczynia bez obawy, że koniec sznurka się utopi lub przypali w płomieniu palnika. Na wypadek odwiązania się nitki warto mieć przygotowany chwytak, którym będzie można wyjąć metal z gorącej wody.

Po włożeniu bryłki metalu do wrzątku woda oddaje mu część ciepła i przestaje wrzeć. Odczekujemy, aż woda zacznie wrzeć ponownie i szybkim ruchem przekładamy gorący metal do kalorymetru z wodą. Jeśli wykonamy tę czynność opieszale, część energii wewnętrznej metalu zdąży się rozproszyć w otoczeniu.



Rys. 25. Przyrządy do wykonania doświadczenia: palnik spirytusowy, kalorymetr, termometr, bryłka metalu na sznurku.



Następnie wkładamy termometr do kalorymetru i śledzimy temperaturę tak długo, aż przestanie rosnąć. Najwyższą zaobserwowaną temperaturę notujemy jako temperaturę końcową.

UWAGA: Należy zachować szczególną ostrożność w pobliżu naczynia z wrzątkiem. Najlepiej, jeśli będziecie podchodzić do niego pojedynczo, aby zminimalizować niebezpieczeństwo popchnięcia palnika oraz naczynia i poparzenia siebie i innych uczniów!

Wyniki pomiarów notujemy na przygotowanej wcześniej karcie pomiarowej, zawierającej nazwiska członków grupy i tabelkę wykonaną według wzoru:

Masa metalu, kg	Temperatura początkowa metalu, °C	Masa kalorymetru, kg	Masa wody, kg	Temperatura początkowa wody i kalorymetru, °C	Temperatura końcowa, °C	Ciepło właściwe metalu, $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

Ciepło właściwe metalu obliczamy na podstawie wzoru, który wyprowadziliśmy w przykładzie 5. (str. 75.):

$$c_m = \frac{(c_w m_w + c_{Al} m_{Al})(T_k - T_w)}{m_m (T_m - T_k)},$$

traktując ciepło właściwe wody i aluminium jako znane. Jeśli czas na to pozwala, wykonujemy więcej pomiarów, a ich wyniki notujemy w dodatkowych wierszach tabelki. W takim wypadku obliczamy średnią z uzyskanych wyników końcowych. Pomiar ciepła właściwego metalu jest pomiarem złożonym. Na jego niepewność składają się niepewności pomiarów wszystkich mas i temperatur. Ze względu na złożoność wzoru, porzeczamy na porównaniu otrzymanego wyniku z wartością ciepła właściwego badanego metalu podaną przez nauczyciela lub odnanioną w tablicach fizycznych, np. na str. 62. lub str. 141. Na tej podstawie obliczamy błąd względny pomiaru według wzoru:

$$b_w = \frac{|c_m - c_{tab}|}{c_{tab}} \cdot 100\%,$$

gdzie c_m to zmierzona przez nas wartość, a c_{tab} – wartość odnaniona w tablicach fizycznych.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

Trzy grupy uczniów, A, B i C, zmierzyły ciepło właściwe różnych metali i otrzymały następujące wyniki:

– Grupa A, badany metal: stal, wartość tablicowa ciepła właściwego: $460 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$;

m_m, kg	$T_w, ^\circ\text{C}$	m_k, kg	m_w, kg	$T_w, ^\circ\text{C}$	$T_k, ^\circ\text{C}$	$c_w, \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
0,212	100	0,18	0,039	22,9	31,7	



– Grupa B, badany metal: miedź, wartość tablicowa ciepła właściwego: $385 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$;

m_w, kg	$T_m, ^\circ\text{C}$	m_k, kg	m_w, kg	$T_w, ^\circ\text{C}$	$T_k, ^\circ\text{C}$	$c_m, \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
0,1463	100	0,14203	0,05617	27	33	

– Grupa C, badany metal: mosiądz, wartość tablicowa ciepła właściwego: $377 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$.

m_w, kg	$T_m, ^\circ\text{C}$	m_k, kg	m_w, kg	$T_w, ^\circ\text{C}$	$T_k, ^\circ\text{C}$	$c_m, \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
0,2626	100	0,19585	0,0546	23	30,7	

Dokonaj odpowiednich obliczeń w zeszycie i sprawdź, która grupa otrzymała wynik najbliższy wartości tablicowej, a która – najdalszy.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Ciepło właściwe ciała stałego lub cieczy można wyznaczyć doświadczalnie, posługując się bilansem cieplnym. Przedstawiona tutaj metoda pomiaru wymaga użycia: bryłki badanego metalu, wody, źródła ciepła (np. palnika), kalorymetru, wagi i termometru. Jako wartości dane przyjmujemy ciepło właściwe wody i ciepło właściwe metalu, z którego wykonano kalorymetr.

s. 76

2.10. Wartość energetyczna paliw i żywności

NA TEJ LEKCJI

- dowiesz się, co to jest ciepło spalania i wartość opałowa,
- będziesz rozwiązywać problemy praktyczne związane z kosztami ogrzewania,
- dowiesz się, co to jest wartość energetyczna żywności,
- będziesz stosować prawa fizyki do zagadnień związanych z dietetyką.

Wartość energetyczna paliw

Dowiedziałeś/dowiedziałas się już, że energia wewnętrzna ciała jest sumą energii kinetycznych atomów tego ciała oraz energii potencjalnych ich wzajemnych oddziaływań. Energia tych oddziaływań zależy od stanu skupienia materii oraz od jej budowy chemicznej. Zmiany stanu skupienia są związane z pobieraniem lub oddawaniem



energii. Podobnie jest w przypadku reakcji chemicznych. Istnieją reakcje chemiczne, które wymagają dostarczenia energii. W reakcjach, które przebiegają samoczynnie, energia się wydziela. W ich wyniku powstają substancje o niższej energii wiązań chemicznych.

Do najbardziej znanych reakcji chemicznych zaliczamy **reakcje spalania**. Jeśli dotyczą one węglowodorów, w ich wyniku powstaje głównie dwutlenek węgla i para wodna. Reakcje spalania są powszechnie stosowane do napędzania silników i ogrzewania budynków. Warto rozumieć energetyczny aspekt reakcji spalania, gdyż ma on wymiar ekonomiczny – pozwala optymalnie dobrać rodzaj paliwa do konkretnych zastosowań.

W fizyce i technice stosuje się dwie miary **wartości energetycznej paliw**: ciepło spalania i wartość opałową.

ciepło spalania

Ciepło spalania to całkowita ilość energii, jaka wydzieli się podczas spalania jednostki masy lub jednostki objętości określonej substancji.

Tak zdefiniowana wielkość fizyczna obejmuje też energię unoszoną przez spaliny i zakłada, że energię tę można w całości odzyskać, np. poprzez skroplenie pary wodnej powstałej w procesie spalania. W praktyce na ogół nie jest to możliwe – para wodna ulatuje przez komin lub rurę wydechową, a niesiona przez nią energia jest nie do odzyskania. Dlatego bardziej praktyczne znaczenie ma wartość opałowa.

wartość opałowa

Wartość opałowa oznacza ilość ciepła, która wydzieli się podczas całkowitego spalania jednostki masy lub jednostki objętości substancji bez uwzględnienia ciepła, jakie można uzyskać z kondensacji pary wodnej i ze spalin.

Jak się łatwo domyślić, wartość opałowa jest mniejsza od ciepła spalania. Analizując wartość energetyczną paliw, warto się upewnić, która z tych wielkości fizycznych jest podawana przez producenta lub dostawcę paliwa. Podstawową jednostką ciepła spalania i wartości opałowej jest dżul na kilogram. W praktyce używamy megadżuli na kilogram. W przypadku paliw płynnych i gazowych stosuje się również $\frac{\text{MJ}}{\text{l}}$ i $\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$.

Rys. 26. Przykładowa informacja producenta o parametrach pelletu – ekologicznego opałowego paliwa drzewnego.



wartości opałowe
wybranych paliw

Tabela 6. Wartość opałowa najbardziej rozpowszechnionych paliw. W przypadku paliw płynnych podano wartości dla 1 kilograma i 1 litra. Ostatnia kolumna dotyczy stanu gazowego w warunkach normalnych (temperatura pokojowa, ciśnienie atmosferyczne).

Paliwo	Wartość opałowa, $\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$	Wartość opałowa, $\frac{\text{MJ}}{\text{l}}$	Wartość opałowa, $\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$
węgiel kamienny	21 – 34	–	–
węgiel brunatny	7 – 21	–	–
olej opałowy	43,2	38,8	–
gaz ziemny	–	–	33
mieszanka LPG	46	25	107
drewno suche	18	–	–
pellet drzewny	18	–	–
alkohol etylowy	27	21,3	–
benzyna	42,8	30	–
wodór	120	–	10,8

Na podstawie jednostki można się domyślić, że wartość opałową obliczamy, dzieląc ciepło uzyskane w wyniku spalania paliwa odpowiednio przez jego masę $\left(W_o = \frac{Q}{m}\right)$ lub objętość $\left(W_o = \frac{Q}{V}\right)$. Znając cenę jednostkową paliwa, możemy łatwo obliczyć koszt uzyskania odpowiedniej ilości energii.

Przykład 1.

Cena 1 l oleju opałowego wynosi 3,30 zł. Oblicz koszt wytworzenia 1 gigadżula ciepła ze spalania oleju.

Rozwiązanie

Dane:

$$W_o = 38,8 \frac{\text{MJ}}{\text{l}}$$

$$Q = 1 \text{ GJ} = 1000 \text{ MJ}$$

$$c = 3,3 \frac{\text{zł}}{\text{l}}$$

Szukane:

$$k = ?$$

Obliczmy objętość oleju, którego spalanie wytworzy 1 GJ ciepła:

$$W_o = \frac{Q}{V} \Rightarrow V = \frac{Q}{W_o}$$

$$V = 25,8 \text{ l}$$

Koszt obliczamy, mnożąc cenę jednostkową przez ilość.

$$k = cV = 85,14 \text{ zł}$$

Odpowiedź: Koszt uzyskania 1 gigadżula energii cieplnej z oleju opałowego wynosi 85,14 zł.

**Przykład 2.**

Ogrzewanie szklarni w sezonie zimowym wymaga pieca o mocy 18 kW. Piec opalany jest węglem w cenie 990 zł za tonę. Oblicz koszt miesięcznego ogrzewania szklarni w sezonie zimowym. Wartość opałowa stosowanego węgla wynosi

$$28 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

Rozwiązanie

Dane:

$$P = 18 \text{ kW} = 18\,000 \text{ W}$$

$$c = 990 \frac{\text{zł}}{\text{t}} = 0,99 \frac{\text{zł}}{\text{kg}}$$

$$W_o = 28 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

$$t = 30 \text{ dni} = 720 \text{ h} = 2\,592\,000 \text{ s}$$

Szukane:

$$k = ?$$

Potrzebną ilość ciepła obliczymy z poznanego w klasie 1. związku między pracą a mocą (praca jest równoważna energii).

$$Q = Pt$$

$$Q = 4,6656 \cdot 10^{10} \text{ J} = 46656 \text{ MJ}$$

Niezbędną masę węgla obliczymy ze wzoru na wartość opałową.

$$W_o = \frac{Q}{m} \Rightarrow m = \frac{Q}{W_o}$$

$$m = 1666 \text{ kg}$$

$$k = c \cdot m = 1650 \text{ zł}$$

Odpowiedź: Miesięczny koszt ogrzewania szklarni zimą wynosi 1650 zł.

Wartość energetyczna żywności

Reakcje spalania zachodzą nie tylko w paleniskach kotłów i w silnikach, lecz także w żywych organizmach. Procesy metaboliczne przebiegają o wiele spokojniej i wieloetapowo, ale produkty końcowe są takie same: dwutlenek węgla i para wodna. Z zasady zachowania energii wynika, że jeśli jakiś cykl reakcji można przeprowadzić na wiele sposobów i prowadzą one do tego samego finału, to sumaryczna ilość energii wydzielonej podczas całego cyklu nie zależy od tego sposobu. Teoretycznie więc np. ilość energii wydzielonej podczas strawienia i wykorzystania w komórkach 1 g cukru powinna być taka sama, jak podczas spalania tego cukru w laboratoryjnej probówce.

Gdy mowa o pokarmach i żywych organizmach, w grę wchodzi jeszcze jeden czynnik – **przyswajalność**. Produkt niestrawiony w całości, lecz częściowo wydalony, nie będzie nam dostarczał 100% energii. Metoda obliczania wartości energetycznej konkretnego produktu polega więc na całkowitym spalaniu tego produktu w kalorymetrze i pomiarze jego ciepła spalania. Następnie ciepło to mnożone jest przez współczynnik przyswajalności tego produktu, wyrażony na ogół w procentach. Wynik mnożenia to właśnie wartość energetyczna produktu. Jest ona umieszczana, wraz z innymi informacjami o walorach odżywczych, na opakowaniach większości produktów spożywczych.

przyswajalność



Wartość energetyczna żywności jest to ilość energii w danym produkcie, jaką organizm może przyswoić w procesie trawienia.

Wartość energetyczną produktów podaje się tradycyjnie w kilodżulach na gram (lub 100 g) i w kilokaloriach na gram (lub na 100 g). Nazywana jest ona również często **wartością kaloryczną**. Wiesz już, że **kaloria** (skrót: cal) to stara jednostka ciepła pochodząca z czasów, gdy nie do końca rozumiano równoważność ciepła i pracy. Zdefiniowano ją jako ilość ciepła potrzebną do ogrzania 1 grama wody o 1 stopień. Obecnie wiemy, że ciepło właściwe wody wynosi $4,19 \frac{\text{J}}{\text{g}}$. Wobec tego $1 \text{ cal} = 4,19 \text{ J}$. 1 **kilokaloria**, czyli tysiąc kalorii, to ilość ciepła zdolna podnieść temperaturę 1 kg wody o 1 stopień. $1 \text{ kcal} = 4,19 \text{ kJ}$.

Wartości energetyczne podstawowych składników pożywienia oraz wybranych gotowych produktów przedstawiono w tabelach 7 i 8.

Rys. 27. Przykładowa informacja o wartości odżywczej na opakowaniu produktu.



Tabela 7. Wartość energetyczna podstawowych składników pożywienia.

Składnik pożywienia	$\frac{\text{kcal}}{\text{g}}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{g}}$
węglowodany	4	17
białko	4	17
tłuszcz	9	37
alkohol etylowy	7	29
kwasy organiczne	3	13
błonnik	2	8

Tabela 8. Wartość kaloryczna wybranych produktów (na 100 g).

Produkt	kcal	Produkt	kcal
banan	95	makaron czterojęczny	391
boczek wędzony	477	marchewka	27
bułka pszenna	273	masło Extra	735
cebula	30	mleko 2%	51
chleb zwykły	248	ogórek	13
jajko kurze	139	orzechy włoskie	645
jogurt naturalny 2%	60	ser topiony	298
kielbasa zwyczajna	209	ziemniaki	77



dzienne
zapotrzebowanie
energetyczne

wydatek
energetyczny
organizmu

Dzienne zapotrzebowanie energetyczne organizmu to ilość energii, którą należy dostarczyć każdego dnia organizmowi, aby pokryć jego zapotrzebowanie na podtrzymanie funkcji życiowych i aktywność fizyczną. Zależy ono od wieku, wzrostu, płci, masy ciała, indywidualnego tempa metabolizmu i poziomu aktywności fizycznej. Przyjmuje się, że średnie dzienne zapotrzebowanie energetyczne dla osób o umiarkowanej aktywności fizycznej wynosi 2000 kcal dla kobiet i 2500 kcal dla mężczyzn.

Okolo 25% energii dostarczonej wraz z pokarmem organizm jest w stanie wykorzystać na wykonanie pracy mechanicznej. Pozostałe 75% zużywane jest na utrzymywanie podstawowej przemiany materii, trawienie, oddychanie, krążenie, odnowę komórek i tkanek itp. Łącznie wszystkie te procesy składają się na **wydatek energetyczny organizmu** (ilość energii zużywanej w ciągu sekundy), mierzony w watach. Wzrost wysiłku fizycznego powoduje przyspieszenie metabolizmu i zwiększenie wydatku energetycznego na wszystkie funkcje życiowe.

Tabela 9. Wydatek energetyczny organizmu podczas różnych form aktywności.

Forma aktywności	Wydatek energetyczny, W
sen	80
praca umysłowa	150
lekka praca fizyczna	175–350
średnia praca fizyczna	350–500
jazda na rowerze, gimnastyka	500
sport wyczynowy	1000

Łącząc dane z powyższych tabel, możemy obliczyć, ile czasu potrzeba, aby zużyć energię dostarczoną z konkretnym pokarmem.

Przykład 3.

Oblicz, ile czasu potrzeba, aby zużyć energię zawartą w 100 g boczku wędzonego:
a) śpiąc, b) jeżdżąc na rowerze.

Rozwiązanie

Wydatek energetyczny ma wymiar mocy, więc w danych oznaczamy go literą P jak moc.

Dane:

$$Q = 477 \text{ kcal} = 2000 \text{ kJ}$$

$$P_1 = 80 \text{ W}, \quad P_2 = 500 \text{ W}$$

Szukane:

$$t_1, t_2 = ?$$

Wykorzystujemy związek między ciepłem (pracą) a mocą i czasem: $P = \frac{Q}{t} \Rightarrow t = \frac{Q}{P}$

a) czas potrzebny na zużycie energii podczas snu:

$$t_1 = \frac{Q}{P_1} = \frac{2000000 \text{ J}}{80 \text{ W}} = 25000 \text{ s} = 6 \text{ h } 57 \text{ min}$$

b) czas potrzebny na zużycie energii podczas jazdy na rowerze:

$$t_2 = \frac{Q}{P_2} = \frac{2000000 \text{ J}}{500 \text{ W}} = 4000 \text{ s} = 1 \text{ h } 7 \text{ min}$$

Odpowiedź: Aby „spalić” 100 g boczku wędzonego, potrzeba prawie 7 godzin snu lub ponad 1 godzinę jazdy na rowerze.



ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Znajdź w literaturze lub tablicach fizycznych gęstość gazu ziemnego w warunkach normalnych i oblicz jego wartość opałową w $\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$.
2. Dowiedz się, jakie są w twojej okolicy aktualne ceny energii elektrycznej, węgla kamiennego, oleju opałowego i mieszanki LPG. Oblicz, ile kosztuje 1 MJ energii pozyskanej z każdego z tych nośników.
3. Sezon grzewczy trwa 5 miesięcy. W trakcie sezonu instalacja centralnego ogrzewania pewnego budynku pracuje ze średnią mocą 27 kW. Kocioł jest zasilany mieszanką propan-butan. Oblicz roczne zapotrzebowanie instalacji na ten gaz. Wynik podaj w litrach i kilogramach.
4. Oblicz, co daje organizmowi więcej energii: wypicie 0,5 l mleka czy zjedzenie 50 g orzechów włoskich.
5. Oblicz, jaka ilość chleba pokrywa wydatek energetyczny 2 godzin nauki.
6. Oszacuj ilość pracy mechanicznej, jaką człowiek jest zdolny wykonać dzięki spożyciu pół kilograma bananów.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- W zależności od sposobu pomiaru, wartość energetyczną paliw definiujemy jako ciepło spalania lub wartość opałową. s. 80
- Ciepło spalania to energia, jaka wydziela się podczas całkowitego spalania 1 kilograma danej substancji. s. 80
- Wartość opałowa paliwa to ciepło spalania pomniejszone o ilość energii unoszonej przez parę wodną zawartą w spalinach. s. 80
- Znajomość wartości opałowej paliw pozwala kalkulować ich zapotrzebowanie oraz ułatwia podejmowanie optymalnych decyzji w kwestii wyboru nośników energii. s. 81
- Wartość energetyczna żywności jest to ilość energii w danym produkcie, jaką organizm może przyswoić w procesie trawienia. s. 82
- Procesy metaboliczne w organizmie ostatecznie prowadzą do podobnych skutków energetycznych jak zwykle spalanie pokarmów. Różnice wynikają z niecałkowitej przyswajalności produktów spożywczych. s. 82
- Kaloria to ilość ciepła potrzebna do podgrzania 1 grama wody o 1 stopień. $1 \text{ cal} = 4,19 \text{ J}$. s. 83
- Dienne zapotrzebowanie energetyczne przy umiarkowanej aktywności fizycznej wynosi około 2000 kcal dla kobiety i 2500 kcal dla mężczyzny. s. 84
- Zapotrzebowanie energetyczne wzrasta wraz z wysiłkiem fizycznym. Około 25% dostarczonej energii organizm jest w stanie przeznaczyć na pracę mechaniczną, pozostałe 75% zużywa na procesy życiowe. s. 84



2.11. Woda i jej właściwości

NA TEJ LEKCJI

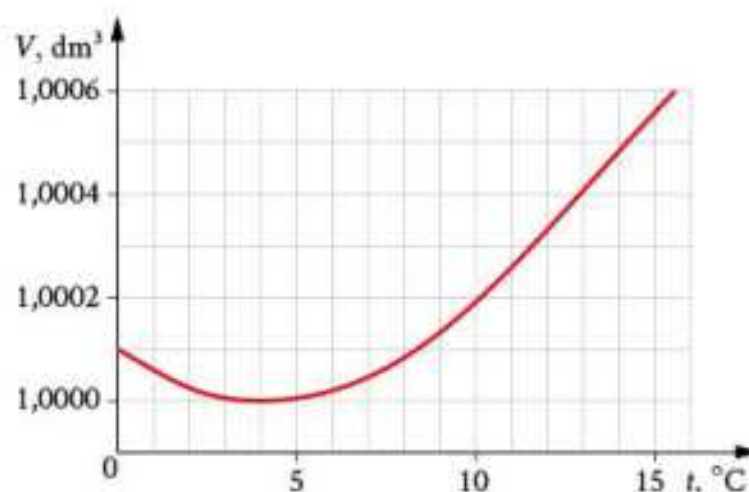
- poznasz szczegóły dotyczące anomalnej rozszerzalności wody i jej skutki dla przyrody,
- dowiesz się, jak lód i woda kształtują klimat na Ziemi,
- poznasz szczegóły dotyczące napięcia powierzchniowego, menisku i włoskowatości.

Anomalna rozszerzalność cieplna wody i jej konsekwencje

Jak już wiesz, większość ciał zwiększa swoje rozmiary proporcjonalnie do przyrostu temperatury. Od tej zasady są wyjątki, z których najbardziej znanym jest zachowanie się wody.

rozszerzalność
cieplna wody

W zakresie temperatur od 4°C do 100°C woda zachowuje się „normalnie” – zwiększa swoją objętość wraz ze wzrostem temperatury. Podczas obniżania temperatury od 4°C do 0°C dzieje się coś niezwykłego – woda, zamiast się kurczyć, zwiększa objętość ze spadkiem temperatury. Najmniejszą objętość i największą gęstość ma w temperaturze 4°C , rys. 28.



Rys. 28. Zależność objętości 1 kg wody od temperatury.

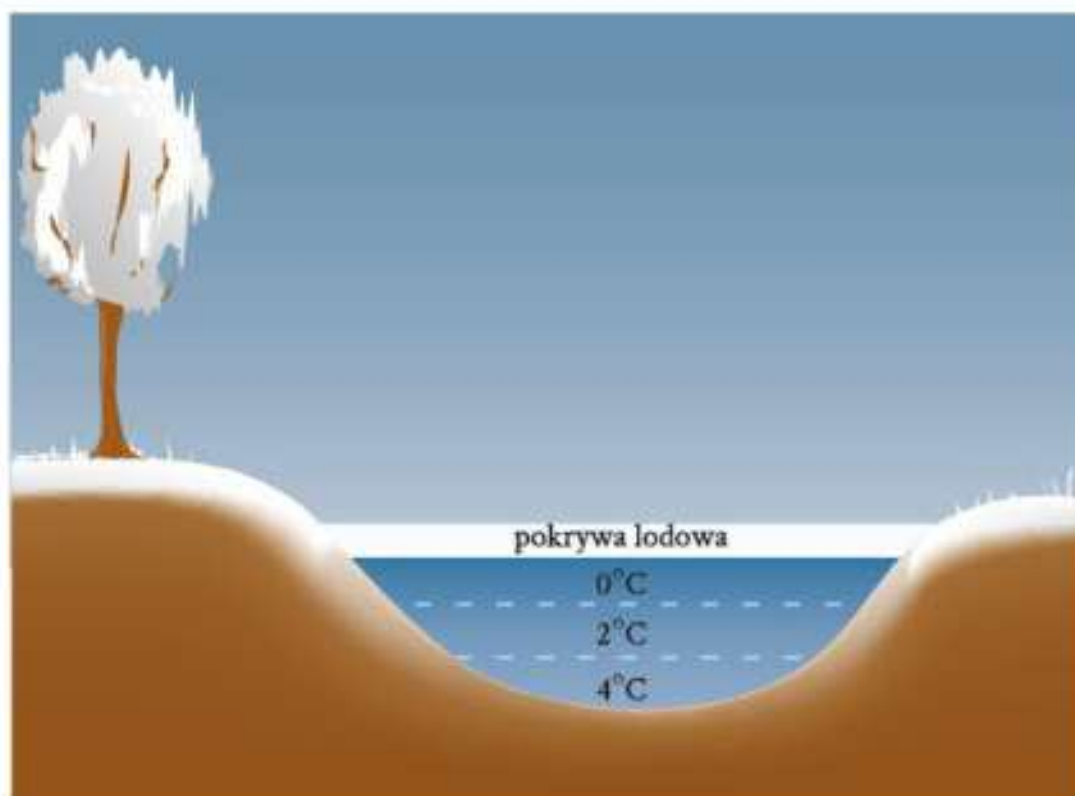
U podstaw tego zjawiska leżą właściwości wiązań między atomami wodoru i tlenu w wodzie, tzw. wiązania wodorowe. Sprawiają one, że cząsteczka wody z jednej strony jest bardziej naładowana dodatnio, a z drugiej – ujemnie. Skłania to cząsteczki wody w niskich temperaturach do łączenia się w większe od zwykłych cząsteczki typu H_4O_2 , H_6O_3 itd., które trudniej się dopasowują do otoczenia. Stąd większa objętość.

wzrost objętości
wody

Objętość ta wzrasta skokowo, o około 10%, podczas krzepnięcia wody, czyli zamarzania. Struktura krystaliczna lodu zawiera dużo pustych przestrzeni. Atomy tlenu układają się w środkach czworościanów, w których wierzchołkach znajdują się atomy wodoru. Dwa z nich należą do danej cząsteczki, a dwa pozostałe do cząsteczek



sąsiednich. W trakcie topnienia wiązania te pękają, a uwolnione cząsteczki wody wypełniają puste przestrzenie.



Rys. 29. Rozkład temperatury w zbiorniku wodnym zimą.

Anomalna rozszerzalność cieplna wody ma doniosłe znaczenie dla życia na Ziemi. Gdyby lód był cięższy od wody, zbiorniki wodne zamarzalyby od dołu w całej objętości. Życie w takich zbiornikach byłoby niemożliwe – nie mogłoby w nich powstać miliardy lat temu. Ponieważ gęstość lodu jest mniejsza niż gęstość wody, lód powstaje na powierzchni zbiorników, tworząc zarazem warstwę izolacyjną zapobiegającą wychładzaniu się głębszych warstw. W miarę wzrostu głębokości temperatura wody rośnie aż do 4°C, przy której woda ma największą gęstość. W tych warunkach możliwe jest przetrwanie okresu zimowego przez organizmy żywe.

W lecie rozkład temperatury w głębokim zbiorniku jest odwrotny. Woda ogrzewa się na powierzchni, natomiast w głębinach utrzymuje niską temperaturę, do 4°C. Zimna woda może rozpuścić więcej tlenu, co korzystnie wpływa na znajdujące się w pobliżu dna zwierzęta.

Wzrost objętości wody podczas zamarzania jest jednym z głównych czynników erozji – niszczenia powierzchni terenu przez czynniki środowiskowe. Zamarzająca woda w szczelinach skalnych powoduje pękanie i kruszenie skał. W życiu codziennym grozi nam uszkodzenie instalacji wodnych (rur, zaworów, kranów, butelek itd.) wystawionych na działanie mrozu. Fundamenty domów muszą być posadowione poniżej głębokości, na jaką w zimie zamarza gleba. W przeciwnym razie konstrukcja domu może zostać naruszona przez zamarzającą pod nim wodę. Również warstwy konstrukcyjne dróg muszą być tak zaprojektowane i wykonane, by nie było możliwości dostania się wody pod jej nawierzchnię. Temu celowi służą między innymi rowy znajdujące się po bokach dróg oraz studzienki kanalizacyjne w miastach.

wpływ anomalnej rozszerzalności wody na życie na Ziemi

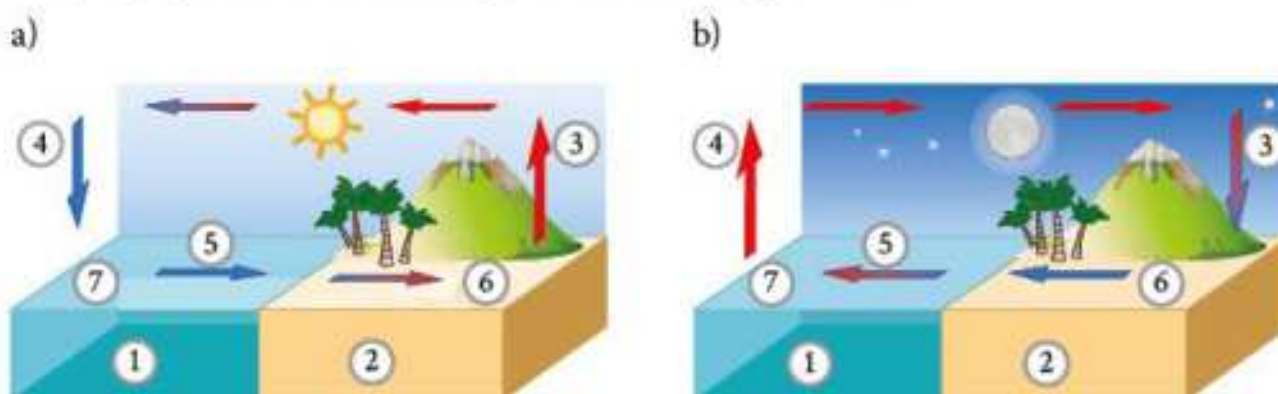


wpływ dużego
ciepła właściwego
wody na klimat
na Ziemi

Woda a klimat na Ziemi

Gdy przyjrzymy się jeszcze raz tabelom 3. i 5., zauważymy, że woda, w stosunku do innych substancji, ma wyjątkowo duże ciepło właściwe, a lód stosunkowo duże ciepło topnienia. Fakt ten odgrywa doniosłą rolę w kształtowaniu się klimatu na Ziemi. Duże zbiorniki trudno jest ogrzać (tym bardziej, że nagrzewają się tylko od góry, a w głębinach pozostają chłodne) oraz trudno ochłodzić. Pełnią więc one funkcję termostatów, zarówno w cyklach dobowych, jak i rocznych. Kraje nadmorskie mają łagodny klimat – stosunkowo ciepłe zimy i umiarkowane lata. Tereny odległe od oceanów (na przykład centralna Azja) mają klimat kontynentalny – upalne lata i bardzo mroźne zimy.

Różnice w szybkości nagrzewania się zbiorników wodnych i lądów powodują powstawanie zjawiska **bryzy** w strefach przybrzeżnych. W ciągu dnia ląd nagrzewa się szybciej niż woda, dlatego cieplejsze powietrze nad lądem się unosi, ustępując miejsca chłodniejszemu i wilgotniejszemu powietrzu znad morza. Wobec tego bryza dzienna (morska) wieje znad morza na ląd. Natomiast w nocy woda stygnie wolniej niż ląd. Cieplejsze powietrze znajduje się teraz nad wodą, co powoduje zmianę kierunku wiatru. Bryza nocna (lądowa) przemieszcza nad wodę suche powietrze znad lądu. Jest to komórka konwekcyjna, która sięga około 30 km w głąb morza i nieco mniej w stronę lądu – zależy to m.in. od ukształtowania terenu. Niezależnie od pory doby bryzę zawsze odczuwamy jako chłodniejszy powiew.



Rys. 30. a) bryza dzienna: 1 – chłodna woda, 2 – ciepły ląd, 3 – ciepłe powietrze, 4 – chłodne powietrze, 5 – wilgotne, chłodne powietrze, 6 – niż, 7 – wyż; b) bryza nocna: 1 – ciepła woda, 2 – chłodny ląd, 3 – chłodne powietrze, 4 – ciepłe powietrze, 5 – suche, zimne powietrze, 6 – wyż, 7 – niż.

wpływ dużego
ciepła topnienia
wody na klimat
na Ziemi

Dzięki dużej wartości ciepła topnienia zbiorniki wodne nie zamarzają zbyt szybko, a śnieg i lód nie topnieją gwałtownie. Dlatego proces zanikania pokrywy śnieżnej na wiosnę jest rozłożony w czasie i nie powoduje groźnych powodzi ani podtopień.

Właściwości molekularne wody

Opisane tutaj zjawiska molekularne dotyczą też innych cieczy, ale w odniesieniu do wody mają ważne znaczenie dla przyrody.

W szkole podstawowej spotkałeś/spotkałaś się już z pojęciem **napięcia powierzchniowego**. Cząsteczki cieczy znajdujące się na jej powierzchni stykają się z innymi



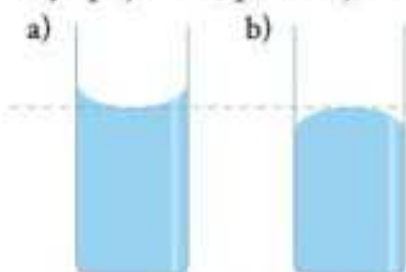
tylko z jednej strony, wobec czego przyciągane są w głąb cieczy siłami spójności. Skutkuje to powstaniem elastycznej błonki, która ogranicza ciecz i razem z innymi siłami nadaje jej kształt. Dzięki temu zjawisku spadająca ciecz przyjmuje kształt kropli, a niektóre owady mogą chodzić po powierzchni wody bez zwilżania swoich odnóży.



Rys. 31. Owad wykorzystujący napięcie powierzchniowe do chodzenia po wodzie.

Napięcie powierzchniowe utrudnia wykorzystanie wody do mycia i prania, ponieważ woda się perli (skupia w krople) zamiast przylegać do ciała lub włókien tkaniny i wypłukiwać brud. Napięcie powierzchniowe wody można zmniejszyć, podgrzewając ją lub dodając specjalnych środków, tzw. detergentów, takich jak mydło lub proszek do prania. Wtedy błonka staje się o wiele słabsza, a woda jest zdolna penetrować włókna tkanin. Widoczny na zdjęciu owad utopilby się w wodzie z dodatkiem mydła.

Gdy ciecz znajduje się w naczyniu, następuje współdziałanie sił spójności (działających pomiędzy cząsteczkami cieczy) i sił przylegania (pomiędzy cząsteczkami cieczy a cząsteczkami naczynia) i powstaje tzw. **menisk**. Jest to zjawisko zakrzywiania się powierzchni cieczy w pobliżu punktu styczności z ciałem stałym. Jeśli przeważają siły spójności, powstaje menisk wypukły, a jeśli siły przylegania – menisk wklęsły.



Rys. 32. Menisk: a) wklęsły, b) wypukły.

To, jaki rodzaj menisku powstaje, zależy od rodzaju substancji. Na przykład woda w kontakcie ze szkłem tworzy menisk wklęsły, a w kontakcie z woskiem lub ciałem impregnowanym – menisk wypukły. W przypadku menisku wklęsłego mówimy też, że ciecz **zwilża ciało stałe**.

Jeśli woda znajdzie się w cienkiej rurce, tzw. kapilarze albo rurce włosowatej, siły przylegania mogą przewyciężyć ciężar wody, która zacznie się wspinać po ściankach naczynia. Efekt ten będzie tym silniejszy, im cieńsza jest rurka i mniejszy ciężar zawartej w niej cieczy. Zjawisko to nazywamy **włoskowatością**. Takimi naczyniami włosowatymi są również pory w bibule, gąbce, glebie i innych materiałach porowatych. Wystarczy zanurzyć w wodzie rąbek bibuły, a po jakimś czasie cały arkusz bibuły będzie wilgotny. Podobnie dzieje się z gąbką, porowatą cegłą i ziemią. Włoskowatość pracuje przeciwko sile grawitacji i powoduje, że woda w glebie nie spływa w dół, tylko ją zwilża i pozwala roślinom rosnąć. Dzięki temu zjawisku możliwy jest transport wody przeciwko sile grawitacji na wysokość nawet kilkunastu metrów.

Rys. 33. Włoskowatość w naczyniach połączonych. Im cieńsza rurka, tym mniejszy ciężar znajdującej się w niej cieczy i siłom przylegania łatwiej jest wciągnąć ją do góry.



zwilżanie ciała stałego przez wodę

włoskowatość



ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Woda, jak wiadomo, jest podstawowym budulcem wszystkich organizmów żywych na Ziemi. Była również siedliskiem załączków życia na naszej planecie. Wymień wszystkie fizyczne właściwości wody, które ułatwiają żywym organizmom przeżycie i omów ich znaczenie.
2. Wyjaśnij, odwołując się do cząsteczkowej teorii budowy materii, na czym polega napięcie powierzchniowe, menisk i włoskowatość.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- s. 86 • Woda w przedziale temperatur od 0°C do 4°C zachowuje się wbrew ogólnemu prawu rozszerzalności objętościowej – nazywamy to rozszerzalnością anormalną. Odpowiada za to szczególna budowa cząsteczki wody.
- s. 86 • Woda, zamarzając, zwiększa swoją objętość o około 10%.
- s. 87 • Dzięki anormalnej rozszerzalności cieplnej wody życie w zbiornikach wodnych w okresach zimowych jest możliwe.
- s. 88 • Duże ciepło właściwe wody sprzyja stabilizacji temperatury na obszarach nadmorskich. Natomiast różnica w ciepłach właściwych wody i lądu powoduje powstawanie bryzy.
- s. 88 • Duże ciepło topnienia lodu zapobiega szybkiemu zamarzaniu zbiorników oraz zmniejsza ryzyko powodzi podczas roztopów.
- s. 89 • Woda zwilża substancje, dla których siły przylegania są większe od sił spójności samej wody.
- s. 89 • Włoskowatość rozprowadza wodę w obrębie materiałów porowatych, w tym w glebie, i stwarza roślinom warunki rozwoju.

2.12. Zjawisko dyfuzji

NA TEJ LEKCJI

- dowiesz się, na czym polega dyfuzja,
- zbadasz, od czego zależy tempo dyfuzji,
- poznasz rolę dyfuzji w przyrodzie oraz jej zastosowania praktyczne.

Dyfuzja w różnych stanach skupienia

Doświadczenie 1.

Pomoce: dezodorant w sprayu, stoper z funkcją międzyczasu.

W doświadczeniu bierze udział cała klasa. Jeden uczeń stoi w rogu sali z dezodorantem, a drugi w przeciwległym rogu ze stoperem. Pozostali uczniowie siedzą

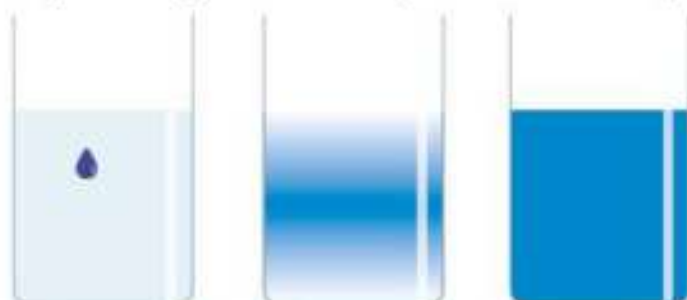


nieruchomo, rozmieszczeni równomiernie w pomieszczeniu. Uczeń ze stoperem wydaje umówiony sygnał i włącza stoper. W tym momencie uczeń z dezodorantem rozpyla dawkę dezodorantu. Każdy uczeń, do którego dociera zapach, podnosi rękę. Uczeń ze stoperem odnotowuje momenty, w których poszczególne osoby podniosły rękę. Na podstawie tych czasów oraz szacunkowej odległości dezodorantu od uczniów oszacujcie prędkość rozchodzenia się zapachu.

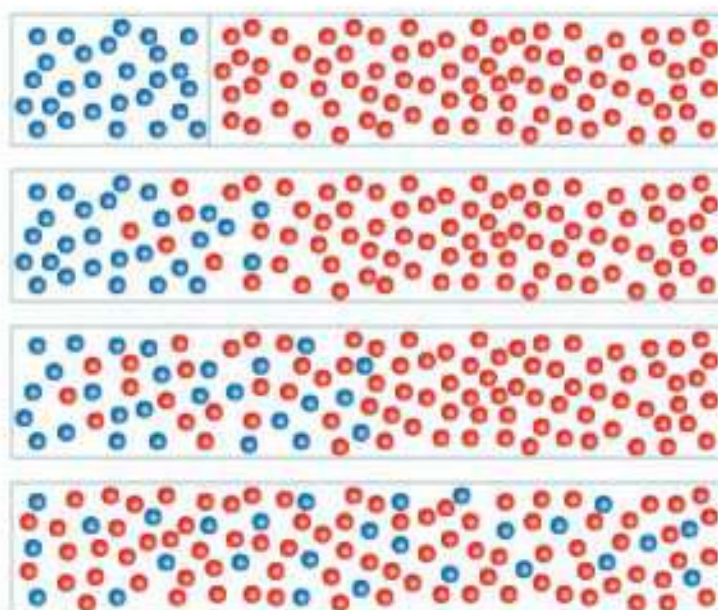
Doświadczenie 2.

Pomoce: 3 jednakowe szklanki wypełnione w $\frac{3}{4}$ wodą – jedna zimną, druga ciepłą i trzecia gorącą, zakraplacz z atramentem lub 3 kryształki nadmanganianu potasu lub innej barwnej, łatwo rozpuszczalnej substancji.

Szklanki ustawiamy obok siebie. Do wszystkich jednocześnie wkraplamy kroplę atramentu lub wrzucamy kryształek barwnej soli. Obserwujemy, co się dzieje. Warto w regularnych odstępach czasu (np. co 5 sekund) wykonywać fotografie.



Rys. 34. Zależność tempa dyfuzji od temperatury: a) woda zimna, b) woda ciepła, c) woda gorąca.



Rys. 35. Etapy dyfuzji przedstawione w sposób schematyczny.

Jak to się stało, że zapach rozprzestrzenił się po całej klasie, a barwa atramentu lub kryształka wypełniła całą szklankę? Zaobserwowaliśmy zjawisko zwane dyfuzją.

Dyfuzja jest to zjawisko samorzutnego mieszania się ze sobą substancji, spowodowane chaotycznym ruchem cząsteczek tej substancji.

dyfuzja



tempo dyfuzji
a stan skupienia

Poczynione obserwacje pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- 1. Tempo dyfuzji zależy od stanu skupienia.** Dezodorant w klasie rozprzestrzenił się na odległość kilku metrów w krótkim czasie. Szklanka ma rozmiary kilkunastu centymetrów, a i tak czas rozprzestrzeniania się barwnika był znacznie dłuższy. Wynika to stąd, że cząsteczki gazu są o wiele bardziej ruchliwe i mają więcej miejsca, by się rozprzestrzeniać. Dokładniejsze badania wykazują, że im mniejsze ciśnienie gazu, tym większa szybkość dyfuzji, bo większa jest droga swobodna cząsteczek (rzadziej się zderzają). W cieczech cząsteczki przylegają do siebie i mają mniejszą swobodę ruchu. Dlatego mieszanie zachodzi wolniej. Dyfuzja możliwa jest też w ciałach stałych, ale w ograniczonym zakresie i trwa bardzo długo. Przykładem są silnie ściśnięte ze sobą sztabki złota i ołowiu. Po jakimś czasie okazuje się, że niektóre atomy złota wniknęły w głąb sztabki ołowiu, a niektóre atomy ołowiu – w głąb sztabki złota.
- 2. Tempo dyfuzji zależy od temperatury.** Jest to zrozumiałe, gdyż im większa temperatura, tym większa prędkość cząsteczek substancji. Barwnik w gorącej wodzie rozprzestrzenił się niemal natychmiast, podczas gdy w zimnej jego zasięg zwiększał się powoli.
- 3. Dyfuzja zawsze prowadzi do wyrównywania stężeń.** Jeśli zaczekamy odpowiednio długo, substancje wymieszają się w sposób równomierny. Nigdy nie zaobserwowano, by na skutek dyfuzji następowała koncentracja składnika w jednym miejscu mieszaniny i ubytek jego stężenia w innym miejscu.

Dyfuzja może zachodzić pomiędzy substancjami o różnych stanach skupienia. Na zasadzie dyfuzji rozpuszcza się tlen w wodzie, a ciekły impregnat wnika w ciało stałe. Jeśli przez kilka dni będziemy obserwować balon napelniony helem, zauważymy, że ciśnienie w nim maleje. Atomy helu dyfundują przez gumę.

Wyjaśnienie zjawiska dyfuzji było swego czasu koronnym dowodem na to, że materia składa się z cząsteczek i że te cząsteczki poruszają się w sposób chaotyczny z prędkościami zależnymi od temperatury i stanu skupienia.



Chcesz wiedzieć więcej?

Obserwując rozprzestrzenianie się zapachu w klasie lub barwnika w naczyniu z wodą, z pewnością zauważyłeś/zauważyłaś, że tempo tego procesu maleje. Okazuje się, że zasięg rozprzestrzeniającej się substancji w ogromnej większości przypadków nie jest proporcjonalny do czasu, tylko do pierwiastka z czasu. Wynika to z innej zależności: szybkość dyfuzji jest proporcjonalna do różnicy stężeń przypadającej na jednostkę odległości. W miarę rozprzestrzeniania się substancji jej stężenie maleje, więc maleje też szybkość dyfuzji.



rola dyfuzji w przyrodzie

Rola dyfuzji w przyrodzie

Rola dyfuzji w przyrodzie jest trudna do przecenienia. Poniżej podano w punktach niektóre z jej przejawów. Jedne z nich są pozytywne, inne, niestety, szkodliwe.

1. Odczuwanie smaku i zapachu. Jest to możliwe dzięki temu, że bodźce chemiczne na zasadzie dyfuzji docierają do naszych receptorów.
2. Oddychanie. Dzięki dyfuzji następuje sprawniejsza wymiana gazów w naszych płucach oraz w otaczającym nas powietrzu. Gdyby nie dyfuzja, wydychany dwutlenek węgla otoczyłby nas i jakość powietrza by spadła.
3. Na zasadzie dyfuzji tlen z naszych płuc rozpuszcza się we krwi i łączy z hemoglobina, dzięki czemu może być transportowany do komórek i brać udział w procesach życiowych.
4. Kwiaty pachną po to, by wabić owady. Owady, żywiąc się nektarem, przy okazji zapylają kwiaty, dzięki czemu roślina może wydać owoce.
5. Dyfuzja powoduje rozprzestrzenianie się chorób zakaźnych.
6. Wskutek dyfuzji mogą się rozprzestrzeniać zanieczyszczenia, zarówno w atmosferze, jak i w wodzie. Skutki kolizji tankowców lub pożarów zakładów chemicznych odczuwalne są na znacznych obszarach. Przeprowadzanie prób z bronią jądrową spowodowało wzrost stężenia pierwiastków promieniotwórczych na całej planecie.
7. Dyfundujący do górnych warstw atmosfery freon, stosowany niegdyś masowo w chłodziarkach i aerozolach, spowodował powstanie dziury ozonowej.
8. Dzięki dyfuzji z naszej planety uciekł niemal cały hel. Gaz ten jest, po wodorze, drugim najbardziej rozpowszechnionym pierwiastkiem we Wszechświecie, jednym z podstawowych budulców gwiazd. Jako gaz szlachetny nie tworzy żadnych związków chemicznych, występuje jedynie w stanie wolnym. Jego stężenie na Ziemi jest jednak znikome, mimo że jest na bieżąco produkowany w skorupie ziemskiej w wyniku rozpadów promieniotwórczych ciężkich pierwiastków. Nie mogąc się związać chemicznie z żadnym innym pierwiastkiem, hel dyfunduje przez skorupę ziemską i dociera do górnych warstw atmosfery, skąd ucieka w przestrzeń kosmiczną.

Zastosowania dyfuzji w technice i życiu codziennym

zastosowania dyfuzji w technice i życiu codziennym

Zjawisko dyfuzji obserwujemy na co dzień podczas parzenia herbaty lub kawy. Herbata pozostawiona sama sobie samoistnie dyfunduje z torebki do szklanki. Proces ten możemy oczywiście znacznie przyspieszyć, mieszając herbatę łyżeczką. Podobnie przyspieszamy wyrównywanie stężeń, gdy herbatę słodzimy lub dodajemy cytryny.

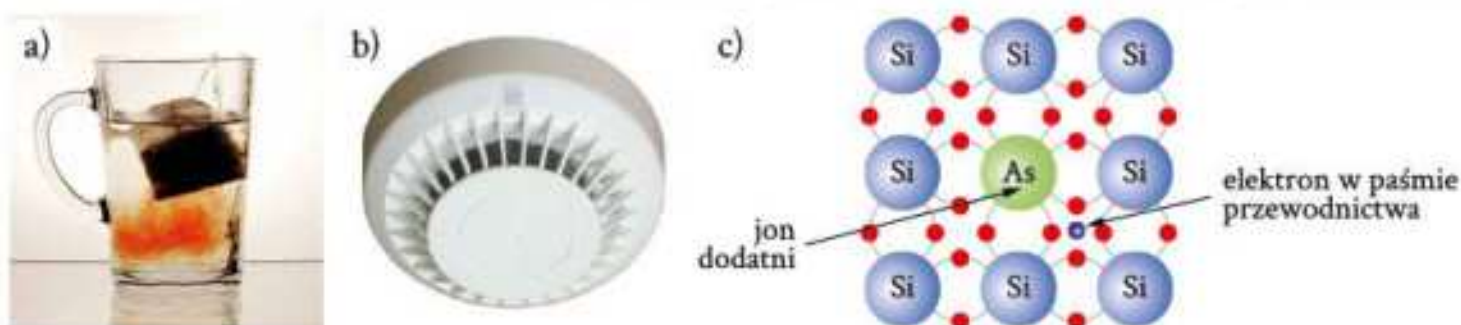
Dzięki dyfuzji możliwe jest działanie czujników dymu, gazu i czadu. Mają one różne konstrukcje i zasady funkcjonowania, ale podstawowym warunkiem ich zadziałania jest dotarcie substancji, którą mają wykryć, do wnętrza czujnika (podobnie jak zapach – aby został wykryty, musi dotrzeć do naszego nosa).



Na zasadzie dyfuzji pigmenty farby i cząsteczki impregnatu wnikają w głąb substancji, którą chcemy zabarwić lub zaimpregnować.

Trudno wyobrazić sobie współczesny świat bez półprzewodników. Wszystkie komputery, telefony i zaawansowany sprzęt AGD są wyposażone w procesory. O półprzewodnikach będziesz się uczyć w następnej klasie. Teraz wspomnijmy tylko, że buduje się je na bazie krzemu, do którego trzeba dodać atomy innych pierwiastków. Wykorzystujemy do tego różne techniki, w tym kontrolowaną, wieloparametrową dyfuzję. Sama dyfuzja powoduje również przemieszczanie się ładunków w półprzewodnikach i jest podstawą działania takich urządzeń elektronicznych, jak dioda i tranzystor.

To tylko nieliczne z wielu zastosowań dyfuzji. To zjawisko jest naprawdę bardzo ważne.



Rys. 36. Przykładowe zastosowania dyfuzji: a) parzenie herbaty, b) czujka dymu, c) domieszkowanie półprzewodników.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wyszukaj w internecie i opisz w zeszycie przejawy dyfuzji w przyrodzie i w procesach życiowych inne niż wymienione w podręczniku.
2. Wyszukaj w internecie i przygotuj prezentację dotyczącą zastosowań dyfuzji w życiu codziennym i w technice.

PODSUMOWANIE LEKCJI

s. 91

- Dyfuzja to proces samorzutnego mieszania się substancji pod wpływem ruchów termicznych cząsteczek.

s. 92

- Dyfuzja zachodzi we wszystkich stanach skupienia, przy czym zdecydowanie najszybciej w gazach, wolniej w cieczach i bardzo wolno w ciałach stałych.

s. 92

- Szybkość dyfuzji wzrasta wraz z temperaturą.

s. 92

- Dyfuzja zawsze prowadzi do wyrównywania się stężeń.

s. 93

- Dyfuzja pełni niezwykle ważne funkcje w przyrodzie i utrzymywaniu procesów życiowych.

s. 93

- Dyfuzja znalazła liczne zastosowania w życiu codziennym i w technice.



Analiza tekstu: Historia *perpetuum mobile*. W poszukiwaniu wiecznego ruchu

„Samo nie zatrzyma się nigdy” – chwalił swoje wynalazki Orffyreusz. W to, że udało mu się zbudować *perpetuum mobile*, uwierzyli osiemnastowieczni naukowcy, królowie i książęta.

Członkowie komisji sprawdzili, czy w ścianach zamkowej komnaty nie ma ukrytych przejść ani otworów. Zamknęli od wewnątrz okna, na drzwiach odcisnęli woskowe pieczęcie. Wrócili po dwóch tygodniach. Ustawione na środku pomieszczenia wielkie koło obracało się dokładnie w takim tempie jak czternaście dni wcześniej. Konstruktor urządzenia oznajmił, że może się tak kręcić w nieskończoność. Ponownie opieczetowano każde drzwi. Tym razem odczekano czterdzieści dni. Koło wciąż wirowało, wykonując dokładnie 26 obrotów na minutę. Komisja sporządziła raport, uznając, że samonapędzające się urządzenie naprawdę działa.

Kto podpisał się pod raportem? Nie byli to amatorzy, których omamili by zręczny sztukmistrz. Do komisji należeli profesor fizyki uniwersytetu w Lejdzie Willem s' Gravesande (czyt. wilem szraveszande), kanclerz uniwersytetu w Halle Christian Wolff (czyt. kristian wolf), ekspert w dziedzinie mechaniki Friedrich Hoffmann (czyt. fridriś hofman), lekarz Dietrich Bohsen (czyt. ditriś bozen) i ceniony konstruktor przyrządów matematycznych John Rowley (czyt. dżon raully). Poza nimi wydarzenie obserwowało kilkunastu arystokratów, którzy w drodze głosowania przekazali baronowi Emanuelowi Fischerowi (czyt. fiszerowi) przywilej wprawienia koła w ruch. Wybraniec popchnął je lekko jedną ręką i maszyna samoistnie zaczęła przyspieszać, aż do 26 obrotów na minutę. Pokaz odbywał się między 11 listopada 1717 roku a 4 stycznia 1718 roku na zamku Weissenstein należącym do landgraфа Karola, władcy niemieckiego księstwa Hesja-Kassel.

Cudowne koła

Urządzenie zbudował niemiecki wynalazca o zupełnie niegermańskim nazwisku – Orffyreus (w spolszczeniu Orffyreusz). Już samo jego brzmienie przyciągało uwagę, gdyż kojarzyło się z wiedzą tajemną, magią, alchemią. I oto chodziło – w rzeczywistości było pseudonimem, który przybrał syn chłopów z Saksonii Elias Bessler (czyt. elijas besler). [...]

Pierwsze niewielkie urządzenie budował przez dziesięć lat. Zaprezentował je 6 czerwca 1712 roku w mieście Gera. Na pokaz zaprosił lokalną elitę. Puszczone w ruch koło nie przestawało się kręcić przez wiele godzin. „Samo nie zatrzyma się nigdy” – reklamował swoje dzieło.

Nie wszystkich przekonał. Bardzo ostro zaatakował go wybitny wynalazca i projektant urządzeń technicznych Andreas Gärtner (czyt. andreas gertner), twórca niezwykle skomplikowanych zegarów, pracujący m.in. dla polskiego króla Augusta II. Ośmieszał Besslera, pokazując kopie „cudownego koła” nakręcane z ukrycia przez swoich pomocników.

Orffyreusz był chorobliwie ambitny i nadpobudliwy, więc na wieść, że stał się obiektem złośliwych żartów, wpadł w furję i roztrzaskał swoją maszynę.



Sekret za sto tysięcy talarów

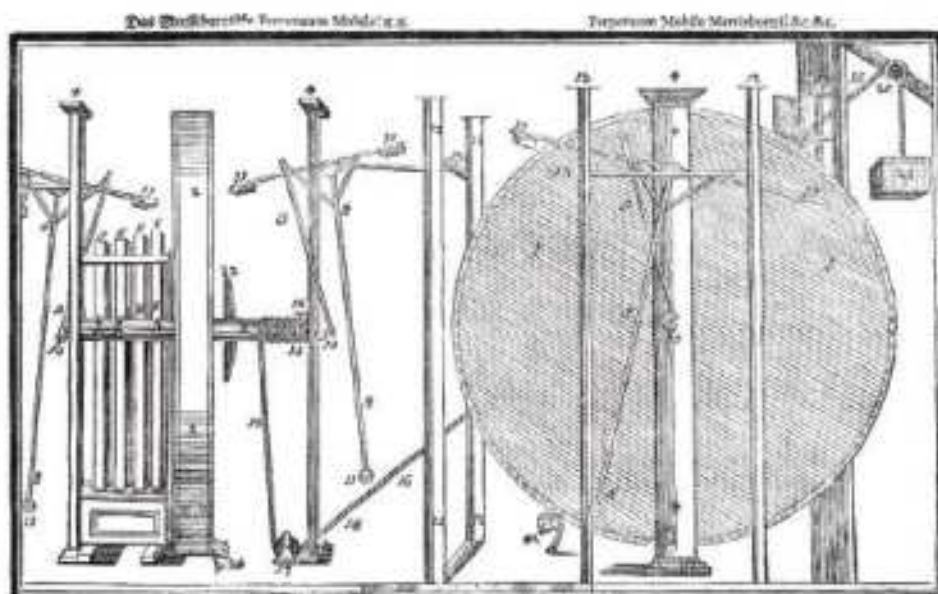
Obsesja okazała się jednak silniejsza i już rok później zaprezentował drugi model, znacznie większy. Wirujące drewniane koło miało 275 cm średnicy i 15 cm grubości, ważyło około 18 kg.

W 1714 roku odwiedził go jeden z gigantów ówczesnej nauki Gottfried Leibniz (czyt. gotfrid lajbnic). Bessler zaprezentował swoje *perpetuum mobile* i choć zgodnie z pierwszą zasadą dynamiki Newtona takie urządzenie nie miało prawa powstać, przekonał gościa, że jednak powstało. Leibniz i Newton darzyli się szczerą nienawiścią wywołaną sporem o pierwszeństwo odkrycia rachunku różniczkowego. Oskarżali się wzajemnie o plagiat i bezkrytycznie przyjmowali wszystko, co mogło zaszkodzić reputacji rywala. Zachwycony Leibniz napisał więc list do angielskiego fizyka Roberta Erskine'a (czyt. erskina), który przebywał jako doradca naukowy na dworze cara Piotra I Wielkiego. Przedstawił w nim Besslera jako „swego przyjaciela”, a jego dzieło jako „niezwykły wynalazek”.

W ten sposób prowincjonalny konstruktor zyskał światową sławę. Jej echa dotarły na dwór księcia Hesji-Kassel, prywatnie wielkiego miłośnika techniki, który postanowił zostać sponsorem Orffyreusza. Ten zwiertzył okazję do zbiccia fortuny i ogłosił, że sprzeda instrukcję budowy poruszającej się samoistnie maszyny za 100 tysięcy talarów. Na dowód szczerości swych intencji zapewnił, że jeśli urządzenie nie zadziała, zwróci pieniądze.

Była to gigantyczna suma i jedynie car wyraził wstępne zainteresowanie. Zażądał jednak pokazania projektu uczonym, których wysłał do Saksonii. Bessler bał się, że jeśli ktoś fachowym okiem obejrzy wynalazek, potem go skopiuje. Tak przynajmniej tłumaczył powody, dla których nie dopuszczał nikogo do swoich kół.

W odróżnieniu od cara książę Karol nie stawiał żadnych warunków. Chociaż oferował jedynie 4 tysiące talarów rocznej pensji, mieszkanie, wyżywienie i pokrycie kosztów budowy urządzenia, Orffyreusz przyjął jego propozycję. Przeprowadził się na zamek Weissenstein, gdzie zbudował czwarte już, największe koło średnicy 3,7 m i grubości 36 cm. Ten obiekt zaprezentował w 1717 roku grupie uczonych i notabli.



Rys. 37. Mechanizm Johanna Ernsta Besslera.



Triumfujące *perpetuum mobile*

Nawet im nie pokazał jednak wszystkiego. Pozwolił, by obejrżeli koło, sprawdzili oś, na której się obracało, ale wewnątrz i dużą część konstrukcji okrył nasyconym olejem płótnem. Obserwatorzy mogli stwierdzić, że urządzenie działa, lecz nie dowiedzieli się, w jaki sposób.

Co bardziej spostrzegawczy zauważyli, że koło było zamocowane na poziomej osi podtrzymywanej przez drewniane belki i zwisały z niego ciężarki na sznurkach pełniące rolę wahadła. Podejrzewali, że są to jakieś stabilizatory ruchu. Słyszeli też odgłos opadających kul lub ciężarków. Jeden z arystokratów upierał się, że widział dwie koliste obręcze, inny – drugie koło i lusterka.

Naciskany przez wszystkich Bessler zapowiedział, że wkrótce ujawni swój sekret. W roku 1719 faktycznie wydał broszurę „Triumfujące *perpetuum mobile* Orffyreusza”. Podał w niej jednak tylko bardzo ogólnikowe i mgliste informacje typu „wewnętrzny mechanizm tej maszyny polega na takim rozmieszczeniu ciężarków, że pod wpływem ich ruchu wahadłowego koło raz wprowadzone w rotację nie zatrzyma się, dopóki cały układ nie zmieni swego położenia”. W innym miejscu dodawał, że długość wahadeł i waga ciężarków przymocowanych do obracającego się koła została tak dobrana, by nigdy nie osiągnęły stanu równowagi i napędzały je w nieskończoność.

Sceptyków tym nie przekonał. Isaac Newton powtarzał, że fanteści, którzy „próbują zbudować *perpetuum mobile*, chcą stworzyć coś z niczego, co jest niemożliwe”. [...]

Tajemnica zabrana do grobu

Dziesięć lat po prezentacji na zamku Weissenstein doszło do katastrofy. Anne Rosine Mauersbergerin (czyt. rovine malersbergerin), wieloletnia służąca Besslera, uciekla od niego i oskarżyła go o oszustwo. Zeznała pod przysięgą, że cudowne koło nie napędzało się samo, lecz było potajemnie nakręcane. Według niej w ścianie komnaty znajdował się niewielki otwór, przez który wsuwano długi żelazny pręt zakończony z jednej strony hakiem dopasowanym do ukrytego przed widzami walca, z drugiej – korbą. „Kręciliśmy nią na zmianę; ja, żona Besslera i jego brat Gottfried” – zaklinała się na wszystkie świętości.

Profesor Gravident oświadczył co prawda, że było to niemożliwe, ale reputacja Orffyreusza legła w gruzach. Zawsze skory do wybuchów gniewu wpadł w szal, roztrząsał urządzenie, spalił wszystkie rysunki, szkice i dokumenty. Dlatego nikt nie wie, co naprawdę zbudował i jak to urządzenie wyglądało. Rysunki, które dziś można oglądać w różnych publikacjach, są jedynie hipotetycznym modelem odtworzonym na podstawie relacji osób, które widziały niezwykle koła.

Nie wiadomo, czy Bessler, już w samotności i ukryciu, kontynuował benedyktyńską pracę. Prawdopodobnie tak, gdyż zapowiadał, że zaprezentuje organy, które same grają, i niezatopialny statek do ratowania rozbitków na morzu.

Po śmierci księcia Karola stracił sponsora i musiał szukać innego źródła utrzymania. Projektował młyny i wiatraki, nadzorował ich budowę. W 1745 roku potknął się, spadł z dużej wysokości. Zginął na miejscu, zabierając swe tajemnice do grobu.



Inne *perpetuum mobile*

Orffyreusz nie był ani pierwszym, ani ostatnim konstruktorem *perpetuum mobile*. Starożytni Grecy i Rzymianie kierowali się zdroworozsądkową zasadą „Ex nihilo nihil” – nic nie rodzi się z niczego i tym się nie zajmowali. Ale już u schyłku średniowiecza marzenie o budowie maszyny, która sama z siebie działałaby wiecznie, zaczęło pobudzać wyobraźnię rzemieślników, uczonych i artystów.

W XIII wieku francuski architekt Villard de Honnecourt (czyt. wilar du onkur) naszkicował koło z zawieszonymi na obręczy wahadłkami. Ruch ciężarków miał sprawić, że raz puszczony w ruch mechanizm nigdy nie osiągnie stanu równowagi, więc koło się nie zatrzyma.

Jego pomysł rozwinął wybitny włoski malarz i konstruktor machin wojennych Francesco di Giorgio Martini (czyt. francesko di dziordzio martini), projektując „wieczny młyn”. Spadająca z góry woda miała uruchamiać koło, które – obracając się – napędzi pompę tłoczącą tę samą wodę do zbiornika umieszczonego nad kołem. Stąd znów spadałaby w dół, wprowadzając koło w ruch i tak w nieskończoność. Urządzenie jednak szybko osiągało stan równowagi i stawało.

Lepszy, choć niezamierzony, efekt osiągnął Francuz Pierre Pelerin de Maricourt (czyt. pier pelerę du marikort), który eksperymentował z magnesami. W środku koła z magnetytu kładł na cieniutkiej osi igłę. Miał nadzieję, że kiedy znajdzie właściwe proporcje między długością i ciężarem poszczególnych części urządzenia, igła będzie się obracała bez końca. Okazało się jednak, że zamiast wirować, wskazuje wciąż ten sam kierunek. I tak de Maricourt zbudował prototyp kompasu.

Nauka mówi nie!

W 1775 roku kubel zimnej wody na głowy konstruktorów *perpetuum mobile* wylała Francuska Akademia Nauk. Oficjalnie oświadczyła, że nie będzie już rozpatrywać żadnych projektów, gdyż skonstruowanie takiej maszyny jest niemożliwe. Późniejsze odkrycia naukowe w pełni to potwierdziły. Zgodnie z pierwszą zasadą termodynamiki i ogólną zasadą zachowania energii żadna maszyna nie może przez dowolnie długi okres wykonywać pracy bez pobierania energii z zewnątrz, gdyż wewnętrzna energia każdego ciała materialnego jest skończona.

Druga zasada termodynamiki wyklucza z kolei możliwość skonstruowania tzw. *perpetuum mobile* drugiego rodzaju, czyli maszyny, która całkowicie zamienia energię cieplną na pracę.

Tekst zaczerpnięty z <https://www.focus.pl/artykul/historia-perpetuum-mobile-w-poszukiwaniu-wiecznego-ruchu>

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Podaj, jakim prawom fizyki zaprzecza idea *perpetuum mobile*.
2. Czy twoim zdaniem Orffyreusz był naukowcem czy oszustem? Uzasadnij odpowiedź.
3. Wyszukaj w internecie dodatkowe materiały na temat *perpetuum mobile* i przygotuj obszerną wypowiedź na temat: „Czy próby skonstruowania *perpetuum mobile* przyczyniły się w jakiś sposób do rozwoju nauki?”.



PODSUMOWANIE PRZED SPRAWDZIANEM

1. Większość substancji nieorganicznych podlega prawu rozszerzalności cieplnej (termicznej). Ciała zwiększają swoją objętość, a ciała stałe dodatkowo – rozmiary liniowe. s. 37
2. Cieplny (termiczny) przyrost długości ciała jest wprost proporcjonalny do jego długości początkowej oraz do przyrostu temperatury. Współczynnikiem proporcjonalności jest współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej, który charakteryzuje daną substancję. s. 38
3. Liniowa i objętościowa rozszerzalność cieplna znalazła liczne zastosowania praktyczne, ale bywa też szkodliwa. s. 40
4. Cieplny (termiczny) przyrost objętości ciała jest wprost proporcjonalny do jego objętości początkowej oraz do przyrostu temperatury. Współczynnikiem proporcjonalności jest współczynnik objętościowej rozszerzalności cieplnej, charakteryzujący daną substancję. s. 45
5. Energia wewnętrzna to suma wszystkich rodzajów energii cząsteczek ciała spoczywającego, czyli ich energii kinetycznych i energii potencjalnych związanych ze wzajemnym oddziaływaniem. s. 48
6. Energia wewnętrzna ciała zależy od jego temperatury, wielkości, stanu skupienia i składu chemicznego. s. 49
7. Jednostką zarówno energii wewnętrznej, jak i ciepła jest dżul. s. 50
8. Ciało może przekazać część swojej energii wewnętrznej innemu ciału o niższej temperaturze w postaci ciepła. s. 51
9. Transport energii wewnętrznej od ciała o wyższej temperaturze do ciała o niższej temperaturze możliwy jest na drodze przewodnictwa cieplnego, konwekcji i promieniowania. s. 51
10. Dostarczenie ciepła do układu jest równoważne wykonaniu nad nim pracy. s. 58
11. Zmiana energii wewnętrznej układu jest równa sumie ciepła dostarczonego do układu i wykonanej nad nim pracy. Jest to treść pierwszej zasady termodynamiki. s. 58
12. Ciepło właściwe to ilość energii, jaką wymienia z otoczeniem 1 kg danej substancji podczas zmiany temperatury o 1 stopień. s. 62
13. Ciepło topnienia to ilość energii, jaką wymienia z otoczeniem 1 kg danej substancji podczas topnienia lub krzepnięcia bez zmiany ciśnienia i temperatury. Jednostką ciepła topnienia jest $\frac{\text{J}}{\text{kg}}$. s. 68
14. Ciepło parowania to ilość energii, jaką wymienia z otoczeniem 1 kg danej substancji podczas parowania lub skraplania bez zmiany ciśnienia i temperatury. Jednostką ciepła parowania jest $\frac{\text{J}}{\text{kg}}$. s. 68
15. W układzie izolowanym całkowita energia wewnętrzna nie ulega zmianie. To pozwala zapisać równanie bilansu cieplnego w postaci: *ciepło pobrane = ciepło oddane*. s. 71
16. Posługując się wagą, termometrem i kalorymetrem oraz stosując równanie bilansu cieplnego, możemy wyznaczyć ciepło właściwe badanej substancji. s. 76
17. Każdy rodzaj paliwa ma wartość energetyczną, którą można zdefiniować jako ciepło spalania lub wartość opałową. Rozumienie tych pojęć pomaga w dokonywaniu optymalnych decyzji ekonomicznych. s. 81



- s. 82 18. W ciele ludzkim również zachodzi spalanie, którego wynikiem są te same produkty końcowe – dwutlenek węgla i para wodna. Energia wyzwolona w ciele ludzkim jest porównywalna z energią wyzwoloną podczas zwykłego spalania, z uwzględnieniem stopnia przyswojenia danego produktu. Energię tę nazywamy wartością energetyczną żywności.
- s. 83 19. Kaloria to ilość ciepła potrzebna do podgrzania 1 grama wody o 1 stopień. $1 \text{ cal} = 4.19 \text{ J}$.
- s. 84 20. Dzielne zapotrzebowanie energetyczne przy umiarkowanej aktywności fizycznej wynosi około 2000 kcal dla kobiety i 2500 kcal dla mężczyzny. Zapotrzebowanie to wzrasta wraz z wysiłkiem fizycznym.
- s. 84 21. Około 25% dostarczonej energii organizm jest w stanie przeznaczyć na pracę mechaniczną, pozostałe 75% zużywa na procesy życiowe.
- s. 86 22. W przedziale temperatur od 0°C do 4°C oraz podczas zamarzania woda wykazuje anomalną rozszerzalność objętościową. Odpowiada za to szczególna budowa cząsteczki wody.
- s. 87 23. Dzięki anomalnej rozszerzalności termicznej wody, życie w zbiornikach wodnych w okresach zimowych jest możliwe.
- s. 88 24. Duże ciepło właściwe wody oraz duże ciepło topnienia lodu sprzyjają stabilizacji temperatury oraz spowalniają zjawiska klimatyczne.
- s. 89 25. Woda zwilża substancje, dla których siły przylegania są większe od sił spójności samej wody. Dzięki temu w substancjach porowatych zachodzi zjawisko włoskowatości.
- s. 89 26. Włoskowatość w glebie stwarza roślinom warunki rozwoju.
- s. 91 27. Dyfuzja to proces samorzutnego mieszania się substancji pod wpływem chaotycznego ruchu cząsteczek. Zawsze prowadzi do wyrównywania się stężeń.
- s. 92 28. Szybkość dyfuzji zależy od temperatury i stanu skupienia. W gazach zachodzi bardzo szybko, w cieczach znacznie wolniej, a w ciałach stałych w znikomym stopniu.
- s. 93 29. Dyfuzja pełni niezwykle ważne funkcje w przyrodzie i umożliwia utrzymywanie procesów życiowych.
- s. 93 30. Dyfuzja znalazła liczne zastosowania w życiu codziennym i w technice.



Już w czasach starożytnych zaobserwowano, że bursztyn potarty o sukno potrafi przyciągać drobne przedmioty, na przykład kawałki papieru. Ponieważ bursztyn po grecku nazywa się $\etaλεκτρον$ (*elektron*), ogół zjawisk tego typu nazywano elektrycznością. Najbardziej spektakularnym zjawiskiem elektrycznym, obserwowanym od najdawniejszych czasów, jest piorun.

Początkowo nie rozumiano istoty elektryczności. Sformułowanie jej podstawowych praw zajęło ludzkości setki lat. Dopiero na przełomie XIX i XX wieku odkryto, że materia zbudowana jest z cząstek elementarnych, które są nośnikami ładunków elektrycznych. Te zaś odpowiadają nie tylko za obserwowane od wieków zjawiska elektryczne, lecz także za spójność i właściwości wszelkich form materii, którą widzimy wokół nas.

Swoją przygodę z elektrycznością rozpoczniemy od elektrostatyki, nauki o ładunkach nieruchomych. W następnej klasie pogłębisz swoje wiadomości o prądzie elektrycznym – uporządkowanym ruchu ładunków elektrycznych. Później poznasz dokładniej magnetyzm – zjawisko towarzyszące przepływowi prądu elektrycznego.

3. Elektrostatyka

- ▶ Ładunek elektryczny. Zasada zachowania ładunku
- ▶ Prawo Coulomba
- ▶ Pole elektryczne
- ▶ Obserwacja linii pola elektrycznego
- ▶ Zachowanie się ładunków na przewodniku
- ▶ Kondensatory
- ▶ Analiza tekstu: Coulomb i jego poprzednicy



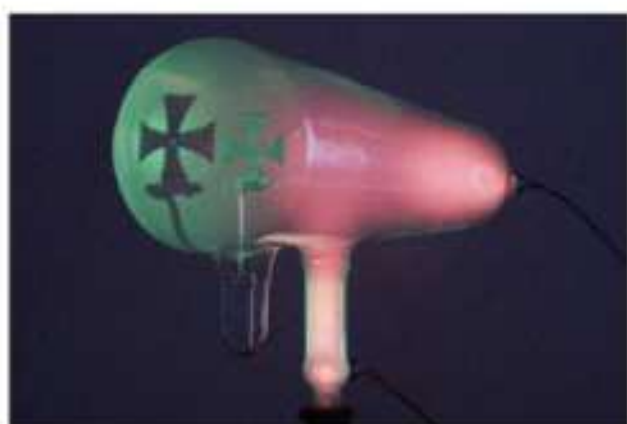
3.1. Ładunek elektryczny. Zasada zachowania ładunku

NA TEJ LEKCJI

- przypomnisz sobie pojęcie ładunku elementarnego oraz sposoby elektryzowania ciał,
- poznasz jedno z najbardziej fundamentalnych praw przyrody – zasadę zachowania ładunku.

Budowa materii a elektryczność

Niemal do końca XIX wieku panowało przekonanie, że elementarnymi cegiełkami materii są atomy poszczególnych pierwiastków. Uważano je za niepodzielne, w związku z czym nikt nie zadawał sobie pytania, z czego są zbudowane atomy.



Rys. 1. Promienie katodowe – strumień elektronów, który uderzając w szkło naprzeciwko katody, powoduje jego świecenie.



Rys. 2. Joseph John Thomson (1856–1940), wybitny fizyk angielski. Za zbadanie natury promieni katodowych i odkrycie elektronu w 1906 roku otrzymał Nagrodę Nobla.

Jednocześnie od wieków dostrzegano, że istnieją dwa rodzaje elektryczności, które nazwano początkowo „żywiczną” i „szklaną”, gdyż obie te substancje elektryzowały się w odmienny sposób podczas pocierania. Sądzone, że za elektryzowanie się ciał odpowiadają dwa tajemnicze fluidy, które potrafią się nawzajem unicestwiać. W 1743 roku amerykański uczone i mąż stanu, **Benjamin Franklin** (czyt. bendżamin franklin, 1706–1790) zaproponował teorię, według której istnieje jeden rodzaj fluidu elektrycznego, którego nadmiar powoduje dodatnie naelektryzowanie ciała, a niedomiar – naelektryzowanie ujemne. Uczony ten wprowadził do języka nauki pojęcia ładunku elektrycznego, baterii, bieguna dodatniego i ujemnego oraz wynalazł piorunochron. Ustalił też umowny kierunek przepływu prądu elektrycznego: „od plusa do minusa”.

W połowie XIX wieku odkryto promienie katodowe – promieniowanie emitowane przez ujemną elektrodę (katodę) w rurce próżniowej. Promieniowanie to powodowało świecenie szkła naprzeciwko katody i wykazywało szereg innych fascynujących właściwości. W 1897 roku znakomity fizyk angielski **Joseph John Thomson** (czyt. dżozef dżon tomson) ustalił, że promienie katodowe to strumień cząstek naładowanych ujemnie, a ich masa i ładunek nie zależą od materiału, z którego wykonano katodę. Cząstki te nazwano elektronami i stwierdzono, że są one elementami składowymi atomów wszystkich pierwiastków. Atomy okazały się więc podzielne. W późniejszych latach odkryto inne cząstki elementarne, przy czym stwierdzono, że niektóre z nich są naładowane. Dzięki temu wiemy obecnie, że nośnikiem elektryczności nie jest tajemniczy fluid, tylko



cząstki otaczającej nas materii. To pozwala na sformułowanie podstawowej tezy dotyczącej budowy materii.

Cała otaczająca nas materia zbudowana jest z cząstek elementarnych. Jedne z nich mają ładunki ujemne, inne dodatnie, a jeszcze inne są elektrycznie obojętne.

podstawowe
składniki materii

Współczesna fizyka zna wiele rodzajów cząstek. Do podstawowych budulców materii należą protony, neutrony i elektrony. **Protony** mają ładunki dodatnie i stosunkowo dużą masę. Pojedynczy proton stanowi jądro wodoru. Jądra cięższych pierwiastków zbudowane są z większej liczby protonów i elektrycznie obojętnych **neutronów**. Masa neutronu jest niemal równa masie protonu. **Elektrony** są prawie 2000 razy lżejsze od protonów i neutronów. Mają ładunek ujemny. Okrążają jądra atomowe, tworząc tzw. chmurę elektronową. W metalach elektrony łatwo oddzielają się od jąder atomowych i mogą się przemieszczać w strukturze krystalicznej, stanowiąc nośniki prądu elektrycznego. Przemieszczają się one „od minusa do plusa”, czyli odwrotnie, niż założył Franklin, nie znając wówczas prawdziwej natury elektryczności.

Ładunki elektryczne w fizyce oznaczamy zazwyczaj literami q lub Q . Jednostką ładunku jest **kulomb** (C). Z jednostką tą spotkałeś/spotkałaś się już w szkole podstawowej. Jej definicja zostanie przypomniana przy okazji omawiania prądu elektrycznego.

Wartości bezwzględne ładunków protonu i elektronu są równe i wynoszą $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C. Wartość tę nazywamy **ładunkiem elementarnym**. Każdy ładunek w przyrodzie jest wielokrotnością ładunku elementarnego:

ładunek
elementarny

$$q = n \cdot e,$$

gdzie n jest dowolną liczbą naturalną.

Ładunki tego samego znaku nazywamy **jednoimiennymi**. Ładunki przeciwnych znaków noszą nazwę **różnoimiennych**. Ładunki jednoimiennie się odpychają, a różnoimiennie – przyciągają. Cząstki nienaładowane nie oddziałują elektrycznie z cząstkami naładowanymi.

Oddziaływania elektryczne między dodatnio naładowanymi jądrami a ujemnie naładowanymi elektronami powodują, że atomy mogą w ogóle istnieć i łączyć się ze sobą w większe struktury – sieci krystaliczne i związki chemiczne. Siły spójności, przylegania i tarcia oraz inne oddziaływania bezpośrednie również tłumaczymy występowaniem sił elektrycznych pomiędzy atomami przylegającymi do siebie ciał. Gdyby nie oddziaływania elektryczne, otaczające nas przedmioty rozsypałyby się na poszczególne cząstki elementarne i jądra atomowe.

Przykład

Atom wodoru waży około $1,66 \cdot 10^{-24}$ g. Oblicz, jaki ładunek mają wszystkie jądra zawarte w 1 g wodoru.

Rozwiązanie

Znając masę pojedynczego atomu, możemy obliczyć, jaka liczba atomów wodoru



stanowi 1 g tej substancji:

$$n = \frac{1}{1,66 \cdot 10^{-24}} = 6,02 \cdot 10^{23}$$

W takim razie łączny ładunek jąder w 1 g wodoru wynosi:

$$q = ne, \quad q = 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} = 9,64 \cdot 10^4 \text{ C}$$



Chcesz wiedzieć więcej?

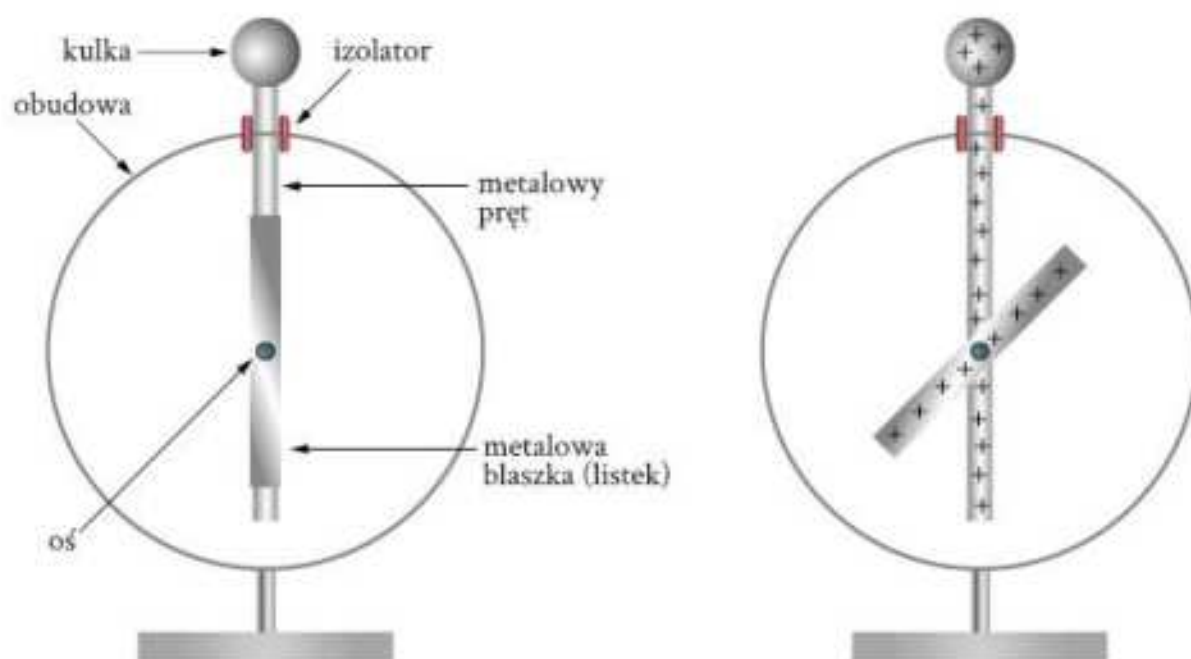
Według współczesnej wiedzy protony i neutrony nie są cząstkami elementarnymi, gdyż składają się z jeszcze mniejszych elementów – kwarków. Kwarki mają ładunki ułamkowe wynoszące, w zależności od typu kwarku, $+\frac{2}{3}e$ lub $-\frac{1}{3}e$. Kwarki łączą się zawsze w taki sposób, że sumaryczny ładunek powstałej struktury wynosi 0 lub jest wielokrotnością ładunku elementarnego. Pojedynczego kwarku nie sposób wyodrębnić. Próba rozbicia np. protonu na części wymaga dostarczenia tak wielkiej energii, że zgodnie ze słynnym wzorem $E = mc^2$ wystarcza ona na wyprodukowanie dodatkowych kwarków, które łączą się z fragmentami rozbitego protonu, tworząc na powrót cząstki o ładunku całkowitym.

Elektron według współczesnej wiedzy jest rzeczywiście cząstką elementarną – nie ma wewnętrznej struktury.

Sposoby elektryzowania ciał

Rozwiązany powyżej przykład uzmysławia, że ilość otaczających nas ładunków elektrycznych jest ogromna. Każdy gram materii zawiera dziesiątki tysięcy kulombów ładunków dodatnich zawartych w jądrach atomowych i tyle samo ładunków ujemnych w postaci okrążających te jądra elektronów. W normalnych warunkach liczba protonów w ciele jest idealnie równa liczbie elektronów i takie ciało nazywamy obojętnym elektrycznie. Istnieją jednak sposoby, by naruszyć tę równowagę. Czynność taką nazywamy **elektryzowaniem ciała**. Jeśli naelektryzujemy przewodnik, wprowadzony ładunek rozmieści się na całej jego powierzchni. W naelektryzowanym izolatorze ładunek pozostaje tam, gdzie go wprowadziliśmy.

O metodach elektryzowania ciał była już mowa w szkole podstawowej. Obecnie wykonamy kilka doświadczeń dla przypomnienia. Fakt naelektryzowania ciała najlepiej wykryć za pomocą znanego ci już ze szkoły podstawowej **elektroskopu**. Przypomnijmy, że jego zasadniczym elementem jest lekka aluminiowa wskazówka, zwana listkiem, mogąca się obracać wokół osi przytwierdzonej do metalowego pręta zakończonego kulką lub płytką. Całość umieszczona jest w izolującej przezroczystej obudowie, przy czym na jednej ze ścianek znajduje się zazwyczaj skala. Koniec pręta z kulką wyprowadzony jest na zewnątrz obudowy. Gdy elektroskop jest naładowany, wskazówka odchyła się od pręta tym silniej, im większa jest wartość ładunku. Znak ładunku nie ma przy tym znaczenia.



Rys. 3. Budowa i zasada działania elektroskopu.

Doświadczenie 1.

Pomoce: laska ebonitowa, laska szklana, wełna, jedwab lub papier, skrawki papieru, długie i cienkie wstęgi bibuły zawieszone lub przytwierdzone do jakiegoś ciała, kulka styropianowa zawieszona na jedwabnej nitce na statywie, elektroskop. Pocieramy laskę ebonitową o wełnę. Zbliżamy ją do leżących na stole skrawków papieru, do zwisających wstęg bibuły, do styropianowej kulki wiszącej na nitce oraz do elektroskopu. Co zauważasz?

Laskę szklaną pocieramy o jedwab, celofan lub papier. Dalej postępujemy z nią analogicznie jak z laską ebonitową. Co zauważasz?



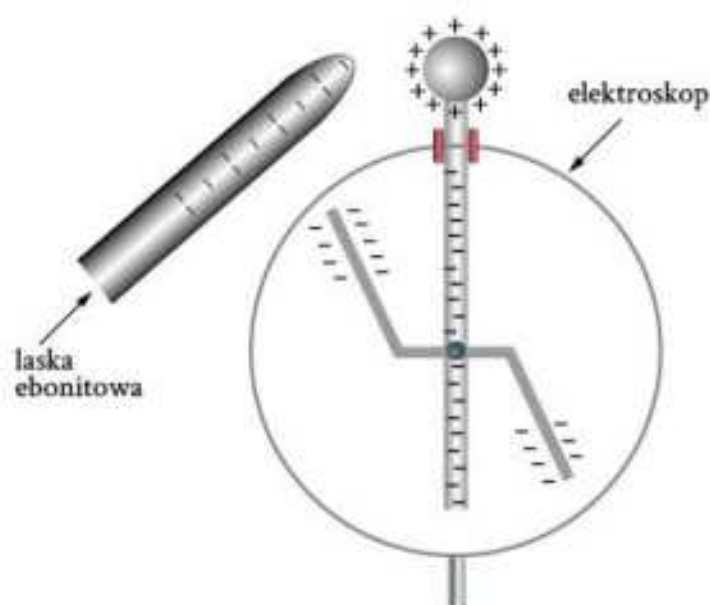
Rys. 4. Oddziaływanie naelektryzowanej laski z bibułą, kulką styropianową i elektroskopem.



3. ELEKTROSTATYKA

elektryzowanie przez pocieranie

Doświadczenie dowodzi przede wszystkim, że pocieranie ebonitu o wełnę i szkła o papier powoduje ich naelektryzowanie. Jest to tzw. **elektryzowanie przez pocieranie**. Polega ono na mechanicznym usuwaniu elektronów z wełny lub szkła i przemieszczaniu ich do ebonitu lub papieru. W efekcie ebonit i papier ładują się ujemnie,



Rys. 5. Elektryzowanie przez indukcję.

a szkło i wełna – dodatnio. Podobnie dzieje się podczas zdejmowania swetra przez głowę. Często czujemy wtedy lekkie ułucia i słyszymy trzaski. Sweter i nasze włosy elektryzują się przez pocieranie ładunkami przeciwnych znaków.

Oddzielnego wyjaśnienia wymaga fakt, że przedmiot naelektryzowany potrafi przyciągać przedmioty elektrycznie obojętne. Najlepiej wytłumaczyć to na przykładzie z elektroskopem, rys. 5. Wskazówka elektroskopu się wychyliła, mimo że zaledwie zbliżyliśmy do niego naelektryzowaną ujemnie laskę. Jej obecność spowodowała odepchnięcie elektronów z kulki w głąb elektroskopu, na pręt i listek. Pręt i przylegająca do niego wskazówka mają teraz taki sam

elektryzowanie przez wpływ (indukcję)

ładunek i odpychają się wzajemnie. Jedna część elektroskopu naładowała się dodatnio, a druga – ujemnie. Taki rodzaj elektryzowania nazywamy **elektryzowaniem przez wpływ** albo przez **indukcję**. Gdybyśmy do elektroskopu zbliżyli ciało naładowane dodatnio, efekt byłby podobny – z tą różnicą, że elektrony zbliżyłyby się do naładowanego ciała, a w bardziej oddalonej części elektroskopu przeważałby ładunek dodatni, powodując wychylenie wskazówki.

Podobnie dzieje się z każdym ciałem, do którego zbliżymy inne ciało naładowane. Jeśli mamy do czynienia z przewodnikiem, elektrony przemieszczają się w taki sposób, że bliżej ciała naładowanego pojawia się nadmiar ładunku przeciwnego znaku, który jest przyciągany. Ładunki tego samego znaku są wprawdzie odpychane, ale słabiej, gdyż znajdują się dalej. W sumie ciało, które było dotąd elektrycznie obojętne, elektryzuje się przez wpływ w taki sposób, że ulega przyciąganiu przez ciało naelektryzowane. W izolatorach elektrony nie mogą się wprawdzie przemieszczać swobodnie, ale mogą nieco zmieniać swoje położenie wewnątrz atomów i efekt jest podobny. To wyjaśnia, dlaczego naelektryzowana laska szklana lub ebonitowa potrafi przyciągać obojętny elektrycznie papier lub styropian.

Doświadczenie 2.

Pomoce: laska szklana i ebonitowa, wełna i papier, jedwab lub celofan, dwa elektroskopy, rozbrajacz.

Laskę ebonitową elektryzujemy przez pocieranie za pomocą wełny. Następnie dotykamy nią jednego z elektroskopów.

Obserwacja: elektroskop naładował się w sposób trwały.

Laskę szklaną elektryzujemy przez pocieranie za pomocą jedwabiu, papieru lub celofanu. Dotykamy nią drugiego elektroskopu.

Obserwacja: elektroskop również naładował się w sposób trwały.



Jeśli elektroskopy nie są naładowane w jednakowym stopniu, proces elektryzowania powtarzamy do momentu, aż wychylenia obydwu będą mniej więcej jednakowe. Następnie łączymy je rozbrajaczem.

Obserwacja: listki elektroskopów opadły.

Wniosek: oba elektroskopy były naładowane ładunkami przeciwnych znaków.

Wykonując powyższe doświadczenie, odkryliśmy kolejną metodę **elektryzowania** ciała: **przez dotyk**. Ciało naelektryzowane, dotykając innego ciała, przekazuje mu część swojego ładunku. Jeśli ciało dotknięte jest przewodnikiem, ładunek rozmieszcza się po całej jego powierzchni, a jeśli jest izolatorem – ładunek pozostaje w miejscu dotknięcia.

elektryzowanie
przez dotyk

Zasada zachowania ładunku

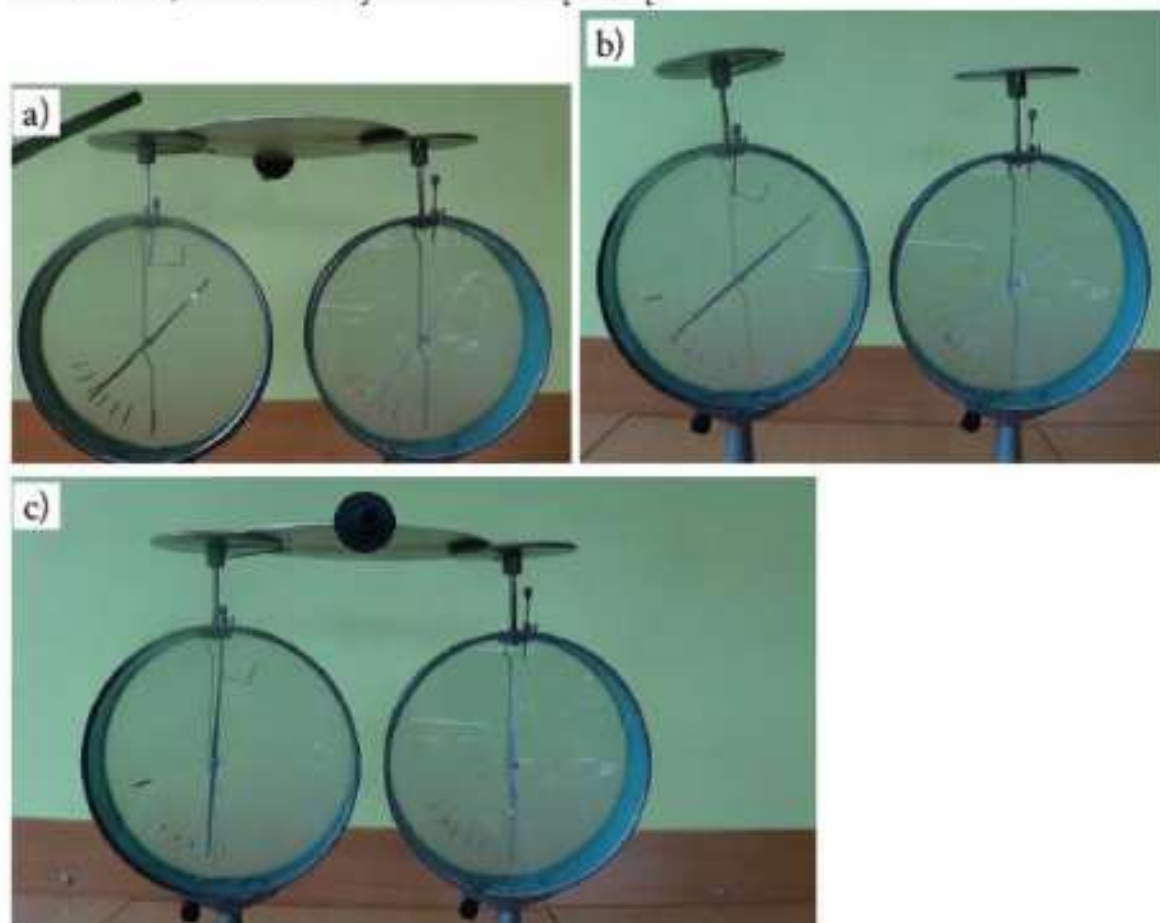
Doświadczenie 3.

Pomocze: dwa elektroskopy, rozbrajacz lub inny przewodnik z izolowanym uchwytem, laska ebonitowa, wełna.

Dwa elektroskopy ustawiamy obok siebie i łączymy je rozbrajaczem lub innym przewodnikiem (np. metalową płytą) na izolującym uchwycie. Następnie do jednego z elektroskopów zbliżamy naładowaną ujemnie laskę ebonitową.

Obserwacja: listki obydwu elektroskopów się wychyliły.

Następnie usuwamy przewodnik łączący elektroskopy (trzymając go za uchwyt z izolatora) i odsuwamy naładowaną laskę.



Rys. 6. Doświadczenie 3. a) połączone elektroskopy naelektryzowane przez indukcję, b) rozdzielenie elektroskopów powoduje ich trwałe naelektryzowanie, c) po połączeniu elektroskopów ich listki opadają.



Obserwacja: listki obydwu elektroskopów pozostają wychylone pomimo braku ciała naelektryzowanego w pobliżu.

Teraz łączymy obydwie elektroskopy przewodnikiem trzymanym za uchwyt z izolatora.

Obserwacja: listki obydwu elektroskopów opadają.

Zanim zinterpretujemy wyniki doświadczenia, musimy wprowadzić pojęcie układu elektrycznie izolowanego. **Układ izolowany** to ciało lub układ ciał, do którego nie dopływają ładunki z zewnątrz, ani też żadne ładunki z niego nie wypływają. Taki układ może być fizycznie izolowany za pomocą izolatora, ale może też być dowolnym układem ciał wyodrębnionym myślowo z otoczenia, o którym wiemy, że nie wymienia z otoczeniem ładunków elektrycznych. Takim układem może być nasze ciało i sweter, który mamy na sobie, o ile stoimy na podłodze w butach z izolatora. Takim układem jest laska ebonitowa i welna służąca do jej pocierania lub laska szklana i tkanina z jedwabiu. Taki układ stanowią wreszcie dwa elektroskopy połączone przewodnikiem lub elektroskop i dotykająca go laska ebonitowa.

We wszystkich opisanych doświadczeniach nie doszło do wytworzenia ładunków ani ich zniszczenia, a jedynie do ich rozdzielenia lub połączenia. Elektrony z welny przemieściły się na pocieraną laskę ebonitową. Laska naładowała się ujemnie, a welna – dodatnio. Wartości bezwzględne ładunków na lasce i welnie są jednakowe, a ich suma wynosi zero. Dotykając naładowaną laskę obojętny elektroskop, powodujemy przekazanie części ładunku do elektroskopu. Po tej czynności sumaryczny ładunek laski i elektroskopu jest taki sam, jak początkowy ładunek laski. W ostatnim doświadczeniu nastąpiło przemieszczenie ładunku z jednego elektroskopu na drugi. Po usunięciu łączącego je przewodnika elektroskopy zachowały trwale naelektryzowanie. Gdy połączyliśmy je z powrotem, naelektryzowanie znikło – suma ładunków na obydwu elektroskopach podczas całego przebiegu doświadczenia wynosiła zero. Uogólniając te spostrzeżenia, możemy sformułować jedno z najbardziej fundamentalnych praw przyrody – zasadę zachowania ładunku:

zasada zachowania
ładunku

W układzie izolowanym elektrycznie suma ładunków elektrycznych nie może ulec zmianie.

Największym możliwym do wyobrażenia układem izolowanym jest cały Wszechświat. Zasada zachowania ładunku stwierdza więc, że nie istnieje żadne zjawisko, w wyniku którego całkowity ładunek elektryczny Wszechświata mógłby ulec zmianie.



Chcesz wiedzieć więcej?

Zasada zachowania ładunku nie jest równoważna stwierdzeniu, że cząstki naładowane są niezniszczalne ani nie mogą powstawać. Wprost przeciwnie. Fizyka jądrowa i fizyka cząstek elementarnych zna wiele zjawisk, w których cząstki się zamieniają jedno w drugie. We wczesnych etapach ewolucji Wszechświata cała materia, w tym cząstki naładowane, powstała w wyniku tzw. Wielkiego Wybuchu. W gwiazdach zachodzą reakcje syntezy jądrowej, w wyniku której z jąder lżejszych pierwiastków powstają jądra cięższych pierwiastków z jednoczesną emisją różnych cząstek elementarnych. W elektrowniach jądrowych następuje rozpad jąder pierwiastków rozszczepialnych na mniejsze fragmenty z możliwością przemiany jednych cząstek w drugie. Podobnie się dzieje podczas rozpadów promieniotwórczych. Zjawiska takie nie przebiegają jednak w sposób dowolny. Pojawieniu się lub zniknięciu cząstki naładowanej zawsze towarzyszy pojawienie się lub zniknięcie cząstki o ładunku przeciwnego znaku. Chociaż liczba cząstek elementarnych we Wszechświecie zmienia się w sposób dynamiczny, całkowity ładunek Wszechświata od miliardów lat pozostaje stały i wszystko wskazuje na to, że wynosi zero.



ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Dwie identyczne kulki metalowe zostały naelektryzowane: pierwsza ładunkiem $+100 \text{ nC}$, druga ładunkiem -500 nC . Kulki na chwilę zetknięto, a następnie rozsunęto na pewną odległość. Oblicz, jaki ładunek będzie się znajdował na każdej z kulek po wykonaniu tych czynności.
2. Aluminiowa moneta waży $1,5 \text{ g}$. W skład jądra aluminium wchodzi 13 protonów i 14 neutronów. Oblicz, jaki sumaryczny ładunek miałaby ta moneta, gdyby z co tysięcznego atomu usunąć jeden elektron. Przyjmij, że masy protonów i masy neutronów są równe $1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.
3. Moneta z poprzedniego zadania została naładowana ładunkiem $+10^{-6} \text{ C}$. Oblicz, ile procent elektronów zostało usuniętych z monety.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Podstawowymi składnikami materii są dodatnio naładowane protony, obojętne elektrycznie neutrony oraz naładowane ujemnie, lekkie elektrony. s. 103
- Ładunki elektryczne protonu i elektronu są co do wartości bezwzględnej równe i noszą nazwę ładunku elementarnego. s. 103
- Wszystkie ładunki elektryczne w przyrodzie są wielokrotnością ładunku elementarnego. s. 103
- Znamy trzy podstawowe sposoby elektryzowania ciał: przez pocieranie, przez dotyk i przez indukcję. s. 106
- W układzie izolowanym elektrycznie suma ładunku elektrycznego nie może ulec zmianie. Jest to treść zasady zachowania ładunku. s. 108



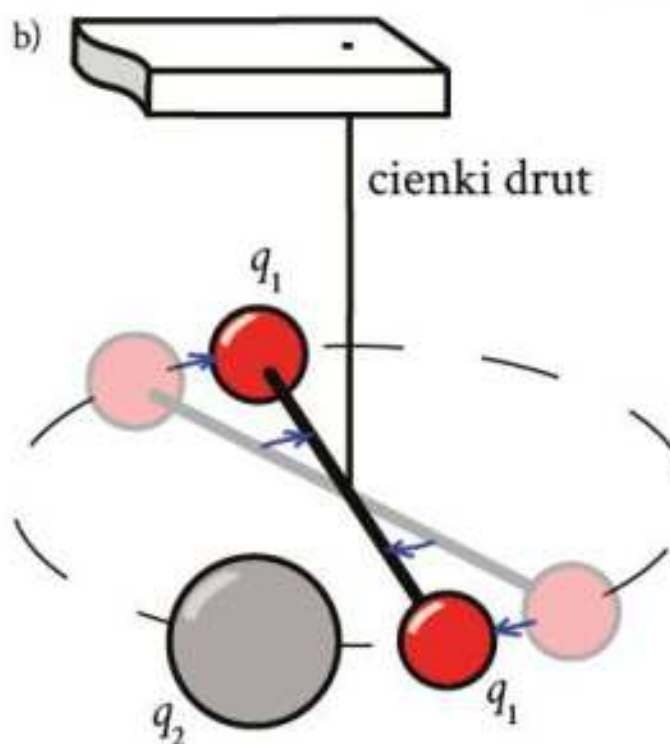
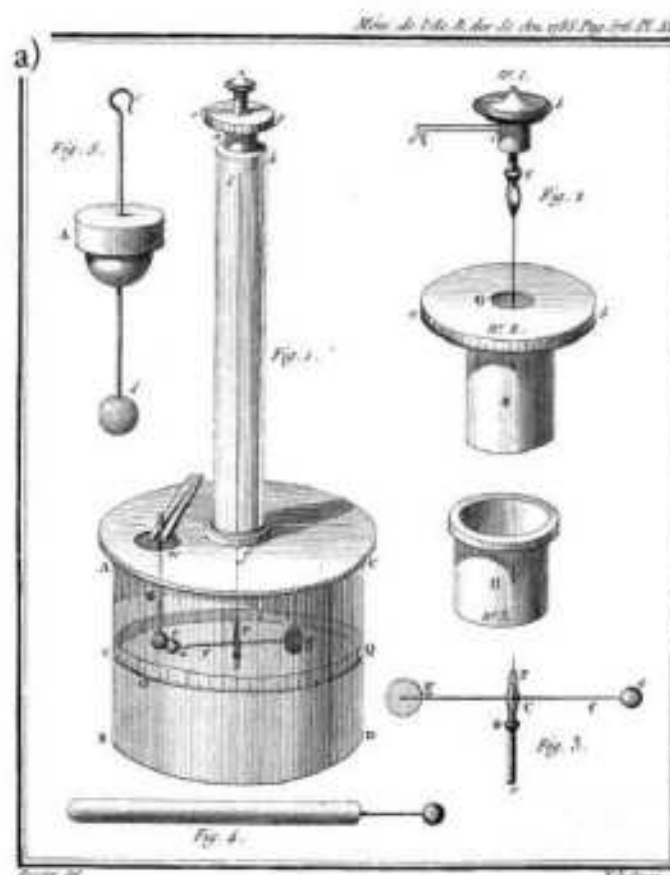
3.2. Prawo Coulomba

NA TEJ LEKCJI

- poznasz ilościowe prawo opisujące oddziaływania elektryczne – prawo Coulomba,
- nauczysz się stosować prawo Coulomba do obliczeń.

Dotychczas analizowaliśmy oddziaływania elektrostatyczne ładunków jedynie w sposób jakościowy. Wiemy, że ładunki różnoimienne się przyciągają, a jednoimienne odpychają. Od czego jednak zależy wartość siły tych oddziaływań? Na to pytanie po raz pierwszy prawidłowo odpowiedział fizyk francuski **Charles Augustin Coulomb** (czyt. szarł ogustę kulą; 1736–1806) w 1785 roku. To od jego nazwiska pochodzi nazwa jednostki ładunku w układzie SI.

Do swojego eksperymentu Coulomb użył niezwykle czułego urządzenia, tzw. **wagi skreń**. Jej zasadniczym elementem był cienki drut. U dołu drutu zawieszona była pozioma igła zakończona z obu stron kulkami metalowymi. Całość umieszczono w szklanej obudowie z pokrywką z otworem. Coulomb ładował kulki zawieszone na drucie różnymi ładunkami. Przez otwór zbliżał do kulek inną kulę, również naładowaną różnymi ładunkami. Na skutek przyciągania lub odpychania elektrostatycznego drut skręcał się o pewien kąt. Znając miarę tego kąta oraz współczynnik sprężystości drutu, Coulomb mógł wyliczyć wartość siły oddziaływania między kulkami. Znając zaś siłę, odległość między kulkami i wielkość umieszczonych na nich ładunków,



Rys. 7. a) Oryginalny szkic przedstawiający wagę skreń użytą przez Coulomba do pomiarów siły oddziaływań elektrostatycznych. b) Schemat ilustrujący zasadę działania wagi skreń.



mógł ustalić matematyczną zależność łączącą siłę, wielkość ładunków i odległość między nimi. Zależność tę nazywamy obecnie prawem Coulomba.

Prawo Coulomba

Dwa nieruchome punktowe ładunki elektryczne oddziałują wzajemnie siłami elektrostatycznymi o wartościach wprost proporcjonalnych do iloczynu wartości tych ładunków i odwrotnie proporcjonalnych do kwadratu odległości między nimi.

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

W powyższym wzorze q_1 i q_2 oznaczają wartości oddziałujących ładunków, r – odległość między ładunkami, a k to współczynnik proporcjonalności, zwany **stałą Coulomba**.

Jeśli ładunki umieszczone są w próżni lub w powietrzu, $k = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \frac{\text{m}^2}{\text{C}^2}$. Dla innych substancji otaczających ładunki wartość tego współczynnika okazuje się inna.

Jeśli porównamy powyższy wzór ze wzorem na siłę grawitacji, dostrzeżemy matematyczną analogię pomiędzy prawem Coulomba a prawem powszechnego ciążenia. Obydwa te prawa dotyczą oddziaływań między ciałami, lecz odnoszą się do różnych cech tych ciał. Siła grawitacji zależy wprost proporcjonalnie od iloczynu mas ciał, a siła elektrostatyczna – od iloczynu ich ładunków. Obie siły są odwrotnie proporcjonalne do kwadratu odległości między ciałami. Różnica jest taka, że znamy tylko jeden rodzaj masy i siła grawitacji może być tylko przyciągająca, natomiast istnieją dwa rodzaje ładunków elementarnych i siła elektrostatyczna może być zarówno przyciągająca, jak i odpychająca. Inne są również wartości współczynników proporcjonalności. Ich porównanie prowadzi do wniosku, że oddziaływanie elektrostatyczne jest bez porównania silniejsze od oddziaływania grawitacyjnego, co ilustruje poniższy przykład.

Przykład 1.

Porównaj siły oddziaływania elektrostatycznego i grawitacyjnego pomiędzy dwoma protonami. Masa protonu wynosi $1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

Rozwiązanie

Dane:

$$m_1 = m_2 = m_p = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$q_1 = q_2 = e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$k = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \frac{\text{m}^2}{\text{C}^2}$$

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \frac{\text{m}^2}{\text{kg}^2}$$

Nie podano odległości między protonami, ale my nie mamy obliczyć konkretnych sił, tylko je porównać. W tym celu wystarczy np. obliczyć stosunek siły elektrostatycznej do siły grawitacji.

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{k \frac{q_1 q_2}{r^2}}{G \frac{m_1 m_2}{r^2}} = \frac{k e^2}{G m_p^2}, \quad \frac{F_e}{F_g} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 1,6^2 \cdot 10^{-38}}{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 1,66^2 \cdot 10^{-54}} = 1,25 \cdot 10^{36}$$

prawo Coulomba

porównanie siły grawitacji i siły elektrostatycznej



Okazało się, że siła oddziaływania elektrostatycznego między protonami jest większa od siły oddziaływania grawitacyjnego o czynnik będący w przybliżeniu jedną z 36 zerami! Wynik ten nie szokuje, jeśli uświadomimy sobie, że aby wychylić wskazówkę elektroskopu, wystarczy niewielki ładunek, rzędu miliardowych części kulomba. Gdybyśmy chcieli wychylić wskazówkę elektroskopu za pomocą siły grawitacji, musielibyśmy użyć planety o masie porównywalnej z masą Ziemi! Siła grawitacji okazuje się całkowicie zaniedbywalna w porównaniu z siłą oddziaływań elektrostatycznych pomiędzy ciałami naładowanymi.

Przekształcając wzór wyrażający prawo Coulomba, możemy obliczyć dowolną zmienną występującą w tym wzorze, co ilustrują kolejne przykłady.

Przykład 2.

Oblicz odległość, z jakiej dwa ładunki $+1 \mu\text{C}$ będą się odpychać siłą 1 N .

Rozwiązanie

Dane:

$$q_1 = q_2 = q = 1 \mu\text{C} = 10^{-6} \text{ C}$$

$$F = 1 \text{ N}$$

Szukane:

$$r = ?$$

Przekształcamy wzór wyrażający prawo Coulomba:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} = k \frac{q^2}{r^2} \Rightarrow r^2 = k \frac{q^2}{F} \Rightarrow r = q \sqrt{\frac{k}{F}}$$

$$r = 0,095 \text{ m}$$

Odpowiedź: Aby dwa ładunki o wartości $1 \mu\text{C}$ odpychały się siłą 1 N , ich wzajemna odległość musi wynosić 95 mm .

Przykład 3.

Ilu elektronów brakuje każdemu z dwóch identycznych jonów dodatnich, które będąc w próżni w odległości $r = 10^{-8} \text{ m}$ od siebie, odpychają się z siłą $F = 2,074 \cdot 10^{-11} \text{ N}$?

Rozwiązanie

Dane:

$$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$r = 10^{-8} \text{ m}$$

$$F = 2,074 \cdot 10^{-11} \text{ N}$$

Szukane: $n = ?$

Jon dodatni to atom pozbawiony pewnej liczby elektronów. Z treści zadania wynika, że obydwu jonom brakuje tej samej liczby elektronów, którą oznaczamy jako n . Ładunek każdego jonu będzie więc równy ne . Wobec tego prawo Coulomba dla tych jonów możemy zapisać w postaci:

$$F = k \frac{n^2 e^2}{r^2} \Rightarrow n^2 = \frac{Fr^2}{ke^2} \Rightarrow n = \frac{r}{e} \sqrt{\frac{F}{k}}$$

$$n = 3$$

Odpowiedź: Każdemu jonowi brakuje 3 elektronów.



ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Oblicz, jak zmieniła się siła oddziaływania dwóch jednakowych kulek metalowych o jednościennych ładunkach q_1 i q_2 , przy czym $q_1 = 3q_2$, jeśli zetknięto je ze sobą, a następnie rozsunęto na poprzednią odległość.
2. Dwie kulki naładowano identycznymi ładunkami q i rozsunęto na odległość d . Oblicz, o ile zmieni się siła oddziaływania tych kulek, jeśli porcję ładunku Δq zdejmujemy z jednej kulki i przekazemy drugiej.
- 3*. Ładunki $q_1 = 1 \mu\text{C}$ i $q_2 = 0,2 \mu\text{C}$ są od siebie oddalone o 2 metry. Wyznacz, w którym miejscu na prostej łączącej te ładunki znajduje się punkt, w którym siły działające na umieszczony tam trzeci ładunek będą się równoważyć.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Dwa nieruchome punktowe ładunki elektryczne oddziałują wzajemnie siłami elektrostatycznymi o wartościach wprost proporcjonalnych do iloczynu wartości tych ładunków i odwrotnie proporcjonalnych do kwadratu odległości między nimi. Jest to treść prawa Coulomba. s. III
- Oddziaływanie elektrostatyczne jest kilkadziesiąt rzędów razy silniejsze od oddziaływania grawitacyjnego. s. III

3.3. Pole elektryczne

NA TEJ LEKCJI

- poznasz podstawowe pojęcia związane z polem elektrycznym,
- nauczysz się rozpoznawać różne rodzaje pól elektrycznych na podstawie kształtu linii pola.

Podstawowe pojęcia dotyczące pola elektrycznego

Fizycy od dawna zadawali sobie pytania: Jak to się dzieje, że ładunki „wiedzą”, że mają oddziaływać, mimo że się nie stykają? Co jest nośnikiem oddziaływania na odległość? Pytania te dotyczą nie tylko oddziaływań elektrycznych. Analogiczne pojęcia wprowadza się również do opisu oddziaływań grawitacyjnych.

Wszelkie oddziaływania na odległość fizyka tłumaczy, wprowadzając pojęcie odpowiedniego pola. W przypadku oddziaływań elektrycznych zakładamy, że ładunek elektryczny zmienia wokół siebie właściwości przestrzeni w taki sposób, że jeśli w tej przestrzeni pojawi się inny ładunek elektryczny, to będzie na niego działać siła. Ładunek będący źródłem pola elektrycznego nazywamy **ładunkiem źródłowym**. Ładunek źródłowy będziemy na ogół oznaczać dużą literą Q .



pole elektryczne

pole elektrostatyczne

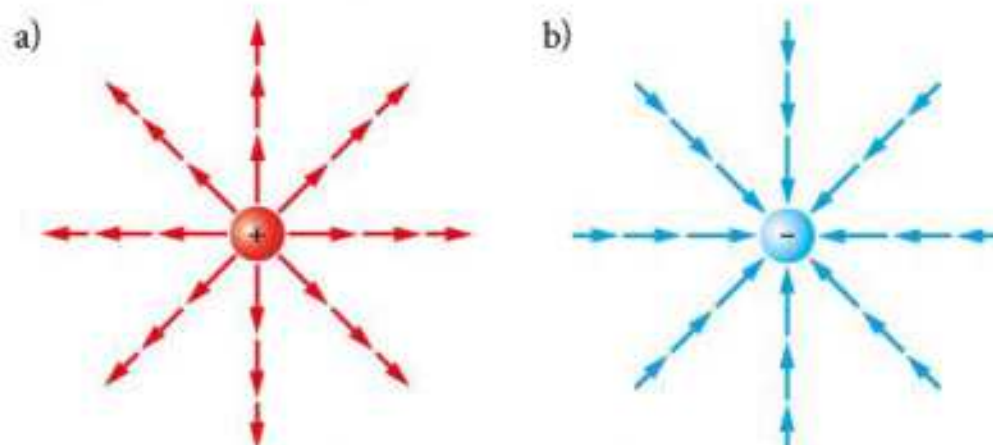
ładunek próbny

Pole elektryczne jest to właściwość przestrzeni wokół ładunku, zwanego ładunkiem źródłowym, polegająca na tym, że na inne umieszczone tam ładunki działa siła wynikająca z wzajemnego oddziaływania ładunków elektrycznych (prawa Coulomba).

Pole elektryczne, którego źródłem są ładunki spoczywające, nazywamy **polem elektrostatycznym**. Na najbliższych lekcjach będziemy się zajmować **wyłącznie takim przypadkiem pola elektrycznego**.

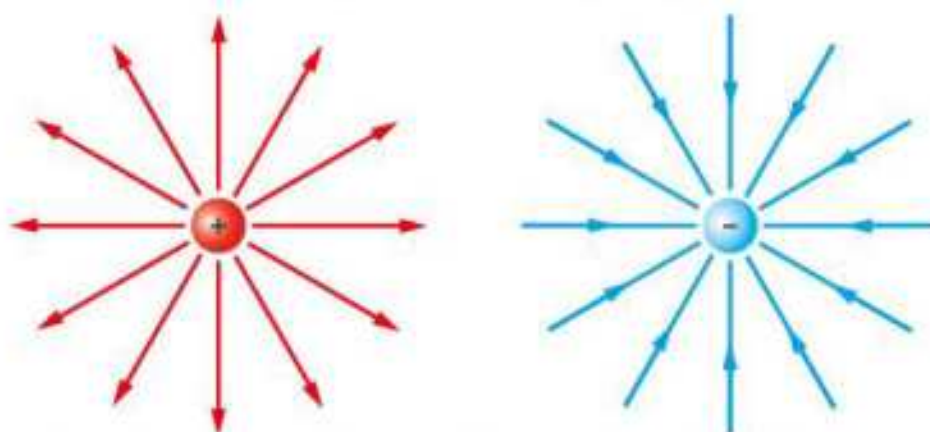
Aby więc stwierdzić, czy w jakimś miejscu występuje pole elektryczne, należy umieścić tam ładunek elektryczny i zbadać, czy działa na niego siła. Ładunek taki nazywamy **ładunkiem próbnym** i oznaczamy małą literą q . Umawiamy się przy tym, że ładunek próbny ma zawsze znak dodatni. Ponadto zakładamy, że jego wartość jest dużo mniejsza niż wartość ładunku źródłowego. Chodzi o to, by pole elektryczne wytwarzane przez ładunek próbny (a każdy ładunek wytwarza swoje własne pole) było na tyle słabe, aby nie zaburzało pola ładunku źródłowego, które chcemy zbadać.

Spójrzmy na obszar wokół ładunku źródłowego i zbadajmy, jak będą wyglądały wektory sił elektrycznych działających na ładunek próbny umieszczony w różnych miejscach, rys. 8. Jeśli ładunek źródłowy będzie mieć znak dodatni, ładunek próbny będzie odpychany z siłą tym mniejszą, im większa będzie odległość od ładunku źródłowego. Jeśli ładunek źródłowy będzie ujemny, zwrot wektorów sił będzie przeciwny – skierowany w stronę źródła pola.



Rys. 8. Wektory sił elektrycznych działających na ładunek próbny umieszczony w różnych miejscach w pobliżu ładunku źródłowego o znaku: a) dodatnim, b) ujemnym.

Widzimy, że wektory te układają się wzdłuż pewnych linii (w tym przypadku półprostych), które nazywamy liniami pola elektrycznego, rys. 9. Linie te „wychodzą” z ładunków dodatnich i „wchodzą” do ładunków ujemnych.



Rys. 9. Linie pola elektrycznego, którego źródłem są ładunki punktowe.



linie pola
elektrycznego

Liniami pola elektrycznego nazywamy linie w każdym punkcie styczne do wektora siły elektrycznej działającej na dodatni ładunek próbny umieszczony w tym punkcie. Zwrot linii pola jest zgodny ze zwrotem wektora siły.

Innymi słowy, linie pokazują nam lokalny kierunek pola elektrycznego, czyli kierunek, w którym ładunek próbny będzie w danym punkcie przyciągany lub odpychany.

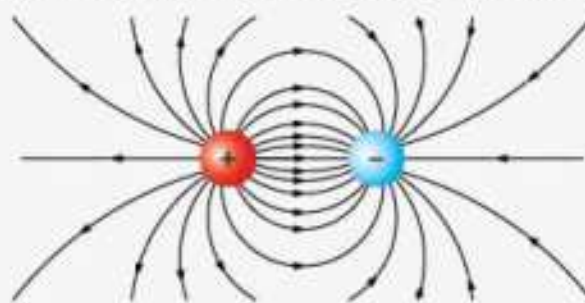
Rodzaje pól elektrycznych

Linie pola elektrycznego mogą mieć różne kształty. Bywają one skomplikowane, zwłaszcza w przypadkach, gdy źródłem pola jest układ wielu ładunków. Wtedy lokalny kierunek linii pola jest wskazywany przez wypadkowy wektor sił działających na ładunek próbny ze strony wszystkich ładunków źródłowych.

Rysunki 8. i 9. przedstawiają **pole centralne**. Jego źródłem jest ładunek punktowy, a linie pola są półprostymi rozchodzącymi się promieniście od ładunku źródłowego stanowiącego centrum pola. Zauważmy, że im bliżej źródła, tym bliżej siebie znajdują się linie pola, a jednocześnie siła oddziaływania na ładunek próbny jest większa. Jest to zasada ogólna: pole elektryczne jest „silniejsze” w punktach, w których linie pola przebiegają gęściej.

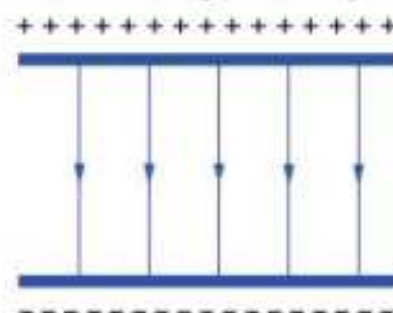
Chcesz wiedzieć więcej?

Ciekawym układem ładunków jest **dipol elektryczny** zbudowany z dwóch ładunków o tych samych wartościach bezwzględnych, lecz przeciwnych znakach. Jeśli w pobliżu dipola umieścimy ładunek próbny, będzie on odpychany przez jeden koniec dipola i przyciągany przez drugi. Dipolami stają się ciała obojętne elektrycznie, umieszczone w polu elektrycznym. Na przykład skrawek papieru w pobliżu naładowanej laski ebonitowej jest dipolem. Jego biegun dodatni znajduje się bliżej laski, a ujemny – dalej. Biegun dodatni jest silniej przyciągany, a ujemny – słabiej odpychany, dlatego ostatecznie skrawek papieru zostaje przyciągnięty do laski. Utworzenie dipola pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego nazywamy **polaryzacją**.



Rys. 10. Dipol elektryczny.

Ważnym przypadkiem pola elektrycznego jest **pole jednorodne**, występujące np. między dwiema równoległymi płytami naładowanymi ładunkami o przeciwnych znakach. Linie takiego pola mają postać równoległych odcinków zaczynających się na płycie dodatniej i biegnących prostopadle w stronę płyty ujemnej. Ponieważ linie pola są równoległe, w całym obszarze pola jednorodnego na ładunek będzie działać taka sama siła.



Rys. 11. Jednorodne pole elektryczne.

jednorodne pole
elektryczne



**Chcesz wiedzieć więcej?**

Wielkością fizyczną, która opisuje pole elektryczne w sposób ilościowy (czyli mówi, jak „silne” jest pole elektryczne), jest natężenie pola elektrycznego. Jest to stosunek siły, jaka działa w danym punkcie pola na ładunek próbny, do wielkości tego ładunku.

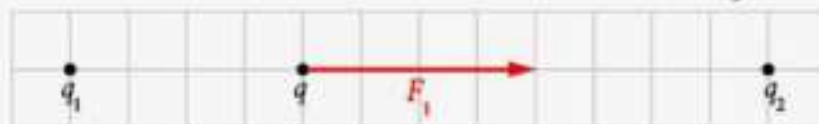
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

Jest to wielkość wektorowa. Kierunek i zwrot wektora natężenia pola jest taki sam, jak kierunek i zwrot siły działającej na ładunek dodatni. Jednostką natężenia pola elektrycznego jest $1 \frac{\text{N}}{\text{C}}$. Znając natężenie pola, ze wzoru $\vec{F} = q\vec{E}$ możemy obliczyć siłę, z jaką będzie ono działać na ładunek q .

Natężenie pola przyjmuje największe wartości w tych punktach pola, w których linie pola biegną najgęściej. Ponieważ w polu jednorodnym linie pola są równoległe, natężenie pola w każdym punkcie pola jednorodnego jest takie same.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wyjaśnij, dlaczego pole elektryczne działa również na ciała elektrycznie obojętne.
2. Ładunek dodatni q znajduje się na odcinku łączącym ładunki $q_1 = 2 \mu\text{C}$ i $q_2 = 3 \mu\text{C}$, przy czym jego odległość od ładunku q_2 jest 2 razy większa od odległości od ładunku q_1 . Na rysunku zaznaczono siłę, z jaką ładunek q_1 działa na ładunek q . Przerysuj rysunek do zeszytu i zachowując proporcje, zaznacz na nim siłę, z jaką na ładunek q działa ładunek q_2 .

**PODSUMOWANIE LEKCJI**

- s. 114 • Pole elektryczne to właściwość przestrzeni wokół ładunku, zwanego ładunkiem źródłowym, polegająca na tym, że na inne umieszczone tam ładunki działa siła elektrostatyczna.
- s. 114 • Pole elektrostatyczne to pole wytworzone przez ładunki spoczywające. Nie ulega ono zmianie w czasie.
- s. 114 • Mały ładunek dodatni, za pomocą którego wykrywamy istnienie pola elektrycznego, nazywamy ładunkiem próbnym.
- s. 115 • Pole elektryczne przedstawiamy graficznie za pomocą linii. Są to linie w każdym punkcie styczne do wektorów siły, jakie działają na ładunek próbny umieszczony w tym punkcie.
- s. 115 • Jeśli linie pola mają postać prostych równoległych, to takie pole nazywamy polem jednorodnym. W każdym punkcie pola jednorodnego na dany ładunek działa taka sama siła.



3.4. Obserwacja linii pola elektrycznego

NA TEJ LEKCJI

- wykonasz szereg doświadczeń obrazujących kształt linii pola elektrycznego,
- nauczysz się rozpoznawać typowe przypadki pól elektrycznych.

Linie pola elektrycznego nie są pojęciem czysto abstrakcyjnym. Możemy je zobaczyć, ale będziemy potrzebowali silnych pól. W warunkach szkolnych możemy je wytworzyć za pomocą takich urządzeń, jak generator Van de Graaffa lub **maszyna elektrostatyczna**. Budowa i zasada działania generatora Van de Graaffa zostanie przedstawiona na następnej lekcji, natomiast teraz przyjrzyjmy się maszynie elektrostatycznej.

Jest to urządzenie do wytwarzania wysokich napięć dzięki ładunkom gromadzonym na zasadzie indukcji elektrostatycznej. Składa się z dwóch tarcz wykonanych z izolatora, na których są naklejone na zewnątrz aluminiowe segmenty. Za pomocą korbki i specjalnej przekładni tarcze są wprawiane w ruch obrotowy w przeciwnych kierunkach (przeciwbieżny). Segmenty aluminiowe się elektryzują, a ładunki są za pomocą szczotek zbierane do specjalnych pojemników, zwanych butelkami lejdejskimi. Stanowią one rodzaj kondensatorów (magazynów ładunku), o których będziesz się uczyć niebawem. Ładunki z butli lejdejskich są wyprowadzane do iskiernika w postaci 2 kulek na metalowych prętach. Iskiernika można użyć do demonstracji widowiskowych wyładowań elektrycznych lub (po większym rozchyleniu) jako źródła wysokiego napięcia elektrycznego.



Rys. 12. Maszyna elektrostatyczna.

Doświadczenie 1.

Pomoce: maszyna elektrostatyczna lub generator Van de Graaffa, kula metalowa na statywie z izolatora, paski bibuły, taśma klejąca lub klej, przewody.

Paski bibuły przyklej na powierzchni kuli metalowej, tworząc coś w rodzaju włosów. Połącz przewodem kulę z jedną z kulek iskiernika maszyny elektrostatycznej lub z czaszą generatora Van de Graaffa. Uruchom maszynę lub generator. Obserwacja: paski bibuły uniosły się promieniście we wszystkie strony.

Rys. 13. Demonstracja linii pola elektrycznego za pomocą generatora Van de Graaffa i pasków bibuły.





Bibuła naelektryzowała się od metalowej powierzchni, do której została przyklejona. Na paski bibuły działa siła ciężkości oraz siła elektrostatyczna. Paski oddziałują też między sobą. Nabierają one kształtu pod wpływem wypadkowej tych sił. Jeśli pole elektryczne jest silne, siła ciężkości ma niewielki wpływ na zachowanie się pasków i możemy uznać, że układają się one wzdłuż linii pola elektrycznego, w tym przypadku centralnego.

Doświadczenie 2.

Wykonaj po raz kolejny doświadczenie 1., ale tym razem zbliż rękę do pasków bibuły. Uważaj, aby nie dotknąć metalu. Nie jest to niebezpieczne, ale może być nieprzyjemne. Co zauważasz?



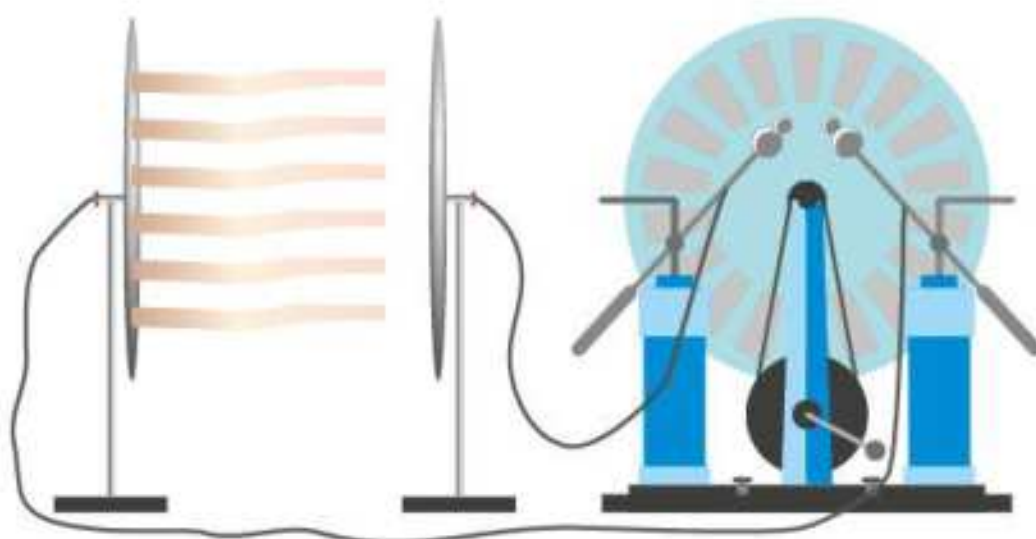
Rys. 14. Naładowany przewodnik oraz ręka, która ładuje się przez indukcję ładunkiem przeciwnego znaku.

Po zbliżeniu ręki widzimy, że paski bibuły kierują się w jej stronę. Czujemy też lekkie mrowienie, świadczące o tym, że jest ona naelektryzowana. Silne pole elektryczne przyciąga ładunki przeciwnego znaku. Ładunki elektryczne w naszym ciele przemieszczają się w taki sposób, że ręka staje się naładowana przeciwnie niż metalowa kula. Paski bibuły pokazują kształt linii pola elektrycznego wytworzonego przez dwa ładunki różnoimienne: rękę i metalową kulę. Zauważ, że jeśli jakiś pasek dotknie ręki, na ogół odskakuje, gdyż przejmuje ładunek tego samego znaku, co ręka. Po krótkiej chwili wraca w stronę ręki, gdyż ponownie elektryzuje się od kuli.

Doświadczenie 3.

Pomocze: maszyna elektrostatyczna, dwie metalowe tarcze zamocowane pionowo na izolujących statywach, paski bibuły, klej lub taśma klejąca, przewody.

Paski bibuły przyklejamy końcami równomiernie na powierzchni jednej z tarcz. Obie tarcze łączymy przewodami z przeciwnymi biegunami iskiernika maszyny elektrostatycznej. Tarcze ustawiamy równolegle, w odległości nieco większej niż długość pasków bibuły. Wprawiamy maszynę w ruch. Co obserwujemy?



Rys. 15. Obserwacja linii jednorodnego pola elektrycznego.

Pomijając wpływ pola grawitacyjnego, widzimy, że paski bibuły ułożyły się równolegle względem siebie, a prostopadle do obydwu tarcz metalowych. Stwierdzamy, że pomiędzy tarczami występuje jednorodne pole elektryczne.

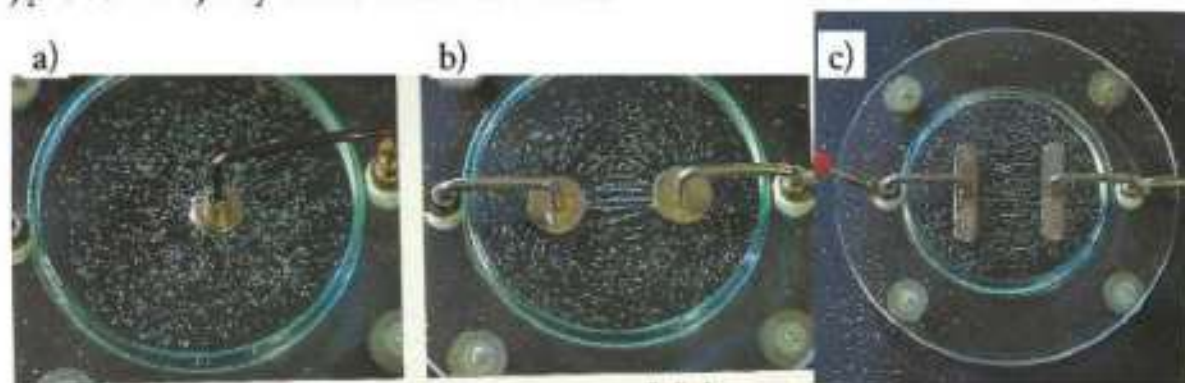
Powyższe doświadczenia wykonywane były w powietrzu, a warunki zewnętrzne (ruch powietrza, siła ciężkości działająca na paski, dotykane przez paski bibuły przypadkowych przedmiotów w otoczeniu) zakłócały ich przebieg. Użycie cieczy nieprzewodzących umożliwia dokonanie spokojniejszych obserwacji.

kształt linii pola elektrycznego w powietrzu

Doświadczenie 4.

Pomocze: płaskie naczynia szklane (szalki Petriego), elektrody o różnych kształtach, olej rycynowy, kasza manna, maszyna elektrostatyczna.

Do płaskiego naczynia nalewamy oleju rycynowego, a powierzchnię cieczy posypujemy ziarenkami kaszki. W naczyniu zanurzamy elektrody o różnych kształtach: jedną elektrodę walcową, dwie elektrody walcowe, dwie elektrody płaskie. Elektrody podłączamy do biegunów maszyny elektrostatycznej i uruchamiamy ją. Obserwujemy zachowanie ziarenek.



Rys. 16. Obserwacja linii pola na powierzchni cieczy nieprzewodzącej: a) pole centralne, b) pole wytworzone przez dwa ładunki różnoimienne, c) pole jednorodne.

Pod wpływem silnego zewnętrznego pola elektrycznego ziarenka kaszki naelektryzowały się przez indukcję i ułożyły się wzdłuż linii pola. Wpływ siły ciężkości na zachowanie ziarenek został wyeliminowany dzięki sile wyporu. Zmieniając kształt elektrod, możemy w sposób stabilny analizować rozkład linii pola w różnych przypadkach.

kształt linii pola elektrycznego w cieczy



PODSUMOWANIE LEKCJI

- s. 119 • Lekkie naelektryzowane wstęgi bibuły pokazują w powietrzu w przybliżeniu kształt linii pola elektrycznego.
- s. 119 • Kształt linii pola elektrycznego można też zbadać, analizując zachowanie lekkich przedmiotów pływających w nieprzewodzącej cieczy.

3.5. Zachowanie się ładunków na przewodniku

NA TEJ LEKCJI

- dowiesz się, w jaki sposób rozmieszczają się ładunki wprowadzone w obręb przewodnika,
- dowiesz się, jak działa klatka Faradaya i instalacja odgromowa,
- dowiesz się, jak należy się zachowywać w czasie burzy.

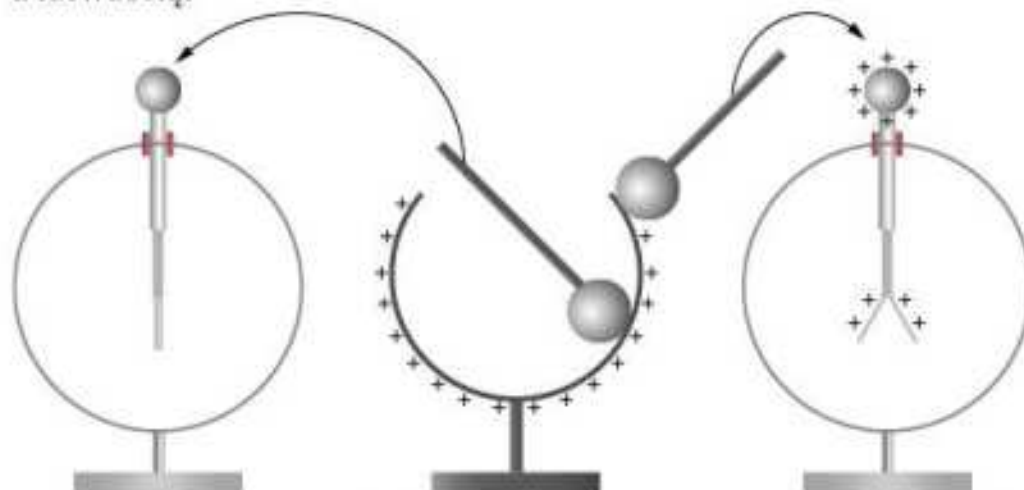
Rozmieszczenie ładunków w przewodniku

Doświadczenie 1.

Pomocze: maszyna elektrostatyczna lub generator Van de Graaffa, przewodnik kulisty, pusty w środku, z otworem u góry, umieszczony na podstawie z izolatora, dwie metalowe kulki na uchwycie z izolatora, dwa elektroskopy.

Za pomocą maszyny elektrostatycznej lub generatora elektryzujemy przewodnik kulisty. Następnie za pomocą kulki metalowej na izolującym uchwycie próbujemy przenieść ładunek z wnętrza przewodnika na jeden z elektroskopów. To samo robimy z drugą kulką i drugim elektroskopem, tym razem dotykając zewnętrznej powierzchni przewodnika.

Obserwacja: pierwszy elektroskop nie ładuje się. Drugi elektroskop ładuje się z łatwością.



Rys. 17. Przenoszenie ładunków z wewnętrznej i zewnętrznej części naładowanego przewodnika na elektroskopy.



Doświadczenie wykazało, że od wewnątrz przewodnik kulisty nie jest naładowany. Wielokrotne próby przeniesienia ładunku z wnętrza przewodnika na elektroskop nie odnoszą żadnego skutku. Natomiast z łatwością można naelektryzować elektroskop, dotykając kulką zewnętrznej powierzchni przewodnika, a następnie elektroskopu. Sugeruje to, że ładunek swobodny w przewodniku gromadzi się na jego powierzchni. Zbadajmy tę sprawę dokładniej, posługując się klatką Faradaya.

Klatka Faradaya jest to obudowa wykonana z gęstej siatki metalowej, ustawiona na specjalnej podstawie (rys. 18.). W górnej części klatki używanej do doświadczeń szkolnych znajduje się otwór, do którego można włożyć metalową zatyczkę, z której zwisa metalowy łańcuszek. Istnieje też wersja zatyczki wykonanej z izolatora.

klatka Faradaya

Doświadczenie 2.

Pomocze: maszyna elektrostatyczna lub generator Van de Graaffa, klatka Faradaya, dwa elektroskopy, przewody, krokodylki.

Mały elektroskop ustawiamy na podstawie klatki. Łączymy go za pomocą przewodu z krokodylkiem z czaszą generatora lub elektrodą iskiernika maszyny elektrostatycznej. Następnie elektroskop zakrywamy klatką Faradaya. Do górnego otworu wkładamy metalową zatyczkę tak, by łańcuszek dotykał kulki elektroskopu. Drugi elektroskop łączymy przewodem z zewnętrzną powierzchnią klatki. Możemy go też w ogóle nie łączyć – wystarczy, że będzie stał obok. Uruchamiamy maszynę elektrostatyczną lub generator i obserwujemy zachowanie się obydwu elektroskopów.

Obserwacja: elektroskop wewnątrz klatki w ogóle się nie wychyla, mimo że został połączony bezpośrednio przewodem ze źródłem ładunków. Elektroskop stojący na zewnątrz ładuje się natychmiast. Dzieje się tak nawet wtedy, gdy nie jest połączony przewodem z resztą układu. Oznacza to, że na zewnątrz klatki panuje bardzo silne pole elektryczne, w którym przedmioty ulegają naładowaniu przez indukcję.



Rys. 18. Układ doświadczalny do doświadczenia 2.



Spróbujmy zinterpretować wyniki powyższych doświadczeń. W przewodniku nienaładowanym znajduje się jednakowa ogromna liczba protonów i elektronów, będących w stanie równowagi. Wprowadzając w obręb przewodnika dodatkowy ładunek, zaburzymy tę równowagę. Ładunki tego samego znaku się odpychają, a więc starają się znaleźć jak najdalej od siebie. Tym najbardziej oddalonym miejscem na przewodniku jest jego powierzchnia. Tak więc cały ładunek wprowadzony na przewodnik gromadzi się na jego powierzchni. Wewnątrz przewodnika nie ma swobodnych ładunków ani pola elektrycznego. Gdyby ono istniało, spowodowałoby przemieszczenie się ładunków na powierzchnię. Dlatego też cały ładunek dostarczany przewodem do elektroskopu wewnątrz klatki natychmiast opuszczał elektroskop dzięki dotykającemu go łańcuszkowi. Gdyby zatyczkę metalową klatki zastąpić zatyczką izolującą, elektroskop naładowałby się. Klatka naładowała się na zewnątrz, wytwarzając silne pole elektryczne, w którym wychylała się wskazówka elektroskopu nawet niepołączonego przewodem z resztą układu.

**ładunki
w przewodniku**

Ładunek wprowadzony w obręb przewodnika gromadzi się na jego powierzchni. Wewnątrz przewodnika nie ma swobodnych ładunków ani pola elektrycznego.

Cały czas pamiętajmy, że w przewodnikach swobodę ruchu mają tylko elektrony. Ruch ładunków dodatnich należy interpretować umownie jako ruch ładunków ujemnych odbywający się w przeciwną stronę.

Klatka Faradaya znalazła liczne zastosowania wszędzie tam, gdzie wymagane jest zabezpieczenie urządzeń technicznych przed wpływem zewnętrznych pól elektrycznych. Na przykład przewody antenowe lub przesyłające sygnały są ekranowane, czyli oplecione cienką siateczką metalową, aby wyeliminować zakłócenia. Działania klatki Faradaya doświadczamy też, próbując słuchać radia lub rozmawiać przez telefon komórkowy w podziemiach dużych budynków. Metalowe pręty zbrojeniowe w ścianach i stropach piwnic stanowią rodzaj klatki Faradaya, tłumiąc fale radiowe i powodując brak zasięgu.



Chcesz wiedzieć więcej?

Generator Van de Graaffa

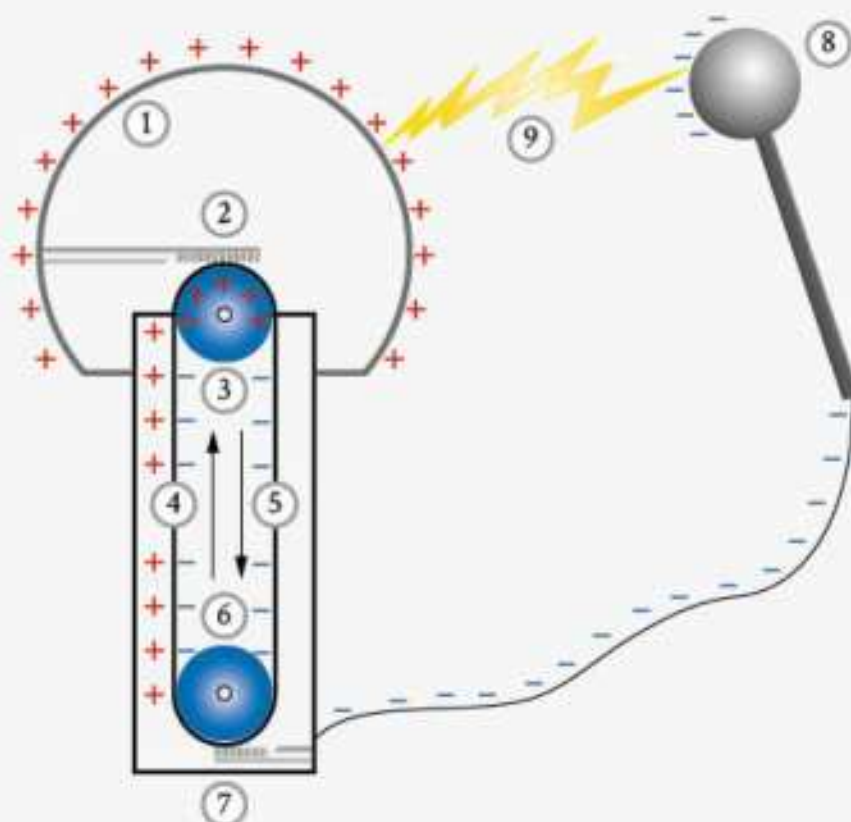
Jednym z najciekawszych zastosowań klatki Faradaya jest używany przez nas w doświadczeniach generator elektrostatyczny wysokiego napięcia, skonstruowany w 1929 roku przez fizyka amerykańskiego Roberta J. Van de Graaffa. Jego zasadniczym elementem jest taśma skórzana rozpięta na dwóch wałkach: jednym plastikowym i drugim metalowym. Wałki mogą być napędzane ręcznie za pomocą korbki lub silnika elektrycznego. Podczas pocierania o wałki, pas się elektryzuje, a nadmiar ładunków jest zbierany przez metalowy grzebień podłączony do wewnętrznej strony metalowej czaszy kulistej. Gdyby nie ta czasza, grzebień szybko naładowałby się i przestał zbierać kolejne ładunki. Ale wiemy już, że ładunki wprowadzone w obręb przewodnika gromadzą się na jego powierzchni, a we wnętrzu brak jest swobodnych ładunków i nie ma pola elektrycznego. Grzebień jest więc ciągle nienaładowany,



a dostarczanie mu kolejnych ładunków nie wymaga wykonania pracy, gdyż na ładunki nie działa odpychająca siła elektryczna. W ten sposób czasza generatora może gromadzić wielkie ładunki i ładować się do bardzo wysokich napięć.

Szkolne wersje generatorów są zdolne do wytwarzania napięć rzędu kilkudziesięciu tysięcy woltów. Instalacje przemysłowe oraz wielkie generatory stosowane w laboratoriach naukowych osiągają napięcia rzędu kilku milionów woltów. Ich podstawowym zastosowaniem jest przyspieszanie cząstek naładowanych do wielkich prędkości.

Rys. 19. Schemat generatora Van de Graaffa. 1. Kula metalowa lub siatka Faradaya. 2. Metalowy grzebień zbierający ładunki z taśmy, podłączony do klatki. 3. Wałek górny z tworzywa sztucznego. 4.–5. Pas skórzany elektryzujący się podczas kontaktu z wałkami. 6. Dolny wałek metalowy. 7. Dolna elektroda. 8. Przewodnik kulisty podłączony do dolnej elektrody (opcjonalnie). 9. Wyładowanie elektryczne.



Gęstość ładunków a krzywizna powierzchni przewodnika

Kolejne ciekawe doświadczenie można wykonać za pomocą lekkiej aluminiowej blaszki o zaostrzonych końcach skierowanych jeden w lewo a drugi w prawo, zwanej **młynkiem Franklina**. W środku ciężkości blaszki znajduje się wgłębienie, dzięki czemu młynek można położyć na igle zamocowanej pionowo na izolującej podstawie.

Doświadczenie 3.

Pomoce: młynek Franklina, maszyna elektrostatyczna, przewód.

Metalową część podstawki młynka łączymy przewodem z jednym z biegunów iskiernika maszyny elektrostatycznej. Maszynę wprawiamy w ruch. Obserwujemy zachowanie się młynka.

Obserwacja: młynek zaczyna się kręcić w kierunku przeciwnym niż wskazują jego ostrza.

Zbadamy obecnie, czy zachowanie młynka zależy od bieguna iskiernika, do którego został podłączony. W tym celu zatrzymujemy młynek, podłączamy przewód do drugiego bieguna maszyny i uruchamiamy ją.

Obserwacja: młynek kręci się w tą samą stronę.



Rys. 20. Młynek Franklina podłączony do maszyny elektrostatycznej.

Jak wyjaśnić zachowanie młynka? Wiemy już, że ładunki wprowadzone na przewodnik się odpychają, więc dążą do tego, by znaleźć się jak najdalej od siebie. Takimi najbardziej oddalonymi miejscami na przewodniku są wystające elementy, a zwłaszcza ostrza. To na nich ładunki gromadzą się najchętniej i w ich okolicy pole elektryczne jest najsilniejsze. Jest ono tak silne, że powoduje jonizację cząsteczek powietrza, czyli przekazywanie im ładunków tego samego znaku, jaki występuje na ostrzu. A ładunki tego samego znaku się odpychają. Oddziaływania są wzajemne: zjonizowane cząsteczki powietrza oddalają się od ostrza, tworząc tzw. wiatr elektronowy, a blaszka kręci się w przeciwną stronę.

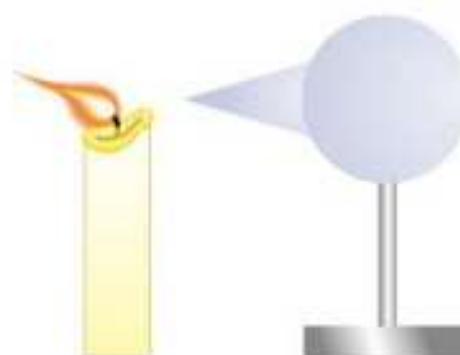
O istnieniu wiatru elektronowego łatwo się przekonać, wykonując kolejny eksperyment.

Doświadczenie 4.

Pomoce: maszyna elektrostatyczna lub generator Van de Graaffa, przewodnik kulisty z wystającym ostrzem, zamontowany na izolującej podstawie, przewód, świeczka.

Łączymy przewodnik kulisty z biegunem maszyny elektrostatycznej lub czaszą generatora Van de Graaffa. Zapalamy świeczkę i ustawiamy ją tak, by płomień znajdował się na wprost ostrza. Uruchamiamy maszynę i obserwujemy zachowanie się płomienia.

Obserwacja: płomień odchyła się od ostrza, sprawia wrażenie, jakby był zdmuchiwany.



Rys. 21. Wiatr elektronowy.

Czynnikiem odchylającym płomień jest oczywiście ruch jonów odpychanych od ostrza przez jego silne pole elektryczne.

Powyższe eksperymenty pozwalają nam sformułować kolejny wniosek dotyczący rozkładu ładunków w przewodniku.

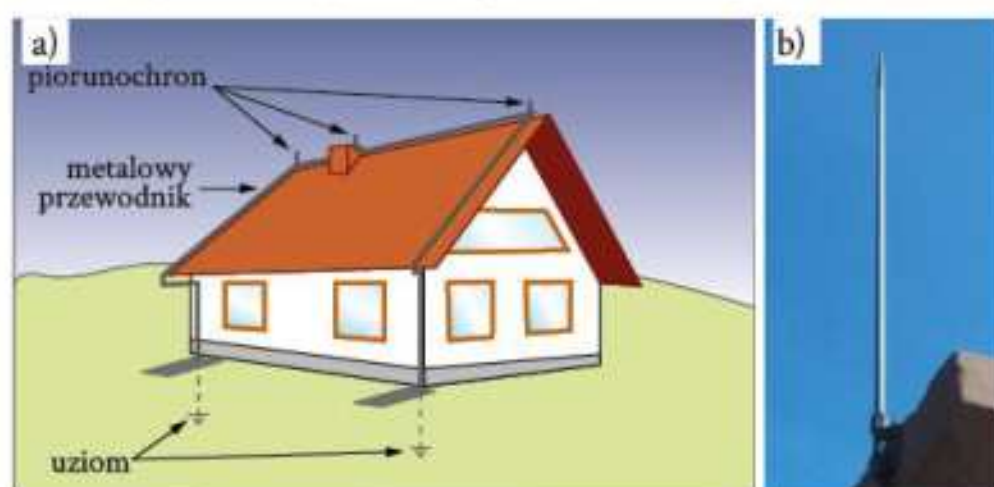


Ładunki wprowadzone w obręb przewodnika koncentrują się najbardziej na jego wystających elementach, a zwłaszcza na ostrzach.

gęstość ładunków
w przewodniku

instalacja
odgromowa

Sformułowane na tej lekcji reguły leżą u podstaw projektowania **instalacji odgromowych**. Budynki, zwłaszcza wysokie, wyposaża się w piorunochrony, których zadaniem jest zabezpieczanie przed niszczycielskimi skutkami uderzenia pioruna. Typowa instalacja odgromowa jest zbudowana z przewodów oplatających bryłę budynku, a zwłaszcza jej wystające części, takie jak komin, i zakończona ostrzami skierowanymi do góry. W skład instalacji może też wchodzić połączone elektrycznie metalowe poszycie dachu, metalowe rynny, metalowe balustrady itd. Tworzą one rodzaj klatki Faradaya, chroniącej przed dostaniem się pioruna do wnętrza budynku. Dolna część instalacji jest zakopana w ziemi w postaci tzw. uziomów.



Rys. 22. a) Instalacja odgromowa budynku, b) ostrze instalacji odgromowej umieszczone na kominie.

Podczas burzy ziemia elektryzuje się przez indukcję ładunkami przeciwnego znaku niż chmury. Ładunki te gromadzą się najbardziej na wystających ponad poziom ziemi elementach ukształtowania terenu i to one są przedmiotem „ataku” piorunów. Jeśli tym wystającym elementem jest uziom piorunochronu o małym oporze elektrycznym, piorun po uderzeniu sływa do ziemi, nie powodując groźnych skutków cieplnych, takich jak pożar lub porażenie elektryczne ludzi.

Jak się zachowywać podczas burzy

Napięcie elektryczne między chmurami a ziemią podczas burzy sięga setek milionów woltów, a natężenie prądu w piorunie to dziesiątki tysięcy amperów. Oznacza to, że moc elektryczna pioruna jest rzędu biliona watów. Piorun, uderzając w drzewo, powoduje niemal natychmiastowe odparowanie wody zawartej w pniu i jego eksplozję. Co roku w Polsce zdarzają się ofiary śmiertelne pioruna, dlatego warto wiedzieć, jak się zachować podczas burzy. Przedstawione tu zalecenia w znacznej mierze wynikają z wniosków płynących z opisanych powyżej doświadczeń.

1. Osoby kąpiące się powinny natychmiast wyjść z wody i oddalić się od zbiorników i cieków wodnych oraz miejsc wilgotnych, takich jak polacie wilgotnego mchu, gdyż są one dobrym przewodnikiem elektryczności.

jak się zachowywać
podczas burzy



2. Osoby znajdujące się w górach powinny niezwłocznie zejść ze szczytów i grani oraz schować się w zagłębieniach terenu. Nie wolno dotykać wysokich skał, zwłaszcza mokrych. To samo dotyczy ścian.
3. Osoby przebywające na otwartej przestrzeni powinny znaleźć schronienie w postaci pomieszczenia, budynku, szałas, ziemianki itp. i schować się w nim. Budynek bez instalacji odgromowej nie gwarantuje całkowitego bezpieczeństwa, ale zwiększa jego poziom w stosunku do przebywania na otwartej przestrzeni.
4. Należy unikać pojedynczych wysokich drzew, metalowych masztów itp. Jeśli w okolicy są dwa drzewa rosnące w pewnej odległości, najbezpieczniej będzie w połowie odległości między nimi. Stosunkowo bezpiecznym miejscem jest gęsty las niewysokich drzew (młodnik).
5. Jeśli burza zastała nas na płaskim terenie pozbawionym możliwości schronienia, należy przykucnąć, trzymając stopy blisko siebie. Nie wolno kłaść się na ziemi, gdyż może to spowodować przepływ prądu przez nasze ciało, gdy piorun uderzy blisko. Jeśli mamy suchy plecak, możemy na nim usiąść (będzie pełnił funkcję izolatora). Z tych samych względów warto pod nogi podłożyć karimatę. Jeśli mamy przy sobie większe metalowe przedmioty, np. stelaż namiotu lub plecaka, należy je odrzucić.
6. Najbezpieczniejsze są wnętrza klatek Faradaya, takie jak samochody, pociągi, wagoniki kolejki górskiej, metalowe kontenery, a nawet kratownice masztów wysokiego napięcia. Należy jednak pamiętać, by schować się pomiędzy elementami masztu, a nie obok niego, i by nie dotykać jego konstrukcji.
7. Będąc w większej grupie, warto się rozproszyć, aby w razie nieszczęścia osoby bardziej oddalone od miejsca uderzenia pioruna były w stanie wezwać pomoc lub jej udzielić.

Znajomość praw fizyki naprawdę może uratować ludzkie życie.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- s. 121 • Pudło lub pomieszczenie wykonane z elementów metalowych nosi nazwę klatki Faradaya. Stanowi ono bezpieczne schronienie przed zewnętrznym polem elektrycznym dla ludzi i wrażliwych urządzeń elektrycznych.
- s. 122 • Ładunek wprowadzony w obręb przewodnika gromadzi się na jego powierzchni. Wewnątrz przewodnika nie ma swobodnych ładunków ani pola elektrycznego.
- s. 125 • Największa koncentracja ładunków na powierzchni przewodnika występuje na jego wystających elementach, a zwłaszcza na ostrzach.
- s. 125 • Instalacja odgromowa zabezpiecza przed niszczącymi skutkami uderzenia pioruna.
- s. 125 • Znajomość praw elektrostatyki może uratować ludzkie życie podczas burzy.



3.6. Kondensatory

NA TEJ LEKCJI

- dowiesz się, od czego zależy zdolność przewodnika do gromadzenia ładunku,
- dowiesz się, co to jest i jak działa kondensator,
- poznasz zastosowania kondensatorów w różnych dziedzinach.

Od czego zależy zdolność przewodników do gromadzenia ładunku?

Zdolność przewodników do gromadzenia ładunków ma swoje ograniczenia. Zwiększanie ładunku na przewodniku powoduje proporcjonalny wzrost napięcia elektrycznego pomiędzy tym przewodnikiem a poziomem odniesienia, którym najczęściej jest ziemia. Jeśli to napięcie jest wysokie, ładunki starają się opuścić przewodnik, na przykład na drodze wyładowania iskrowego. Doświadczamy tego na przykład podczas zdejmowania swetra przez głowę. Sweter i włosy elektryzują się znikomymi ładunkami elektrycznymi, a mimo to odczuwamy wyładowania iskrowe, ponieważ napięcie pomiędzy swetrem i naszą głową osiąga wartości tysięcy woltów. Tymczasem istnieją dziedziny, w których chcielibyśmy dysponować zapasem ładunku bez konieczności zwiększania napięcia do wielkich wartości. Czy jest na to jakiś sposób?

Parametrem charakteryzującym zdolność przewodnika do gromadzenia ładunków jest jego pojemność elektryczna. Na poziomie podstawowym nie jest wymagana ścisła definicja tej wielkości fizycznej ani posługiwanie się wzorami, niemniej intuicyjne użycie tego pojęcia znacząco uprości dalsze rozważania. Dlatego na nasz użytek przyjmijmy, że pojemność elektryczna przewodnika jest miarą wielkości ładunku, jaki może się zgromadzić na danym przewodniku pod określonym napięciem.

Zastanówmy się, od czego zależy pojemność elektryczna przewodnika. Badania wykazały, że jest ona wprost proporcjonalna do rozmiarów geometrycznych przewodnika oraz zależy od jego kształtu. Istnieje jednakże pewien czynnik, który pozwala znacząco poprawić zdolność przewodnika do gromadzenia ładunków bez konieczności zwiększania jego rozmiarów. Przekona nas o tym pewne doświadczenie.

Doświadczenie 1.

Pomoce: elektroskop, który zamiast kulki jest u góry wyposażony w poziomą płytę metalową, laska ebonitowa, wełna, uziemiona płyta metalowa.

Mówimy, że jakiś element jest uziemiony, gdy jest połączony przewodem z ziemią. Ładunki z ciała uziemionego mogą swobodnie odpływać do ziemi. Mogą też do niego dopływać pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego.

zdolność
przewodników do
gromadzenia
ładunków



Gniazdka elektryczne są wyposażone w kolki uziemiające. Jako element uziemiający można też wykorzystać sieć wodociągową lub centralnego ogrzewania (jeśli wykonana jest z przewodników elektrycznych), gdyż jest ona częściowo zakopana w ziemi. Ciało uziemione nie wykazuje napięcia elektrycznego.

Za pomocą laski ebonitowej elektryzujemy ujemnie elektroskop z płytą metalową. Następnie zbliżamy do niego drugą metalową płytę. Jeżeli nie mamy możliwości przeprowadzenia prawdziwego uziemienia, trzymamy płytę za metal – wtedy funkcję „ziemi” będzie pełnił nasze ciało. Obserwujemy zachowanie się wskazówki elektroskoku.

Obserwacja: gdy zbliżamy płytę do elektroskoku, wskazówka częściowo opada. Gdy płytę oddalamy – wskazówka wychyla się ponownie. Im bliżej elektroskoku znajduje się płyta, tym mniejsze jest wychylenie wskazówki.



Rys. 23. Zbliżenie do naładowanego elektroskoku uziemionej płyty metalowej powoduje zmniejszenie się wychylenia wskazówki elektroskoku.

Jak wytłumaczyć takie zachowanie się wskazówki elektroskoku? Przede wszystkim zauważmy, że ładunek elektroskoku w trakcie doświadczenia nie ulegał zmianie – jego wnętrze jest układem izolowanym. Wskazówka elektroskoku nie wskazuje wielkości zgromadzonego na nim ładunku, tylko panujące w elektroskopie napięcie. Zbliżenie uziemionej płyty do naładowanego elektroskoku spowodowało odpłynięcie elektronów z tej płyty do ziemi. Między uziemioną płytą a płytą elektroskoku wytworzyło się jednorodne pole elektryczne, a napięcie wskazywane przez elektroskop zmalało. Aby spowodować takie samo wychylenie wskazówki jak poprzednio, moglibyśmy teraz wprowadzić na elektroskop znacznie większy ładunek. Wypływa z tego ciekawy wniosek: pojemność elektryczna przewodnika wzrasta, jeśli w jego pobliżu znajdzie się inny przewodnik uziemiony.

W ten sposób znaleźliśmy sposób na przechowywanie większych porcji ładunku na przewodniku bez konieczności zwiększania panującego na tym przewodniku napięcia: wystarczy zbliżyć do niego inny przewodnik uziemiony.



Chcesz wiedzieć więcej?

Pojemność elektryczna przewodnika jest zdefiniowana jako stosunek ładunku zgromadzonego na przewodniku do wytworzonego przez ten ładunek napięcia między przewodnikiem i ziemią lub innym poziomem odniesienia.

$$C = \frac{Q}{U}$$

Jednostką pojemności elektrycznej jest 1 farad: $1 \text{ F} = \frac{1 \text{ C}}{1 \text{ V}}$. Przewodnik ma pojemność

elektryczną 1 farada, gdy wprowadzony na niego ładunek 1 kulomba wytwarza napięcie 1 wolta. Jest to jednostka przeogromna: taką pojemność elektryczną ma na przykład kula metalowa o promieniu 9 milionów kilometrów! Cała Ziemia, traktowana jako odosobniony przewodnik kulisty, miałaby pojemność elektryczną mniejszą niż 0,001 farada.

Wynalezienie kondensatorów, o których będzie za chwilę mowa, pozwoliło uzyskać pojemności elektryczne porównywalne z całą Ziemią w urządzeniach o niewielkiej objętości. Pojemności elektryczne pojedynczych przewodników o rozmiarach mierzonych w centymetrach są rzędu bilionowych części farada, czyli pikofaradów. Dlatego też niewielki ładunek zgromadzony na czaszy generatora Van de Graaffa (rzędu milionowej części kulomba) wytwarza napięcie mierzone w dziesiątkach tysięcy woltów.

Budowa i zasada działania kondensatora

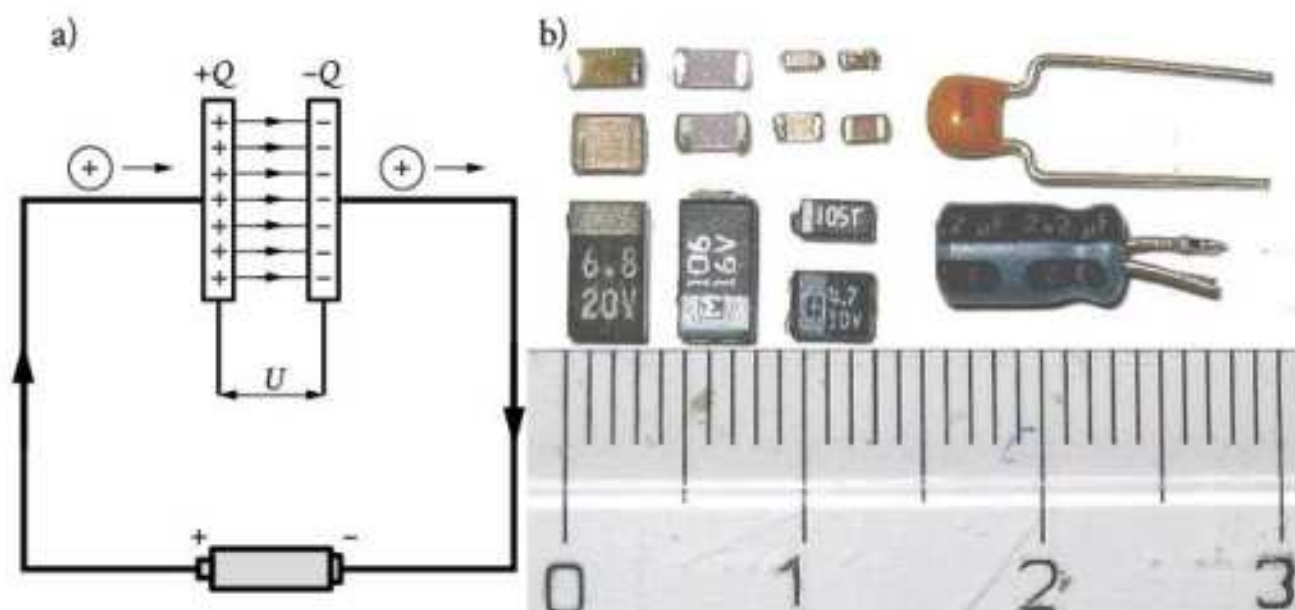
Urządzenie służące do gromadzenia i przechowywania ładunku elektrycznego nazywamy kondensatorem. Wykonane przed chwilą doświadczenie podpowiada nam przepis, jak zbudować taki kondensator.

Kondensatorem nazywamy układ dwóch przewodników elektrycznych oddzielonych warstwą izolatora, służący do gromadzenia i przechowywania dużych porcji ładunku elektrycznego. Wspomniane przewodniki nazywamy okładkami kondensatora.

kondensator

Współcześnie w praktyce stosuje się wiele rodzajów kondensatorów, ale najprostszy, będący pierwowzorem bardziej zaawansowanych konstrukcji, to **kondensator płaski**. Jest on zbudowany z dwóch płaskich równoległych płyt metalowych (okładek), pomiędzy którymi występuje warstwa izolatora – w najprostszym przypadku powietrza. Gdy podłączymy okładki do przeciwnych biegunów baterii lub maszyny elektrostatycznej, naładują się one ładunkami o tych samych wartościach bezwzględnych, lecz przeciwnych znakach. Jako ładunek zgromadzony na kondensatorze rozumiemy ładunek jednej okładki, gdyż sumaryczny ładunek obu okładek w typowych sytuacjach wynosi zero.





Rys. 24. a) Schemat kondensatora płaskiego. b) Wygląd typowych kondensatorów stosowanych w elektrotechnice.

kondensator
– magazyn ładunku
i energii

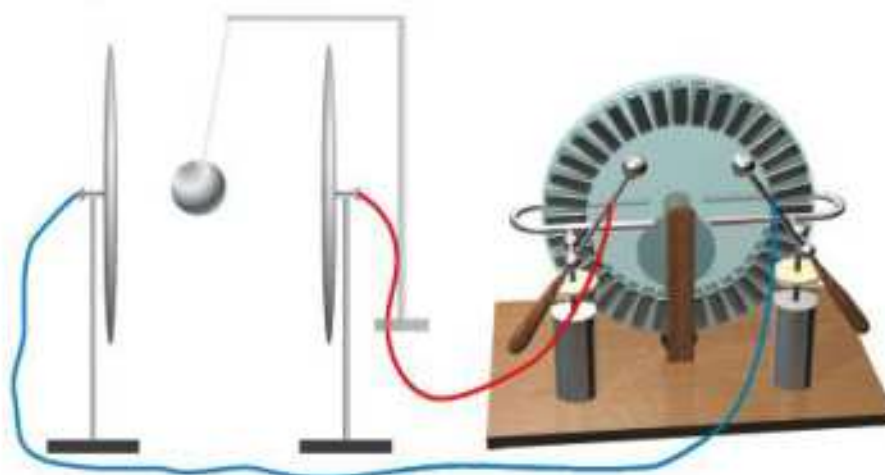
Pomiędzy okładkami naładowanego kondensatora płaskiego występuje napięcie elektryczne oraz jednorodne pole elektryczne. Z tego powodu kondensator jest magazynem nie tylko **ładunku**, lecz także **energii**. Łatwo się o tym przekonać, konstruując urządzenie będące rodzajem dzwonka elektrycznego:

Doświadczenie 2.

Pomocze: maszyna elektrostatyczna, dwie płyty metalowe ustawione pionowo na izolujących statywach, metalizowana pileczka pingpongowa zawieszona na nieprzewodzącej nici, przewody.

Płyty metalowe ustawiamy równolegle, w odległości kilku centymetrów od siebie. Pomiędzy nimi zawieszamy metalizowaną pileczkę pingpongową. Płyty łączymy przewodami z biegunami maszyny elektrostatycznej. Uruchamiamy maszynę i obserwujemy zachowanie się pileczki.

Obserwacja: pileczka pingpongowa odbija się rytmicznie od jednej i drugiej płyty, wydając charakterystyczny dźwięk dzwonka elektrycznego. Przyspieszenie pracy maszyny elektrostatycznej zwiększa częstotliwość uderzeń pileczki. Gdy przestaniemy kręcić korbą maszyny, uderzenia pileczki trwają jeszcze jakiś czas, po czym zanikają.



Rys. 25. Kondensator płaski wprowadzający w ruch metalizowaną pileczkę pingpongową.



Przeanalizujemy zachowanie się pileczki pingpongowej. Pomiędzy okładkami kondensatora występuje jednorodne pole elektryczne. Pileczka była początkowo nie-naładowana. Ponieważ jest pomalowana farbą przewodzącą, naelektryzowała się wskutek indukcji i została przyciągnięta przez jedną z elektrod. Dotykając jej, przejęła część ładunku tej elektrody. Została więc przez nią odepchnięta i przyciągnięta przez drugą elektrodę. Dotykając jej, naelektryzowała się ładunkiem przeciwnego znaku i cały cykl się powtórzył.

Na naelektryzowaną pileczkę ze strony pola elektrycznego kondensatora działa siła, która wprawia ją w ruch. Pole elektryczne wykonuje więc pracę. Można by pomyśleć, że praca ta wykonywana jest na bieżąco kosztem energii mechanicznej potrzebnej do napędzania maszyny elektrostatycznej. Ale po odłączeniu maszyny ruch pileczki nie ustaje natychmiast, tylko trwa jeszcze jakiś czas. Oznacza to, że w polu elektrycznym po naładowaniu kondensatora została w nim zmagazynowana energia. Pileczka, odbijając się to od jednej płyty, to od drugiej, przenosi ładunek pomiędzy okładkami, doprowadzając ostatecznie do rozładowania kondensatora. Ładując kondensator, magazynujemy w nim **energię pola elektrycznego**. Energia ta wyzwala się w procesie rozładowywania kondensatora i może zostać wykorzystana praktycznie, w tym przypadku na wykonanie pracy mechanicznej i wygenerowanie dźwięku.

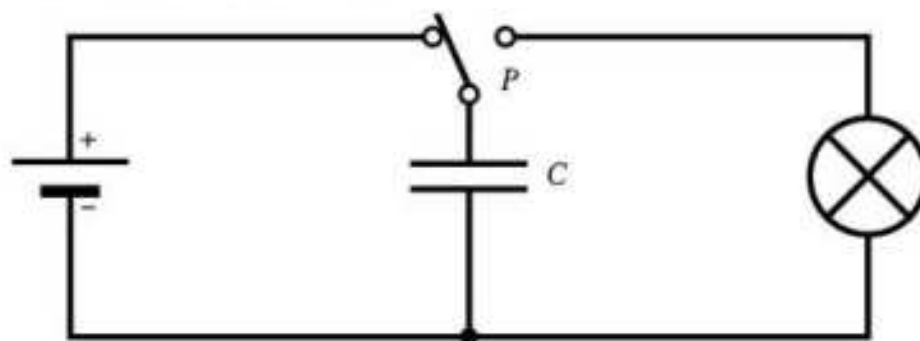
energia
kondensatora

Energia naładowanego kondensatora wyzwala się też podczas przeskoku iskry pomiędzy okładkami albo przy podłączeniu lampy błyskowej do okładek. Możemy ją też wykorzystać w prostych urządzeniach elektrycznych.

Doświadczenie 3.

Pomoce: niskonapięciowy kondensator o dużej pojemności, żaróweczka, przełączniki, przewody.

Montujemy obwód elektryczny według załączonego schematu. Środkowy element, oznaczony literą C, symbolizuje kondensator. Przełączamy wyłącznik do pozycji ładowania kondensatora. Po naładowaniu przełączamy go na zasilanie żarówki. Obserwujemy żarówkę.



Rys. 26. Schemat obwodu elektrycznego do doświadczenia 3.

Obserwacja: żarówka się zapala. Początkowo świeci jasno, ale jej blask gaśnie coraz wolniej.

W poprzednim doświadczeniu ładunki, przemieszczając się za pośrednictwem pileczki z jednej okładki na drugą, wykonywały pracę mechaniczną. W tym doświadczeniu ładunki również przemieszczają się z jednej okładki na drugą i jesteśmy świadkami przemiany energii elektrycznej na energię światła i ciepła. Początkowo



żarówka świeci jasno, gdyż napięcie pomiędzy okładkami jest duże. W miarę rozładowywania kondensatora maleje napięcie między okładkami i natężenie prądu przepływającego przez żarówkę – świeci ona coraz słabiej. Ponieważ natężenie prądu jest coraz mniejsze, maleje też tempo rozładowywania kondensatora. Dlatego blask żarówki z upływem czasu zmienia się coraz wolniej. Podobną zależność mogliśmy zaobserwować podczas ruchu pileczki pingpongowej: im mniejsza jest energia zmagazynowana w kondensatorze, tym wolniej jest ona tracona w procesie rozładowywania.



Chcesz wiedzieć więcej?

Zastosowania kondensatorów

Kondensatory należą do podstawowych elementów licznych obwodów elektrycznych. W zasilaczach i stabilizatorach służą do podtrzymania stałej wartości napięcia. Jako elementy filtrów chronią przed zakłóceniami w sieciach energetycznych i urządzeniach elektrycznych. Są stosowane we wzmacniaczach, nadajnikach i odbiornikach radiowych oraz w układach zasilających lampy błyskowe i stroboskopowe.

W ostatnich latach intensyfikuje się prace nad rozwojem tzw. superkondensatorów o wielkiej pojemności, które mogłyby zastąpić baterie i akumulatory jako źródła i magazyny energii elektrycznej. Urządzenia te, w przeciwieństwie do akumulatorów, szybciej się ładują, wolniej zużywają, są nietoksyczne, bezobsługowe, tanie w produkcji, nie wymagają konserwacji i można je bez szkody rozładować do zera. Podstawową wadą superkondensatorów jest niskie napięcie pracy, które na dodatek maleje w trakcie rozładowywania się.

Superkondensatory znajdują coraz szersze zastosowania jako dodatkowe źródło energii w układach hybrydowych, ogniwach paliwowych, pojazdach elektrycznych itd. Mogą służyć do tzw. rekuperacji, czyli odzyskiwania energii traconej np. w czasie hamowania pojazdów. Pozwala to zwiększyć sprawność energetyczną środków transportu oraz ograniczyć emisję zanieczyszczeń. Wpływa też pozytywnie na żywotność innych elementów pojazdu, np. akumulatora.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- s. 127 • Dostarczanie coraz większych ładunków do przewodnika powoduje proporcjonalny wzrost napięcia elektrycznego między przewodnikiem a otoczeniem.
- s. 127 • Pojemność elektryczna przewodnika zależy od jego kształtu i rozmiarów geometrycznych oraz w znacznej mierze od obecności w jego sąsiedztwie innych przewodników.
- s. 129 • Układ dwóch przewodników elektrycznych oddzielonych izolatorem (np. powietrzem) nazywamy kondensatorem. Kondensator ma znacznie większą pojemność elektryczną niż pojedynczy przewodnik.
- s. 129 • Kondensatory służą do gromadzenia i przechowywania ładunków elektrycznych.
- s. 130 • We wnętrzu naładowanego kondensatora płaskiego występuje napięcie elektryczne oraz jednorodne pole elektryczne. Pole to jest nośnikiem energii elektrycznej.
- s. 131 • Energia naładowanego kondensatora może zostać wykorzystana w procesie jego rozładowania.



Analiza tekstu: Coulomb i jego poprzednicy

W 1760 roku **Daniel Bernoulli** (czyt. bernuli) [...] mierzył siłę między metalową tarczą ładowaną z maszyny elektrostatycznej i podobną tarczą przymocowaną na szczycie szklanej fiolki pływającej w wodzie. Siłę przyciągania można było mierzyć, równoważąc ją za pomocą obciążników fiolki. Przyrząd ten przypominał nieco obecny miernik kwasowości w akumulatorach samochodowych. Bernoulli mierzył więc w zasadzie siłę – używając współczesnej terminologii – działającą między okładkami kondensatora płaskiego. Wywnioskował też, że wyniki jego pomiarów są zgodne z założeniem, że siła przyciągania elektrycznego między ciałami maleje z kwadratem odległości między nimi. Jego argumenty nie były jednak przekonujące.

W grudniu 1766 r. **Joseph Priestley** (czyt. dżozef pristli) przeprowadzał doświadczenia z elektryzowaniem różnych ciał. Zaobserwował on, że po naelektryzowaniu sporego cynowego naczynia umieszczonego na izolującej podstawie nie mógł wykryć jakiegokolwiek wpływu zebranej tam elektryczności na ciała wsuwane na nitkach do wnętrza naczynia; dwie małe kulki ze smoły pozostawały zetknięte ze sobą, gdy tymczasem te same kulki naelektryzowane bezpośrednio poza naczyniem odskakiwały od siebie. W swej książce [...] napisał:

Czy nie możemy z tego doświadczenia wyciągnąć wniosku, że przyciąganie elektryczne podlega tym samym prawom co grawitacja, a więc zmienia się odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości; łatwo bowiem można wykazać, że gdyby Ziemia miała postać powłoki kulistej, to ciała wewnątrz niej nie byłyby przyciągane w jedną stronę bardziej niż w inną.

W 1769 r. **John Robison** (czyt. dżon robinson) w Edynburgu próbował wyznaczyć eksperymentalnie zależność siły oddziaływania między naładowanymi kulkami, zakładając że siła ta zależy od odległości między nimi jak $\frac{1}{r^n}$. Na podstawie kilkuset doświadczeń wywnioskował, że dla siły odpychania $n = 2,06$, co zaokrąglił do $n = 2$. Wyniku tego jednak z nieznanых powodów nie opublikował, i dopiero w 1822 r., już po jego śmierci, David Brewster (czyt. dejwid bruster) wydał dzieło Robisona *A System of Mechanical Philosophy*, gdzie te eksperymenty były opisane.

Wiemy też dziś, że w 1772 r. **Henry Cavendish** (czyt. henry kawendisz) wykonał bardzo precyzyjne pomiary oddziaływania między ładunkami. Posłużył się metodą pośrednią, a mianowicie stwierdził brak ładunku na wewnętrznej powierzchni naładowanego przewodnika. Ale ze względu na dziwaczne usposobienie nikomu nie podał informacji o tym wyniku. Dopiero w 1879 r. Maxwell (czyt. makslel) przeanalizował zachowane rękopisy Cavendisha i doszedł do wniosku, że wyznaczył on z dokładnością do 2% wykładnik $n = 2$ w prawie zależności siły oddziaływania między ładunkami od ich odległości, $\frac{1}{r^n}$. Gdyby nie dziwactwo Cavendisha, Coulomb mógłby dziś pozostawać postacią mało znaną.



Rys. 27. Charles Augustin Coulomb (1736–1806).

Charles Augustin Coulomb [...] prowadził badania elektryczne przy użyciu czulej wagi skręceń, pozwalającej na pomiar bardzo małych sił. Coulomb był bardzo dobrze przygotowany do tych eksperymentów, ponieważ wcześniej starannie badał zjawisko skręcania drutu i wyznaczył zależność kąta skręcania od skręcającego momentu sił. Pomiary wykonywał bardzo starannie, powtarzając je i biorąc poprawki na upływ ładunku. W 1785 r. mógł już ogłosić, że „siła odpychania dwóch małych kulek naelektryzowanych jednakowo zależy od odwrotności kwadratu odległości między środkami kulek”. Zaraz potem sprawdził, że to prawo jest także słuszne dla przyciągania kulek naładowanych przeciwnymi ładunkami.

Wyniki Coulomba zostały zaakceptowane bez zastrzeżeń tylko we Francji. W innych krajach na ogół uznawano, że wnioski Coulomba są nieuzasadnione i wynikają z użycia mało zbadanej wagi skręceń. Przeciwno prawu $F \sim \frac{1}{r^2}$

wypowiadali się między innymi tak wybitni uczeni jak **Alessandro Volta** (czyt. wolta) i **Christian Oersted** (czyt. christian yrsted). Publikowane były wyniki mające świadczyć o tym, że siła oddziaływania między ładunkami jest odwrotnie proporcjonalna do pierwszej, a nie drugiej potęgi odległości. Jeszcze w 1836 r. **William Harris** (czyt. liliam haris) ogłosił w „Philosophical Transactions” artykuł, w którym twierdził, że jego pomiary wykazują nieprawdziwość prawa Coulomba.

Fragment książki Andrzej Kajetan Wróblewski, *Historia fizyki*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2006.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Jakiego problemu dotyczy w ogólności cały tekst?
2. Czy Coulomb był pionierem w dziedzinie pomiarów oddziaływań pomiędzy ładunkami? Jeśli nie, to na czym polegają jego zasługi?
3. Czy okładki kondensatora się przyciągają, czy odpychają? Dlaczego?
4. Na jaki zasadniczy problem natrafiamy, chcąc określić odległość pomiędzy ładunkami, które nie są punktowe?
5. Jak według współczesnej wiedzy wyjaśnilibyśmy efekt zaobserwowany przez J. Priestleya z kulami ze smoły?
6. Z jakiego innego powodu (niewymienionego w tym tekście) H. Cavendish stał się sławny?
7. Czy wyniki doświadczeń Coulomba zostały w pełni zaakceptowane przez świat naukowy?



PODSUMOWANIE PRZED SPRAWDZIANEM

1. Materia jest zbudowana z cząstek. Podstawowymi składnikami materii są dodatnio naładowane protony, obojętne elektrycznie neutrony oraz naładowane ujemnie, lekkie elektrony. s. 103
2. Ładunki elektryczne protonu i elektronu są co do wartości bezwzględnej równe i noszą nazwę ładunku elementarnego. Wszystkie ładunki elektryczne w przyrodzie są wielokrotnością ładunku elementarnego. s. 103
3. Znamy trzy podstawowe metody elektryzowania ciał: przez pocieranie, przez dotyk i przez indukcję. s. 106
4. Zasada zachowania ładunku głosi, że w układzie izolowanym elektrycznie całkowita ilość ładunku elektrycznego nie może ulec zmianie. Wynika z tego w szczególności, że całkowity ładunek Wszechświata nie może ulec zmianie w żadnym procesie. s. 108
5. Dwa nieruchome punktowe ładunki elektryczne oddziałują wzajemnie siłami elektrostatycznymi o wartościach wprost proporcjonalnych do iloczynu wartości tych ładunków i odwrotnie proporcjonalnych do kwadratu odległości między nimi. Jest to treść prawa Coulomba. s. 111
6. Pole elektryczne to właściwość przestrzeni wokół ładunku, zwanego ładunkiem źródłowym, polegająca na tym, że na inne umieszczone tam ładunki działa siła elektryczna. Pole elektrostatyczne jest to pole elektryczne wytworzone przez ładunki nieruchome. s. 114
7. Pole elektryczne przedstawiamy graficznie za pomocą linii pola elektrycznego. Są to linie w każdym punkcie styczne do wektorów siły, jakie działają na ładunek próbny umieszczony w tym punkcie. s. 115
8. Jeśli linie pola mają postać prostych równoległych, to takie pole nazywamy polem jednorodnym. W każdym punkcie pola jednorodnego na dany ładunek działa taka sama siła. s. 115
9. Linie pola można obserwować m.in. dzięki lekkim naelektryzowanym wstęgom bibuły oraz lekkim przedmiotom pływającym w nieprzewodzącej cieczy. s. 119
10. Ładunek wprowadzony w obręb przewodnika gromadzi się na jego powierzchni. Wewnątrz przewodnika nie ma swobodnych ładunków ani pola elektrycznego. Fakt ten został wykorzystany w konstrukcji klatki Faradaya. s. 122
11. Największa koncentracja ładunków na powierzchni przewodnika występuje na jego wystających elementach, a zwłaszcza na ostrzach. Należy o tym pamiętać podczas burzy. s. 125
12. Dostarczanie coraz większych ładunków do przewodnika powoduje proporcjonalny wzrost napięcia elektrycznego. s. 127
13. Układ dwóch przewodników elektrycznych oddzielonych izolatorem (np. powietrzem) nazywamy kondensatorem. Kondensator ma znacznie większą pojemność elektryczną niż pojedynczy przewodnik. s. 129
14. Kondensatory służą do gromadzenia i przechowywania ładunków elektrycznych. s. 129
15. We wnętrzu naładowanego kondensatora występuje pole elektryczne będące nośnikiem energii elektrycznej. Energia ta może zostać wykorzystana w procesie rozładowania kondensatora. s. 131

Odpowiedzi do zadań

1.1.1. a) 25 N, b) 4 cm

1.1.2. 34 cm, $12,5 \frac{\text{N}}{\text{m}}$

1.2.1. 4A

1.2.2. 0,08 s

1.3.1. 0,002 m

1.4.1. 2,5 s

1.5.1. Po upływie kolejnych 40 s.

2.1.1. 44 μm

2.1.2. 0,16%

2.1.3. $-7,8^\circ\text{C}$ 2.2.4. $16,7 \text{ cm}^3$

2.5.2. 250 kJ

2.6.1. Więcej energii wymaga żelazo.

2.6.2. 141 g

2.6.3. 181 K

2.6.4. $\frac{c_A}{c_B} = 1,8$

2.7.2. 9639 J

2.7.3. 22,1%

2.8.1. $16,6^\circ\text{C}$

2.8.3. 222 g

2.8.4. $75,7^\circ\text{C}$

2.9.1. A 4,29%, B 2,67%, C 2,37%

2.10.3. 14 000 l, 7600 kg

2.10.4. Więcej energii dostarczą orzechy.

2.10.5. 104 g

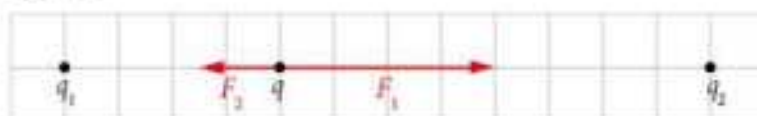
2.10.6. 500 kJ

3.1.1. -200 nC

3.1.2. 5,35 C. Jest to ładunek niewyobrażalnie wielki jak na tak małe ciało.

3.1.3. $(1,44 \cdot 10^{-11})\%$ 3.2.1. Wzrośnie o czynnik $\frac{4}{3}$.3.2.2. Siła zmaleje o $k \frac{(\Delta q)^2}{d^2}$.3.2.3. W odległości 0,828 m od ładunku q_1 .

3.3.2.



Indeks

A

amplituda 17
anomalna rozszerzalność termiczna wody 86

B

Bernoulli, Daniel 133
bimetal 40
bryza 88
butelki lejdejskie 117

C

Cavendish, Henry 133
Celsius, Anders 46
ciało
– amorficzne 70
– krystaliczne 67
cieplik 50
ciepło 50
– parowania 68
– spalania 80
– topnienia 68
– właściwe 61, 62, 76
Coulomb, Charles 110
cząstki elementarne 103
częstotliwość 18

D

dipol elektryczny 115
doświadczenie Joule'a 56
drgania
– gasnące 27
– tłumione 27
– wymuszone 28
dyfuzja 90, 91
dzienne zapotrzebowanie energetyczne 84
dżul 50

E

elektrony 103
elektroskop 104
elektryzowanie 104
– przez dotyk 107
– przez indukcję 106
– przez pocieranie 106
– przez wpływ 106
energia wewnętrzna ciała 48, 49

F

Fahrenheit, Daniel Gabriel 46
farad 129
faza (stan skupienia) 64
Franklin, Benjamin 102

G

generator Van de Graaffa 117, 122

H

Harris, William 134
Helmholtz, Herman 50
herc 18

I

instalacja odgromowa 125
izochronizm 23

J

jonizacja 66
Joule, James Prescott 50, 57

K

kaloria 57, 83
kamerton 32
kilokaloria 83
klatka Faradaya 121
koło bosc 41
kondensator 129
– płaski 129
konwekcja 47, 51, 53
krzywa rezonansowa 30
kulomb 103
kwarki 104

L

linie pola elektrostatycznego 115

Ł

ładunek
– elementarny 103
– jednoimienny 103
– próbny 114
– różnoimienny 103
– źródłowy 113

M

maszyna elektrostatyczna 117
Mayer, Juliusz 50
menisk 89
młynek Franklina 123
most Tacoma Narrows 29

N

napięcie powierzchniowe 88
 napężenie 13
 natężenie pola elektrostatycznego 116
 neutrony 103
 nitowanie na gorąco 40

O

Oersted, Christian 134
 okres ruchu drgającego 18
 oscylator harmoniczny 17

P

perpetuum mobile 59, 95
 plazma 66
 płyta rezonansowa 33
 pojemność elektryczna 127, 128, 129
 polaryzacja 115
 pole
 – centralne 115
 – elektrostatyczne 114
 – elektryczne 114
 – jednorodne 115
 prawo
 – Coulomba 111
 – Hooke'a 11
 Priestley, Joseph 133
 promieniowanie 51, 54
 protony 103
 przewodnictwo cieplne 51, 52
 przyrost
 – długości ciała 38
 – długości pręta 37, 38
 – objętości ciała 45
 – temperatury ciała 61
 przyswajalność 82
 pudło rezonansowe 31, 33

R

reakcja spalania 80
 rekombinacja 66
 resublimacja 66
 rezonans 29
 rezonator 33
 Robison, John 133
 rozszerzalność
 – cieplna (termiczna) 37
 – liniowa 37
 – objętościowa 37
 równanie bilansu cieplnego 71
 ruch
 – drgający 15
 – harmoniczny 17

S

siła wymuszająca 28
 sprężystość 9
 – kształtu 9
 – objętości 9
 stała Coulomba 111
 stan skupienia
 – ciekły 64
 – gazowy 64
 – stały 64
 sublimacja 66
 szadź 66
 szczelina dylatacyjna 42

Ś

Śniadecki, Jędrzej 50
 świetlik 50

T

temperatura
 – krzepnięcia 65
 – topnienia 65
 Thomson, Joseph John 102

U

układ izolowany 71, 108

V

Volta, Alessandro 134

W

waga skręceń 110
 wartości kaloryczne 83
 wartość opałowa 80
 wiatr elektronowy 124
 włoskowatość 89
 wrzenie 65
 współczynnik
 – liniowej rozszerzalności cieplnej 38
 – objętościowej rozszerzalności cieplnej 45
 – sprężystości 11
 wydatek energetyczny organizmu 84

Z

zasada
 – termodynamiki, pierwsza 58
 – zachowania ładunku 108
 zwilżanie ciała stałego przez wodę 89

Tablice

Wykaz przedrostków służących do tworzenia wielokrotności jednostek			
Przedrostek	Symbol	Mnożnik	Czytamy
atto	a	$10^{-18} = 0,000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 001$	jedna trylionowa
femto	f	$10^{-15} = 0,000\ 000\ 000\ 000\ 001$	jedna biliardowa
piko	p	$10^{-12} = 0,000\ 000\ 000\ 001$	jedna bilionowa
nano	n	$10^{-9} = 0,000\ 000\ 001$	jedna miliardowa
mikro	μ	$10^{-6} = 0,000\ 001$	jedna milionowa
mili	m	$10^{-3} = 0,001$	jedna tysięczna
centy	c	$10^{-2} = 0,01$	jedna setna
decy	d	$10^{-1} = 0,1$	jedna dziesiąta
deka	da	$10^1 = 10$	dziesięć
hekto	h	$10^2 = 100$	sto
kilo	k	$10^3 = 1\ 000$	tysiąc
mega	M	$10^6 = 1\ 000\ 000$	milion
giga	G	$10^9 = 1\ 000\ 000\ 000$	miliard
tera	T	$10^{12} = 1\ 000\ 000\ 000\ 000$	bilion
peta	P	$10^{15} = 1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000$	biliard
eksa	E	$10^{18} = 1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000$	trylion

Przykłady:

1 teradżul = 1 TJ = 10^{12} J = 1 000 000 000 000 dżuli
 1 gigawat = 1 GW = 10^9 W = 1 000 000 000 watów
 1 megawat = 1 MW = 10^6 W = 1 000 000 watów
 1 kilometr = 1 km = 10^3 m = 1 000 metrów
 1 hektolitr = 1 hl = 10^2 l = 100 litrów
 1 dekagram = 1 dag = 10 g = 10 gramów
 1 decymetr = 1 dm = 10^{-1} m = 0,1 metra
 1 centymetr = 1 cm = 10^{-2} m = 0,01 metra
 1 miligram = 1 mg = 10^{-3} g = 0,001 grama
 1 mikrometr = 1 μ m = 10^{-6} m = 0,000 001 metra
 1 nanometr = 1 nm = 10^{-9} m = 0,000 000 001 metra

Alfabet grecki			
$A \alpha$ alfa	$H \eta$ eta	$N \nu$ ni	$T \tau$ tau
$B \beta$ beta	$\Theta \theta$ theta	$\Xi \xi$ ksi	$Y \upsilon$ ypsilon
$\Gamma \gamma$ gamma	$I \iota$ jota	$O o$ omikron	$\Phi \phi$ fi
$\Delta \delta$ delta	$K \kappa$ kappa	$\Pi \pi$ pi	$X \chi$ chi
$E \varepsilon$ epsilon	$\Lambda \lambda$ lambda	$P \rho$ ro	$\Psi \psi$ psi
$Z \zeta$ dzeta	$M \mu$ mi	$\Sigma \sigma$ sigma	$\Omega \omega$ omega

Podstawowe jednostki fizyczne w układzie SI			
	Wielkość fizyczna	Nazwa jednostki	Symbol
Jednostki podstawowe	długość	metr	m
	masa	kilogram	kg
	czas	sekunda	s
	natężenie prądu elektrycznego	amper	A
	temperatura	kelwin	K
	ilość materii	mol	mol
	światłość	kandela	cd
Jednostki uzupełniające	kąt płaski	radian	rad
	kąt bryłowy	steradian	sr

Wartości prędkości spotykane w przyrodzie i w technice			
Prędkość	wartość prędkości $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$	Prędkość	wartość prędkości $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$
światła w próżni	ok. $3 \cdot 10^8$	najszybszego ptaka	36
Ziemi wokół Słońca	29 000	geparda	ok. 30
pocisku karabinowego	900	konia	20
dźwięku w powietrzu (20°C)	ok. 340	człowieka (sprint)	10
najszybszego pociągu	90	ślimaka	0,002

Współczynniki tarcia	
stal po stali	0,5
stal po lodzie	0,04
stal po betonie	0,3
guma po betonie	0,75
cegła po cegle	0,7
drewno po drewnie	0,2–0,25

Współczynniki liniowej rozszerzalności cieplnej dla wybranych substancji	
Nazwa substancji	$\lambda, 10^{-6} \frac{1}{K}$
aluminium	23
beton	12
inwar	0,44
miedź	16
olów	29
stal	12
szkło	8
szkło kwarcowe	0,4

Współczynniki rozszerzalności objętościowej dla wybranych cieczy	
Nazwa substancji	$\alpha, \frac{1}{K}$
alkohol etylowy	0,00111
nafta	0,00104
rtęć	0,00018
woda (powyżej 4°C)	0,00021

Ciepło właściwe wybranych substancji, $\frac{J}{kg \cdot K}$			
Ciała stałe		Ciecze	
lód	2100	woda	4190
aluminium	920	benzyna	2100
cynk	389	etanol	2380
mosiądz	377	gliceryna	2386
piasek	800	nafta	2100
styropian	1200	olej lniany	1840
złoto	129	rtęć	139
żelazo	452		

Nazwa substancji	Temperatura topnienia, °C (pod ciśnieniem atmosferycznym 1013,25 hPa)	Temperatura wrzenia, °C (pod ciśnieniem atmosferycznym 1013,25 hPa)
wodór	−259	−253
azot	−210	−196
tlen	−219	−183
propan	−188	−42
butan	−138	−0,5
etanol	−114	78
chlor	−101	−34
rtęć	−39	357
woda	0	100
olów	327	1755
złoto	1064	2856
żelazo	1538	2861
wolfram	3420	5660
diament	3540	4347

Nazwa substancji	Ciepło topnienia, $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	Ciepło parowania, $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
woda	335	2 260
alkohol etylowy	105	850
tlen	14	210
aluminium	400	10 900
olów	25	860
rtęć	12	300
żelazo	270	6 200

Paliwo	Wartość opałowa, $\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$	Wartość opałowa, $\frac{\text{MJ}}{\text{l}}$	Wartość opałowa, $\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$
węgiel kamienny	21 – 34	–	–
węgiel brunatny	7 – 21	–	–
olej opałowy *	43,2	38,8	–
gaz ziemny	–	–	33 **
mieszanka LPG *	46	25	107 **
drewno suche	18	–	–
pellet drzewny	18	–	–
alkohol etylowy *	27	21,3	–
benzyna *	42,8	30	–
wodór	120	–	10,8 **

* W przypadku paliw płynnych podano wartości dla 1 kilograma i 1 litra.

** Stan gazowy w warunkach normalnych (temperatura pokojowa, ciśnienie atmosferyczne).

Składnik pożywienia	Wartość energetyczna	
	$\frac{\text{kcal}}{\text{g}}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{g}}$
węglowodany	4	17
białko	4	17
tłuszcz	9	37
alkohol etylowy	7	29
kwasy organiczne	3	13
błonnik	2	8

Wartość kaloryczna wybranych produktów (na 100 g)			
Produkt	kcal	Produkt	kcal
banan	95	makaron czterojajeczny	391
boczek wędzony	477	marchewka	27
bułka pszenna	273	masło Extra	735
cebula	30	mleko 2%	51
chleb zwykły	248	ogórek	13
jajko kurze	139	orzechy włoskie	645
jogurt naturalny 2%	60	ser topiony	298
kielbasa zwyczajna	209	ziemniaki	77

Wydatek energetyczny organizmu podczas różnych form aktywności	
Forma aktywności	Wydatek energetyczny, W
sen	80
praca umysłowa	150
lekka praca fizyczna	175–350
średnia praca fizyczna	350–500
jazda na rowerze, gimnastyka	500
sport wyczynowy	1000