

21. Temperatura

21-1. Opis makroskopowy i mikroskopowy

Przy analizie zjawisk fizycznych zwykle koncentrujemy naszą uwagę na jakimś wy-cinku materii, który myślowo wyodrębniamy z otaczającego go świata. Taki fragment materii nazywamy *układem*. Wszystko poza układem, co ma jakiś wpływ na jego zachowanie, nazywamy *otoczeniem*. Po dokonaniu tego podziału staramy się określić zachowanie układu badając jego oddziaływanie z otoczeniem. Układem może być na przykład piłka; wówczas jej otoczeniem będzie powietrze i Ziemia. Usiłujemy zbadać, jak powietrze i Ziemia wpływają na ruch piłki przy jej spadku swobodnym. Innym przykładem układu może być gaz w zbiorniku, a ruchomy tłok i palnik Bunsena — jego otoczeniem. Usiłujemy zbadać, jak wpływa działanie tłoka i palnika na zachowanie gazu. We wszystkich tego typu przypadkach musimy wybrać wygodne do obserwacji wielkości, służące do opisu zachowania układu. Te wielkości, które są cechami układu jako całości, mierzonymi metodami laboratoryjnymi, nazywamy wielkościami *makroskopowymi*. Dla procesów, w których mamy do czynienia z wymianą ciepła, prawa określające związki między odpowiednimi wielkościami makroskopowymi (takimi jak ciśnienie, objętość, temperatura, energia wewnętrzna i entropia) tworzą podstawę gałęzi nauki, zwanej *termodynamiką*. Wiele z wielkości makroskopowych (na przykład ciśnienie, objętość i temperatura) jest bezpośrednio związanych z naszymi doznaniem zmysłowymi. Możemy również przyjmować punkt widzenia *mikroskopowy*. Rozważamy tu wielkości, które opisują atomy i cząsteczki tworzące układ, ich prędkości, energie, masy, momenty pędu, zachowanie podczas zderzeń, itp. Wielkości te oraz matematyczne sformułowania na nich oparte, tworzą bazę nauki, zwanej *mechaniką statystyczną*. Wielkości mikroskopowe nie są bezpośrednio związane z naszymi postrzeganiem zmysłowymi.

Dla dowolnego układu wielkości makroskopowe i mikroskopowe muszą być ze sobą związane; są one bowiem po prostu innymi sposobami opisu tej samej rzeczywistości. W szczególności powinniśmy umieć wyrazić pierwsze z nich przez drugie. Ciśnienie gazu traktowane makroskopowo jest mierzone efektywnie przy użyciu manometru (rys. 17-10). Z punktu widzenia mikroskopowego wiąże się ono z przypadającą na jednostkę powierzchni średnią szybkością przekazywania pędu (cząsteczki gazu uderzające w powierzchnię cieczy znajdującej się w manometrze przekazują jej swój pęd). W rozdziale 23-4 sformułujemy ilościowo mikroskopową definicję ciśnienia. Podobnie, temperaturę gazu można powiązać ze średnią energią kinetyczną ruchu cząsteczek. (Patrz paragraf 23-5.)

Jeżeli wielkości makroskopowe można wyrazić przez wielkości mikroskopowe, to powinniśmy również umieć wyrazić ilościowo prawa termodynamiki w języku mechaniki statystycznej. Istotnie możemy to zrobić. Warto tu przytoczyć wypowiedź R. C. Tolmana:

„Wyłożenie całej wiedzy zawartej w termodynamice, w języku bardziej abstrakcyjnej wiedzy, mechaniki statystycznej, stanowi jedno z najważniejszych osiągnięć fizyki. Ponadto, bardziej podstawowy charakter rozważań statystyczno-mechanicznych umożliwia rozszerzenie podstawowych zasad termodynamiki”.

Wykład wiadomości o zjawiskach cieplnych rozpoczniemy w tym rozdziale analizą pojęcia temperatury. Gdy zdobędziemy szerszą wiedzę, spróbujemy głębiej zrozumieć te zjawiska wiążąc opis mikroskopowy z opisem makroskopowym — mechanikę statystyczną z termodynamiką. Przeplatanie się mikroskopowego i makroskopowego punktu widzenia jest charakterystyczne dla współczesnej fizyki.

21-2. *Równowaga termiczna — zerowa zasada termodynamiki*

Zmysł dotyku zapewnia najprostszy sposób odróżniania przedmiotów gorących od zimnych. Posługując się dotykiem możemy uporządkować ciała według stopnia ich nagrzania, stwierdzając, że A jest cieplejsze niż B , B jest cieplejsze niż C , itd. Nazywamy to naszą wrażliwością na *temperaturę*. Taki sposób określania temperatury jest bardzo subiektywny i na pewno nie bardzo użyteczny dla potrzeb nauki. Proste doświadczenie zaproponowane w roku 1690 przez Johna Locke’a wykazuje niepewność tej metody. Niech ktokolwiek zanurzy jedną rękę w gorącej wodzie, a drugą w zimnej. Następnie niech zanurzy obie ręce w wodzie o pośrednim stanie nagrzania. Woda będzie robić wrażenie zimniejszej dla pierwszej ręki, a cieplejszej dla drugiej. Nasze wrażenie temperatury będzie więc wprowadzać w błąd. Ponadto zakres naszej wrażliwości na temperaturę jest ograniczony. Potrzebujemy obiektywnych i dających się wyrazić liczbowo pomiarów temperatury.

Spróbujmy na początek, zrozumieć pojęcie temperatury. Niech przedmiot A , który przy dotykaniu wydaje się zimny, będzie w bezpośrednim kontakcie z identycznym przedmiotem B , który wydaje się być gorący. Po dosyć długim czasie A i B będą dostarczać takich samych wrażeń temperaturowych. Powiemy wówczas, że A i B są w *równowadze termicznej* ze sobą. Możemy uogólnić zdanie „dwa ciała są w równowadze termicznej” stwierdzając, że dwa ciała są w takich stanach, że *po ich połączeniu*, układ złożony z nich będzie w równowadze. Logicznym, a zarazem wygodnym sposobem badania równowagi termicznej jest użycie trzeciego ciała, takiego jak termometr. Wyraża to postulat, często nazywany *zerową zasadą termodynamiki*: *Jeżeli każde z dwóch ciał A i B jest w równowadze termicznej z trzecim ciałem C (termometrem), to A i B są w równowadze termicznej ze sobą.*

Powyższe rozważania wyrażają koncepcję, że temperatura jest tą cechą układu, która osiąga taką samą wartość jak wartości tej cechy dla innych układów, jeżeli wszystkie te układy stykają się ze sobą. Znaczenie tego pojęcia pokrywa się z potocznym sensem temperatury jako miary ciepłoty układu, ponieważ zawsze, jak możemy to stwierdzić przy pomocy naszego zmysłu dotyku, ciepłoty wszystkich ciał wyrównują się, jeżeli tylko ciała te dostatecznie długo stykają się ze sobą. Myśl zawarta w sformułowaniu zerowej zasady termodynamiki, choć prosta, nie jest wcale oczywista. Na przykład Jones i Smith znają

Greene'a, natomiast mogą oni, ale nie muszą, znać się wzajemnie. Dwa kawałki żelaza przyciągają magnes, natomiast mogą, lecz nie muszą, przyciągać się wzajemnie.

Bardziej formalne, ale być może bardziej podstawowe, sformułowanie zerowej zasady dynamiki, brzmi: *Istnieje wielkość skalarna, nazywana temperaturą, która jest właściwością wszystkich układów termodynamicznych (w stanach równowagi), taka że równość temperatur jest warunkiem koniecznym i wystarczającym równowagi termicznej.* To sformułowanie* usprawiedliwia posługiwanie się temperaturą jako zmienną termodynamiczną; sformułowanie podane poprzednio jest wnioskiem z ostatniego stwierdzenia.

Nie wnikając w szczegóły można powiedzieć, że istotą zerowej zasady termodynamiki jest stwierdzenie: *Istnieje bardzo użyteczna wielkość zwana temperaturą.*

21-3. Pomiar temperatury

Istnieje wiele mierzalnych cech fizycznych, które, podobnie jak nasze fizjologiczne wrażenia, zmieniają się ze zmianą temperatury. Są między nimi takie cechy jak objętość płynów, długość pręta, opór elektryczny drutu, ciśnienie gazu zamkniętego w stałej objętości, czy kolor włókna żarówki. Każda z tych cech może zostać wykorzystana do zbudowania termometru — to znaczy do wyznaczenia jakiejś szczególnej „nieoficjalnej” skali temperatury. Taka skala temperatury jest określona przez wybór konkretnego ciała termometrycznego i szczególnej własności (cechy) termometrycznej danego ciała. Możemy więc zdefiniować skalę temperatury *zakładając*, że zależność między wybraną cechą termometryczną danej substancji i temperaturą mierzoną na naszej (nieoficjalnej) skali, jest ciągła i monotoniczna. Ciałem termometrycznym może być na przykład ciecz w szklanej rurce kapilarnej, a cechą termometryczną — długość słupa cieczy; ciałem termometrycznym może być również gaz zamknięty w naczyniu o stałej objętości, a własnością termometryczną — ciśnienie tego gazu; i tak dalej. *Musimy sobie zdawać sprawę z tego, że każdy określony wybór ciała termometrycznego i cechy termometrycznej — wraz z założeniem określającym związek tej cechy z temperaturą — prowadzi do jakiejś szczególnej skali temperatury; pomiary wykonywane przy użyciu tej skali niekoniecznie będą się zgadzały z pomiarami wykonywanymi przy zastosowaniu dowolnej innej, niezależnie zdefiniowanej skali temperatury.*

Ten oczywisty chaos w określaniu temperatury został usunięty na drodze powszechnego porozumienia w środowisku naukowym, zakładającego używanie szczególnego ciała termometrycznego, szczególnej cechy termometrycznej oraz szczególnej zależności funkcyjnej między wynikiem pomiaru tej cechy i powszechnie przyjętą skalą temperatury. Nieoficjalne skale temperatury określane na innej drodze, mogą więc zawsze być kalibrowane w odniesieniu do skali uniwersalnej. Taką skalę uniwersalną opiszemy w paragrafie 21-5 oraz równoważną jej inną skalę — w paragrafie 25-6.

Założmy, że zostało już wybrane ciało termometryczne. Oznaczmy przez X cechę termometryczną, którą chcemy wykorzystać do określenia skali temperatury. W sposób zupełnie dowolny przyjmujemy, że temperaturą T wybranego termometru i dowolnego układu będącego z nim w równowadze termodynamicznej jest następująca liniowa funkcja cechy X :

$$T(X) = aX. \quad (21-1)$$

* Patrz: J. S. Thomsen, A Restatement of the Zeroth Law of Thermodynamics, *American Journal of Physics*, 30, 294 (1962).

W wyrażeniu tym a jest stałą, którą musimy jeszcze określić. Wybierając liniową zależność dla $T(X)$ zapewniamy to, że *jednakowe różnice temperatur*, czyli przyrosty temperatury, *odpowiadają jednakowym zmianom X* . Znaczy to, na przykład, że słup rtęci w termometrze rtęciowym zawsze zmienia się o jedną jednostkę przy określonej z góry zmianie temperatury, niezależnie od temperatury początkowej. Wynika z tego również, że dwie temperatury mierzone tym samym termometrem pozostają w tym samym stosunku, co odpowiednie wartości X , tak że

$$\frac{T(X_1)}{T(X_2)} = \frac{X_1}{X_2}.$$

Ażeby określić stałą a , a tym samym wyskalować termometr, wprowadzamy *stały punkt standardowy*, dla którego wszystkie termometry muszą dawać te same wskazania temperatury T . Jako stały punkt wybrano taki punkt, w którym lód, ciekła woda i para wodna współistnieją w stanie równowagi, nazywany *punktem potrójnym wody*. Taki stan wody jest osiągalny tylko przy określonym ciśnieniu i jest jedyny w swoim rodzaju (rys. 21-1). Ciśnienie pary wodnej w punkcie potrójnym wynosi 4,58 mm Hg. Temperatura w tym standardowym ustalonym punkcie została arbitralnie przyjęta jako 273,16 stopni Kelvina i była skrótowo zapisywana w postaci 273,16°K. Później* stopień Kelvina (symbol °K) zastąpiono jednostką o nazwie *kelwin* (symbol K) i jednostkę termodynamicznej temperatury zdefiniowano następująco: *kelwin, jednostka temperatury termodynamicznej, jest równy 1/273,16 termodynamicznej temperatury punktu potrójnego wody***.

Jeżeli wartości w punkcie potrójnym oznaczmy wskaźnikiem tr , to dla dowolnego termometru otrzymamy

$$\frac{T(X)}{T(X_{tr})} = \frac{X}{X_{tr}}.$$

Dla *wszystkich* termometrów temperatura w punkcie potrójnym wynosi

$$T(X_{tr}) = 273,16 \text{ K},$$

tak że

$$T(X) = 273,16 \text{ K} \frac{X}{X_{tr}}. \quad (21-2)$$

Wobec tego, gdy cecha termometryczna przyjmuje wartość X , wtedy temperatura T , na konkretnej wybranej skali, określona jest w K przez $T(X)$; wartość $T(X)$ obliczamy z równania (21-2) podstawiając do jego prawej strony wartości X i X_{tr} .

Możemy teraz zastosować równanie (21-2) do kilku termometrów. Dla termometru cieczowego zmienną X jest długość słupa cieczy L ; równanie (21-2) prowadzi więc do wzoru:

$$T(L) = 273,16 \text{ K} \frac{L}{L_{tr}}.$$

Dla gazu pod stałym ciśnieniem zmienną X jest objętość gazu V , a więc równanie (21-2) przyjmuje postać

$$T(V) = 273,16 \text{ K} \frac{V}{V_{tr}} \quad (P = \text{const}).$$

* W roku 1967 na Generalnej Konferencji Miar w Paryżu.

** Punkt potrójny wody wybrano zamiast (poprzednio używanego) punktu zamarzania wody, ze względu na to, że pierwszy z tych punktów można odtwarzać około 10 razy łatwiej niż drugi.

Dla gazu w stałej objętości zmienną X jest ciśnienie gazu P , więc równanie (21-2) przekształca się odpowiednio w równanie

$$T(P) = 273,16 \text{ K} \frac{P}{P_{tr}} \quad (V = \text{const}).$$

Dla oporowego termometru platynowego zmienną X jest opór elektryczny R , więc

$$T(R) = 273,16 \text{ K} \frac{R}{R_{tr}}.$$

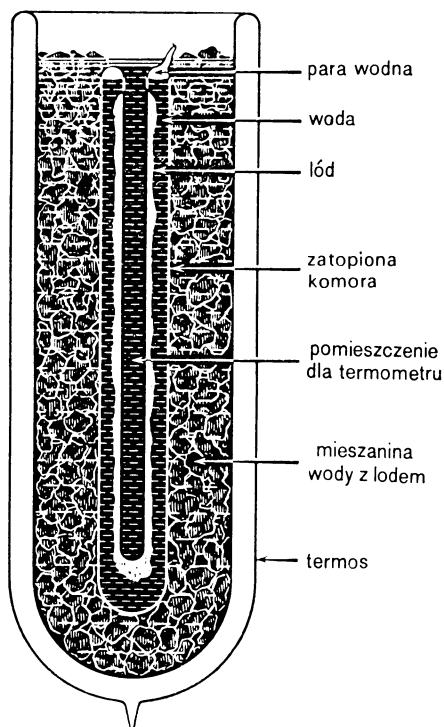
Podobnie jest dla innych ciał termometrycznych i innych cech termometrycznych.

Przykład 1. Gdy czujnik pewnego platynowego termometru oporowego jest umieszczony w naczyniu do mierzenia punktu potrójnego wody (takim jak na rysunku 21-1), ma on wówczas opór $90,35 \Omega$. Jaką temperaturę obliczymy na podstawie równania (21-2), gdy czujnik zostanie umieszczony w takim środowisku, że jego opór będzie równy $96,28 \Omega$?

Z równania (21-2)

$$T(X) = 273,16 \text{ K} \frac{X}{X_{tr}} = 273,16 \text{ K} \frac{96,28}{90,35} = 280,6 \text{ K}.$$

Zauważmy, że jest to temperatura na nieoficjalnej skali, określona przez zastosowanie równania (21-2) do konkretnego urządzenia, którym jest platynowy termometr oporowy.



Rys. 21-1. Komora do wyznaczania temperatury punktu potrójnego wody znajdująca się w Narodowym Biurze Wzorców. Zawiera ona czystą wodę; po całkowitym usunięciu powietrza komora została zatopiona, a następnie zanurzona w kąpeli wody z lodem. Gdy w komorze znajduje się w stanie równowagi równocześnie woda, para wodna i lód, mówimy, że układ jest w punkcie potrójnym. Termometr, który ma być wyskalowany, umieszcza się w centralnym kanale

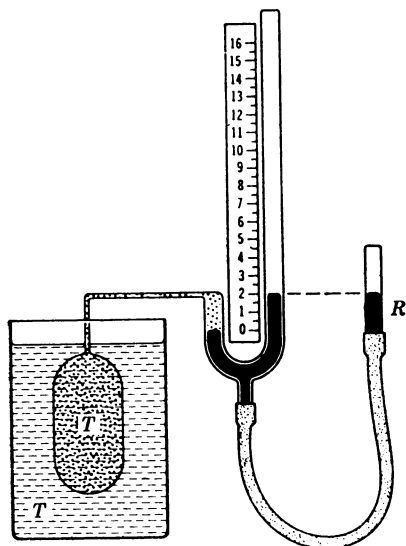
Powstaje teraz pytanie, czy wartość, którą otrzymujemy dla temperatury układu, zależy od wyboru termometru użytego do jej pomiaru. Zabezpieczyliśmy, z definicji, to że wszystkie rodzaje termometrów zgadzają się w stałym punkcie standardowym, ale co się dzieje w innych punktach? Możemy sobie wyobrazić szereg pomiarów, podczas których temperatura danego układu jest mierzona równocześnie kilkoma różnymi termometrami. Wyniki takich pomiarów wskazują na to, że różne termometry dają różne wskazania. Nawet gdy posługujemy się różnymi termometrami tego samego rodzaju, na przykład termometrami gazowymi o ustalonym ciśnieniu, zawierającymi różne gazy, otrzymujemy różne wskazania temperatury dla danego układu w danym stanie.

Dlatego też, żeby otrzymać jednoznacznie określoną skalę temperatury, musimy wybrać jeden, określonego rodzaju termometr jako wzorcowy. Wyboru dokonamy kierując się nie względami wygody doświadczalnej, lecz na podstawie badań, czy dana skala temperatury, zdefiniowana przy użyciu konkretnego termometru, jest użyteczna dla formułowania praw fizyki. Najmniejsze odchylenia w odczytach stwierdzamy dla wszelkiego rodzaju termometrów gazowych o stałej objętości, co powoduje, że jako wzorcowe ciało termometryczne wybieramy gaz. Okazuje się, że gdy maleje ilość gazu użytego w takim termetrze, a co za tym idzie, także jego ciśnienie, wówczas maleją również różnice we wskazaniach termometrów zawierających różne rodzaje gazów. Wydaje się więc, że jest coś istotnie ważnego w zachowaniu się termometrów o stałej objętości zawierających gaz pod niskim ciśnieniem.

21-4. Termometr gazowy o stałej objętości

Jeżeli utrzymuje się stałą objętość gazu, to ciśnienie zależy od temperatury i rośnie jednostajnie ze wzrostem temperatury. W termetrze gazowym ze stałą objętością cechą termometryczną jest ciśnienie przy stałej objętości.

Na rysunku 21-2 przedstawiono schematycznie termometr. Składa się on z kolby, wykonanej (w zależności od zakresu temperatur, do mierzenia których termometr jest



Rys. 21-2. Termometr gazowy o stałej objętości. Dopóki rtęć w lewym ramieniu manometru pozostaje w tym samym położeniu na skali (zero), objętość zamkniętego gazu jest stała. Menisk można zawsze doprowadzić do położenia zerowego przez podnoszenie lub opuszczanie zbiornika *R*

przeznaczony) ze szkła, porcelany, kwarcu lub stopu platynowo-irydowego, oraz z manometru rtęciowego dołączonego do niej za pomocą kapilarnej rurki. Kolbę zawierającą jakiś gaz umieszcza się w kąpeli, czyli w otoczeniu, którego temperaturę trzeba zmierzyć; podnosząc lub opuszczając zbiornik rtęci, można doprowadzić do pokrycia się poziomu rtęci w lewym ramieniu rurki w kształcie litery U z naniesionym na niej znacznikiem, utrzymując w ten sposób gaz w stałej objętości. Po wykonaniu tego odczytujemy wysokość słupka rtęci w prawym ramieniu. Ciśnienie zamkniętego gazu jest równe różnicy wysokości słupków rtęci (pomnożonej przez ρg) plus ciśnienie atmosferyczne, jakie wskazuje barometr. W praktyce odczyt jest bardziej skomplikowany, musimy wprowadzić wiele poprawek, na przykład (1) uwzględnić małe zmiany objętości związane z niewielkim zmniejszeniem lub zwiększeniem rozmiarów kolby, (2) uwzględnić fakt, że niecały zamknięty gaz jest zanurzony w kąpeli (odnosi się to do gazu w kapilarnej rurce). Założmy, że dokonano wszystkich poprawek i że P jest skorygowaną wartością ciśnienia w temperaturze kąpeli. Wówczas temperatura jest prowizorycznie (patrz niżej), dana wzorem

$$T(P) = 273,16 \text{ K} \frac{P}{P_{tr}} \quad (V = \text{const}). \quad (21-3)$$

Termometr gazowy o stałej objętości, używany w sposób opisany poniżej, jest termometrem, który służy do ustalania skali temperatury, powszechnie używanej obecnie w pracy naukowej.

21-5. Skala temperatury związana z gazem doskonałym

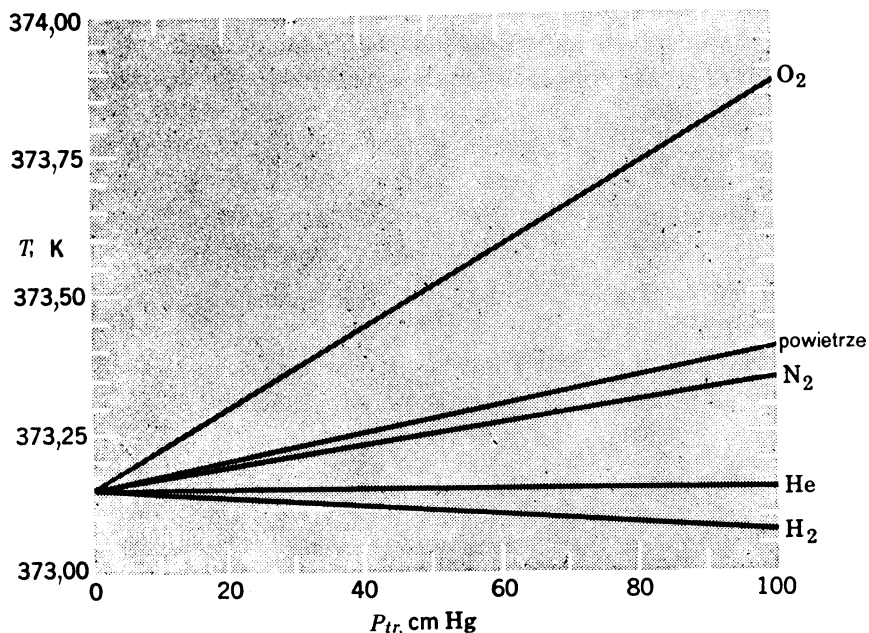
Wpuścmy do kolby termometru gazowego o stałej objętości taką ilość gazu, żeby ciśnienie P_{tr} w kolbie otoczonej wodą w punkcie potrójnym, miało określoną wartość, powiedzmy 80 cm Hg. Następnie umieszczamy kolbę w otoczeniu nasyconej pary wodnej o ciśnieniu 1 atm i utrzymując objętość taką samą jak poprzednio odczytujemy ciśnienie P_w , tzn. ciśnienie w punkcie wrzenia wody, w tym przypadku P_{w80} , po czym obliczamy prowizorycznie temperaturę ze wzoru $T(P_{w80}) = 273,16 \text{ K} (P_{w80}/80 \text{ cm Hg})$. Następnie wypuszczamy trochę gazu, tak żeby P_{tr} miało wartość mniejszą, powiedzmy 40 cm Hg. Teraz mierzymy nową wartość P_w i obliczamy prowizorycznie temperaturę $T(P_{w40}) = 273,16 \text{ K} (P_{w40}/40 \text{ cm Hg})$. Kontynuujemy to postępowanie zmniejszając znów ilość gazu w kolbie i dla nowej, mniejszej wartości P_{tr} liczymy temperaturę $T(P_w)$ w punkcie wrzenia. Jeżeli zrobimy wykres wartości $T(P_w)$ w funkcji P_{tr} , to mając dostatecznie dużo wyników, możemy ekstrapolować otrzymaną krzywą aż do przecięcia z osią rzędnych, co odpowiada $P_{tr} = 0$.

Na rysunku 21-3 przedstawiliśmy krzywe otrzymane w wyniku takiego postępowania, dla termometrów o stałej objętości zawierających różne gazy. Z krzywych tych wynika, że wskazania temperatury przez termometry gazowe o stałej objętości przy zwykłych wartościach stosowanych ciśnień zależą od rodzaju użytego gazu. Natomiast przy obniżaniu ciśnienia odniesienia odczyty temperatury na termometrach gazowych o stałej objętości zawierających różne gazy zbliżają się do tej samej wartości. Dlatego też *ekstrapolowana wartość temperatury zależy wyłącznie od ogólnych właściwości gazów, a nie od wyboru*

konkretnego gazu. W związku z tym wprowadzamy definicję gazowej skali temperatur związaną z gazem doskonałym posługując się zależnością

$$T = 273,16 \text{ K} \lim_{P_{tr} \rightarrow 0} \frac{P}{P_{tr}} \quad (V = \text{const}). \quad (21-4)$$

Tak więc przyjmujemy, że naszym wzorcowym termometrem jest termometr gazowy o stałej objętości, a do określania skali temperatury służy wzór (21-4).



Rys. 21-3. Odczyty wskazań termometru gazowego o stałej objętości. Wykreślono tu wartości temperatury T skondensowanej pary wodnej w funkcji P_{tr} dla różnych użytych gazów. Gdy ilość gazu w termometrze zostaje zmniejszona, jego ciśnienie P_{tr} w punkcie potrójnym obniża się. Zauważmy, że przy ustalonej szczególnej wartości P_{tr} , wartości T dawane przez termometry z różnymi gazami różnią się od siebie. Rozbieżność jest niewielka, lecz mierzalna; w najbardziej skrajnym z przedstawionych przypadków (O_2 i H_2 przy 100 cm Hg) osiąga około 0,2%; zauważmy, że oś pionowa obejmuje zaledwie 1,00 K. Hel daje prawie taką samą temperaturę T przy wszystkich ciśnieniach (krzywa jest prawie pozioma), tak że jego zachowanie jest najbardziej zbliżone do zachowania gazu doskonałego, w całym przedstawionym obszarze

Chociaż tak określona skala temperatur nie zależy od właściwości konkretnego gazu, to jednak zależy od właściwości gazów w ogóle (tzn. od właściwości tak zwanego gazu doskonałego). Dlatego też, żeby zmierzyć jakąś temperaturę, musimy mieć gaz o takiej temperaturze. Najniższa temperatura, jaką można zmierzyć jakimkolwiek termometrem gazowym, jest równa około 1 K. Ponieważ hel przechodzi w ciecz w temperaturze niższej niż jakikolwiek inny gaz, do otrzymania takiej temperatury musimy użyć helu pod niskim ciśnieniem. Nie można więc przypisać żadnego eksperymentalnego sensu temperaturom poniżej 1 K, posługując się termometrem gazowym.

Chcielibyśmy określić skalę temperatur w sposób *niezależny od właściwości jakiejkolwiek określonej substancji*. W paragrafie 25-6 pokażemy, że taką skalą jest *bezwzględna*

termodynamiczna skala temperatur, nazywana skalą Kelvina. Pokażemy również, że idealna skala gazowa i skala Kelvina są identyczne w zakresie temperatur, w którym może być użyty termometr gazowy. Wyrażając więc temperaturę w idealnej skali gazowej, możemy pisać K, tak jak zresztą już to robiliśmy.

W paragrafie 25-6 pokażemy również, że skala Kelvina ma zero bezwzględne (0 K) i że nie istnieją temperatury niższe od 0 K. Bezwzględne zero temperatury oparło się wszelkim doświadczalnym próbom uzyskania go, chociaż można dowolnie zbliżać się do niego*. Istnienie zera bezwzględnego wynika z ekstrapolacji. Czytelnik nie powinien uważać zera bezwzględnego za stan o zerowej energii ruchu. Pogląd, że wszelki ruch cząsteczek w zerze bezwzględnym zamiera, jest fałszywy. Opiera się on na założeniu, że czysto makroskopowe pojęcie temperatury jest ściśle związane z mikroskopowym pojęciem ruchu cząsteczek. Gdy usiłujemy przeprowadzić takie powiązanie, przekonujemy się, że przy zbliżaniu do zera bezwzględnego energia kinetyczna cząsteczek zbliża się do wartości skończonej, tzw. energii „zerowej”. Energia cząsteczek osiąga w zerze bezwzględnym minimum, ale nie zero.

W tablicy 21-1 zestawiliśmy temperatury (w skali Kelvina) różnych ciał i procesów.

Tablica 21-1

Niektóre temperatury** (K)

węglowa reakcja termojądrowa	$5 \cdot 10^8$
helowa reakcja termojądrowa	10^8
wnętrze Słońca	10^7
korona Słońca	10^6
fala uderzeniowa w powietrzu, przy liczbie Macha 20	$2,5 \cdot 10^4$
mgławica świecąca	10^4
powierzchnia Słońca	$6 \cdot 10^3$
topnienie wolframu	$3,6 \cdot 10^3$
topnienie ołowiu	$6,0 \cdot 10^2$
zamarzanie wody	$2,7 \cdot 10^2$
skraplanie tlenu (1 atm)	$9,0 \cdot 10^1$
skraplanie wodoru (1 atm)	$2,0 \cdot 10^1$
skraplanie helu (^4He , 1 atm)	4,2
skraplanie helu (^3He) w najniższym osiągalnym ciśnieniu	$3,0 \cdot 10^{-1}$
adiabatyczne rozmagnesowanie soli paramagnetycznych	10^{-3}
adiabatyczne rozmagnesowanie jąder atomowych	10^{-6}

** Patrz: *Scientific American*, September 1954, numer specjalny, poświęcony ciepłu.

* Jest rzeczą możliwą zbudowanie układu mającego ujemne temperatury Kelvina. Najbardziej zdumiewające jest to, że takie temperatury są osiągane nie na drodze przechodzenia przez 0 K, lecz przez przejście obszaru temperatur nieskończonych. Inaczej mówiąc, ujemne temperatury nie są „zimniejsze” niż zero absolutne, są natomiast „gorętsze” niż temperatury nieskończone. Patrz: Castle, Emmerich, Heikes, Miller i Rayne, *Science by Degrees*, Walker i Co, New York, 1965. Zero bezwzględne pozostaje doświadczalnie nieosiągalne.

21-6. Skala Celsjusza i skala Fahrenheita

Obecnie w powszechnym użyciu są dwie skale: skala Celsjusza* i skala Fahrenheita. Są one zdefiniowane w odniesieniu do skali Kelvina, która jest podstawową skalą temperatury używaną w nauce.

W skali Celsjusza jako jednostki używa się „stopnia Celsjusza” (symbol $^{\circ}\text{C}$), o tej samej wielkości co stopień w skali Kelvina. Jeżeli T_{C} jest temperaturą w skali Celsjusza, to wzór

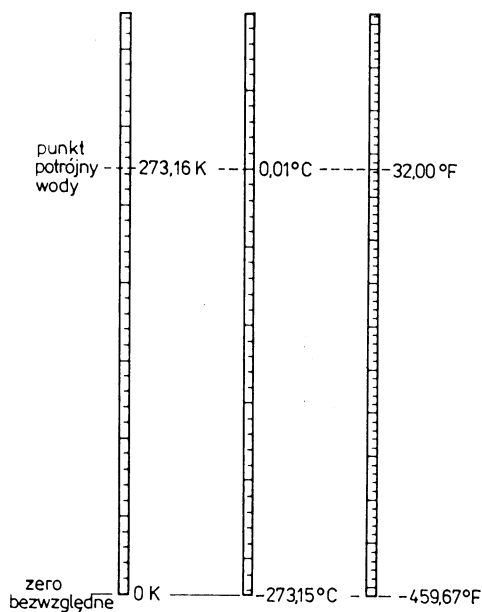
$$T_{\text{C}} = T - 273,15^{\circ}\text{C} \quad (21-5)$$

daje zależność między temperaturą w skali Celsjusza T_{C} ($^{\circ}\text{C}$) i temperaturą w skali Kelvina T (K). Widzimy, że temperatura w punkcie potrójnym wody (= 273,16 K, z definicji) odpowiada temperaturze $0,01^{\circ}\text{C}$. Z doświadczenia wynika, że temperatura, w której lód i woda z rozpuszczonym w niej powietrzem są w równowadze pod ciśnieniem atmosferycznym (tzw. punkt topnienia lodu) wynosi $0,00^{\circ}\text{C}$, a temperatura, w której są w równowadze woda i para wodna pod ciśnieniem atmosferycznym, wynosi $100,00^{\circ}\text{C}$ (punkt wrzenia wody).

Skala Fahrenheita, powszechnie używana w krajach anglosaskich (z wyjątkiem samej Anglii, która w 1964 roku przyjęła skalę Celsjusza dla użytku handlowego i cywilnego), nie jest używana w pracach naukowych. Związek pomiędzy skalami Fahrenheita i Celsjusza jest określony równaniem

$$T_{\text{F}} = 32 + \frac{9}{5}T_{\text{C}}.$$

Z zależności tej możemy wyciągnąć wniosek, że punkt topnienia lodu ($0,00^{\circ}\text{C}$) równy jest 32°F , że punkt wrzenia wody ($100,00^{\circ}\text{C}$) jest równy 212°F i że jeden stopień Fahrenheita jest dokładnie $\frac{5}{9}$ razy mniejszy niż jeden stopień Celsjusza. Na rysunku 21-4 porównaliśmy skalę Kelvina, Celsjusza i Fahrenheita.



Rys. 21-4. Skala temperatur Kelvina, Celsjusza i Fahrenheita

* Skala ta, oparta na skali wynalezionej w 1742 roku przez Szweda o nazwisku Celsjusz, była nazywana skalą stustopniową aż do roku 1948, kiedy to IX Generalna Konferencja Miar zdecydowała, że nazwa ma być zmieniona.

21-7. Międzynarodowa praktyczna skala temperatur

Podsumujmy myśli zawarte w kilku ostatnich paragrafach. Stałym punktem wzorcowym jest w termometrii punkt potrójny wody, któremu w sposób arbitralny przypisujemy wartość temperatury 273,16 K. Wzorcowym termometrem jest termometr gazowy o stałej objętości. Do określenia skali temperatury związanej z gazem doskonałym używamy ekstrapolowanej skali gazowej przy użyciu wzoru $T = 273,16 \text{ K} \lim_{P_{tr} \rightarrow 0} (P/P_{tr})$. Skala

ta jest identyczna z (bezwzględną termodynamiczną) skalą Kelvina w zakresie temperatur, w których da się użyć termometru gazowego.

Posługując się w ten sposób termometrem wzorcowym, możemy eksperymentalnie określić inne punkty odniesienia dla pomiarów temperatury, nazywane punktami stałymi. W tablicy 21-2 zestawiono najważniejsze punkty stałe, uzyskane na drodze eksperymentalnej. Po wyznaczeniu temperatury w K, przy pomocy wzoru (21-5) temperatury możemy wyrazić w °C.

Tablica 21-2

Punkty stałe na międzynarodowej praktycznej skali temperatur*

Substancja	Stan	Temperatura	
		K	°C
wodór	punkt potrójny	13,81	−259,34
wodór	punkt wrzenia**	17,042	−256,108
wodór	punkt wrzenia	20,28	−252,87
neon	punkt wrzenia	27,102	−246,048
tlen	punkt potrójny	54,361	−218,789
tlen	punkt wrzenia	90,188	−182,962
woda***	punkt potrójny	273,16	0,01
woda***	punkt wrzenia	375,15	100
cynk	punkt zamarzania	692,73	419,58
srebro	punkt wrzenia	1235,08	961,93
złoto	punkt wrzenia	1337,58	1064,43

* Tak zwanej skali IPTS-68, przyjętej w roku 1968 na Generalnej Konferencji Miar w Paryżu.

** Ten punkt wrzenia odnosi się do ciśnienia 25/76 atm. Wszystkie inne punkty wrzenia (i wszystkie punkty zamarzania) odnoszą się do 1 atm.

*** Woda powinna mieć skład izotopowy taki jak woda morska.

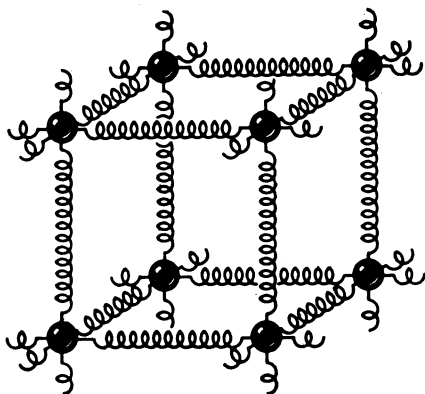
Wyznaczenie temperatur gazu doskonałego jest pracą wymagającą dużej staranności i nie miałyby sensu wyznaczanie w podobny sposób wszystkich temperatur.

Międzynarodowa praktyczna skala temperatur — IPTS (*International Practical Temperature Scale*) — została przystosowana w roku 1927 (z poprawkami w latach 1948 i 1968) do łatwego użytku dla celów praktycznych, takich jak kalibrowanie przyrządów pomiarowych przemysłowych i naukowych. Skala ta jest zespołem przepisów zapewniających najlepsze z osiągalnych w praktyce przybliżenie do skali Kelvina. Przyjęto zespół punktów stałych (podstawowe punkty z tablicy 21-2) oraz wyszczególniono zespół instru-

mentów pomiarowych, które powinny być używane do interpolowania poza skrajnymi punktami. IPTS-68 różni się od skali Kelvina w temperaturach pomiędzy punktami stałymi, ale różnice są zwykle do pominięcia. IPTS-68 stała się legalnym wzorcem niemal we wszystkich krajach.

21-8. Rozszerzalność cieplna

Typowymi zjawiskami związanymi ze zmianami temperatury są zmiany rozmiarów i zmiany stanu skupienia ciał. Zajmiemy się obecnie zmianami rozmiarów, którym nie towarzyszą zmiany stanu. Rozpatrzmy prosty model ciała krystalicznego. Atomy są utrzymywane razem w regularnym układzie przestrzennym dzięki siłom pochodzenia elektrycznego. Siły pomiędzy atomami są takie, jak gdyby atomy były połączone między sobą zespołem sprężyn; możemy więc wyobrażać sobie ciało stałe jako mikroskopijny materac sprężynowy (rys. 21-5). Sprężyny te są bardzo mocne (zadanie 9, rozdział 15) i jest ich około 10^{22} w centymetrze sześciennym. W każdej temperaturze atomy ciała drgają. Amplituda drgań wynosi około 10^{-9} cm, a częstość około 10^{13} Hz.



Rys. 21-5. Ciało stałe zachowuje się pod wieloma względami podobnie do mikroskopijnego „materaca sprężynowego”, w którym cząsteczki utrzymywane są razem przez siły sprężyste

Gdy temperatura rośnie, rośnie również średnia odległość między atomami. Prowadzi to do rozszerzania całego ciała ze wzrostem temperatury. Zmiana *jakiegokolwiek* wymiaru liniowego ciała, takiego jak długość, szerokość czy grubość, nazywana jest *rozszerzalnością liniową*. Oznaczmy długość danego wymiaru liniowego literą l . Wówczas zmiana długości, związana ze zmianą temperatury ΔT , wynosi Δl . Stwierdzono doświadczalnie, że jeżeli ΔT jest dostatecznie małe, to zmiana długości Δl jest proporcjonalna do zmiany temperatury ΔT i do długości początkowej l . Dlatego też możemy napisać

$$\Delta l = \alpha l \Delta T, \quad (21-6)$$

gdzie α , nazywane *współczynnikiem rozszerzalności liniowej*, ma różne wartości dla różnych materiałów. Przekształcając ten wzór otrzymujemy

$$\alpha = \frac{1}{l} \frac{\Delta l}{\Delta T},$$

z czego widać, że α ma znaczenie względnej zmiany długości, przy zmianie temperatury o jeden stopień.

Dla ścisłości należy dodać, że wartość α zależy od temperatury końcowej, a także od temperatury, w której zmierzono długość l (patrz zadanie 13). Jednakże zmiana tej wartości jest zwykle do pominięcia w porównaniu z dokładnością wykonywania pomiarów dla potrzeb technicznych. Możemy z dobrym przybliżeniem przyjmować α dla danego materiału za stałą niezależną od temperatury. W tabelicy 21-3 zestawiliśmy eksperymentalne wartości średniego współczynnika rozszerzalności liniowej kilku często spotykanych ciał stałych. Z tego, że $\bar{\alpha}$ jest dodatnie, wynika, że wszystkie wymienione substancje rozszerzają się przy wzroście temperatury. Wzrost długości ciała przy zmianie temperatury o $100\text{ }^{\circ}\text{C}^*$ (100 K) jest rzędu 1 mm na 1 m długości.

Tablica 21-3

Niektóre wartości** $\bar{\alpha}$

Substancja	$\bar{\alpha}\text{ (K)}^{-1}$	Substancja	$\bar{\alpha}\text{ (K)}^{-1}$
glin	$23 \cdot 10^{-6}$	twarda guma	$80 \cdot 10^{-6}$
mosiądz	$19 \cdot 10^{-6}$	lód	$51 \cdot 10^{-6}$
miedź	$17 \cdot 10^{-6}$	inwar	$0,7 \cdot 10^{-6}$
szkło (zwykcyjne)	$9 \cdot 10^{-6}$	ołów	$29 \cdot 10^{-6}$
szkło (pyrex)	$3,2 \cdot 10^{-6}$	stal	$11 \cdot 10^{-6}$

** Dla zakresu temperatur od 0°C do 100°C ; dla lodu od -10°C do 0°C .

Przykład 2. Stalowa taśma ze skalą metryczną została wykonana w ten sposób, że dokładność odstępów milimetrowych w pewnej temperaturze jest rzędu $5 \cdot 10^{-5}\text{ mm}$. Jakie są dopuszczalne zmiany temperatury podczas skalowania podziałki?

Z równania (21-6)

$$\Delta l = \alpha l \Delta T$$

po podstawieniu danych otrzymujemy

$$5 \cdot 10^{-5}\text{ mm} = (11 \cdot 10^{-6}/\text{K}) \cdot (1,0\text{ mm}) \Delta T$$

(wartość na $\bar{\alpha}$ dla stali odczytaliśmy z tablicy 21-3). Po wykonaniu obliczeń otrzymujemy $\Delta T \cong 5\text{ K}$. Przy wykonywaniu pomiarów trzeba utrzymywać taką temperaturę, w jakiej odbywało się kalibrowanie i to z dokładnością rzędu 5 K .

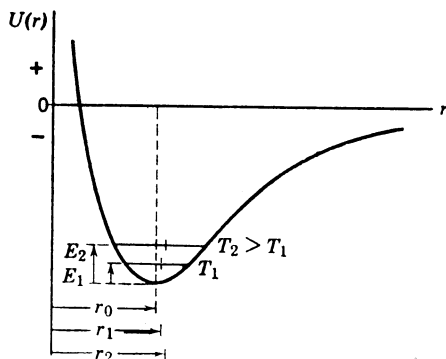
Warto zauważyć, że jeśli się użyje stopu inwarowego zamiast stali, to przy tej samej tolerancji można dopuścić zmiany temperatury do 75 K (patrz tablica 21-3), a przy ograniczeniu zmian temperatury do poprzedniej wartości ($\Delta T = 5\text{ K}$) można osiągnąć dokładność o ponad rząd wielkości lepszą.

Rozszerzalność cieplna ciał stałych odpowiada według opisu mikroskopowego wzrostowi średnich odległości między atomami ciała. Krzywa, opisująca zależność energii potencjalnej oddziaływania dwóch sąsiednich atomów ciała krystalicznego od odległości między jądrami tych atomów, jest niesymetryczną krzywą podobną do krzywej przedstawionej na rys. 21-6. Gdy atomy zbliżają się do siebie, odległość między nimi staje się mniejsza niż odległość r_0 w położeniu równowagi, silnie odpychające siły zaczynają odgrywać decydującą rolę i energia potencjalna szybko rośnie ($F = -dU/dr$); gdy atomy oddalają się od siebie, odległość między nimi staje się większa niż w położeniu równowagi, nieco słabsze siły przyciągające zaczynają przeważać i krzywa energii potencjalnej znów rośnie, ale znacznie wolniej. Przy danej energii oscylacji odległość między atomami będzie się zmieniać periodycznie od wartości minimalnej do maksymalnej i wówczas, ze względu na asymetrię krzywej energii potencjalnej, średnie oddalenie atomów będzie większe

* $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ jest jednostkowym przedziałem temperatury (ΔT_C) mierzonym na skali Celsjusza. Natomiast jeden stopień Celsjusza (1°C) jest konkretną wartością temperatury (T_C) odczytaną na tej skali.

Symbol $^{\circ}\text{C}$ jest nieznanym w literaturze polskiej; został zastosowany przez Autorów w celach dydaktycznych. Zamiast $^{\circ}\text{C}$ jako jednostki dla ΔT będziemy używać K . (przyp. tłum.).

niż odległość w położeniu równowagi. Przy jeszcze większej energii oscylacji średnie oddalenie może wzrastać jeszcze szybciej. Efekt wzrostu średniego oddalenia jest jeszcze większy, ponieważ obliczając średnie w czasie odchylenie należy brać pod uwagę to, że atomy stosunkowo najdłużej przebywają w odległościach skrajnych (mniejsza prędkość w ruchu drgającym). Ponieważ ze wzrostem temperatury energia oscylacji wzrasta, rośnie również średnie oddalenie atomów, więc ciało jako całość rozszerza się.



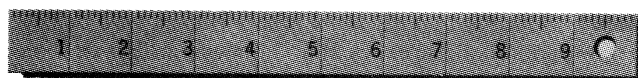
Rys. 21-6. Krzywa energii potencjalnej oddziaływania dwóch sąsiednich atomów krystalicznego ciała stałego w funkcji odległości między ich jądrami. Odległość w stanie równowagi wynosi r_0 . Ponieważ krzywa jest asymetryczna, średnia odległość (r_1, r_2) rośnie wraz ze wzrostem temperatury (T_1, T_2), a więc ze wzrostem energii drgań (E_1, E_2)

Zauważmy, że gdyby krzywa energii potencjalnej była symetryczna, to niezależnie od wielkości amplitudy oscylacji średnie oddalenie byłoby równe odległości w położeniu równowagi. Z powyższego omówienia wynika, że rozszerzalność cieplna jest prostą konsekwencją odstępstw od symetryczności (asymetrii) krzywej energii potencjalnej, charakteryzującej ciało stałe.

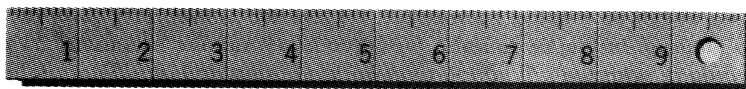
Niektóre ciała krystaliczne, w pewnych zakresach temperatur, mogą zmniejszać swoje rozmiary ze wzrostem temperatury. Poprzednio przeprowadzona analiza jest poprawna przy założeniu, że obecne są tylko rodzaje drgań (mody) związane ze ściskaniem, a więc podłużne, a przynajmniej takie mody przeważają. Jednakże drgania w ciele stałym mogą również mieć charakter ścinający (poprzeczny), a przy takich rodzajach drgań istnieje możliwość zmniejszania wymiarów ciała (zmniejszania średniego oddalenia między atomami) ze wzrostem temperatury. Dla pewnych typów struktur krystalicznej i w pewnych obszarach temperatury poprzeczne mody oscylacji mogą przeważać nad podłużnymi, przyczyniając się do tego, że wypadkowy współczynnik rozszerzalności cieplnej jest ujemny.

Należy podkreślić, że przedstawione tu modele mikroskopowe są poważnym uproszczeniem złożonych zjawisk, które należy opisywać z większą wnikliwością, posługując się termodynamiką i teorią kwantów.

Dla wielu ciał stałych, nazywanych *ciałami izotropowymi*, procentowa zmiana długości, przy danej zmianie temperatury, jest taka sama we wszystkich kierunkach w ciele. Rozszerzenie jest wtedy podobne do powiększenia fotograficznego, z tym że jest teraz trójwymiarowe. Jeżeli na przykład weźmiemy płaską płytę z wyciętym w niej otworem, to przy danym przyroście temperatury ΔT , $\Delta l/l (= \alpha \Delta T)$ jest takie samo dla jej długości,



a)



b)

Rys. 21-7. Ta sama stalowa linijka w dwóch różnych temperaturach. Podczas rozszerzania każdy wymiar rośnie w tym samym stosunku: podziałka, cyfry, otwór i grubość linijki zostają zwiększone tyle samo razy. (Przedstawione rozszerzenie jest oczywiście przesadzone, ponieważ musiałoby ono odpowiadać teoretycznemu wzrostowi temperatury o około 100 000 K!)

grubości przekątnych (w tym również przestrzennych), a także dla średnicy otworu. Wszystkie linie, zarówno proste, jak i zakrzywione podczas wzrostu temperatury o jeden stopień wydłużają się w stosunku α . Jeżeli narysujesz swoje imię na płycie, zobaczysz, że długość linii obrazujących Twoje imię zmienia się w tym samym stosunku jak długości wszystkich innych linii. Analogię z powiększeniem fotograficznym ilustruje rys. 21-7.

Pamiętając o tym wszystkim Czytelnik może się przekonać (patrz zadania 14 i 16), że względna zmiana powierzchni A na jeden stopień przyrostu temperatury jest dla ciała izotropowego, z wielką dokładnością, równa 2α , tak że

$$\Delta A = 2\alpha A \Delta T;$$

względna zmiana objętości V na jeden stopień przyrostu temperatury dla ciała izotropowego wynosi 3α , tak że

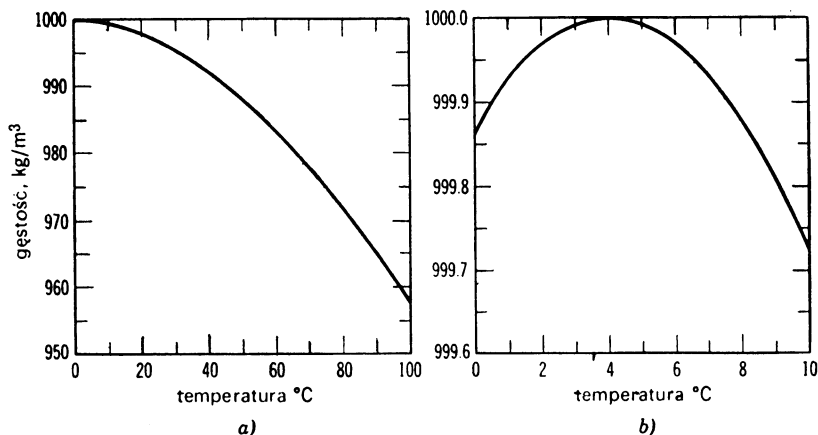
$$\Delta V = 3\alpha V \Delta T.$$

Ponieważ kształt płynu nie jest określony, w przypadku płynów istotna jest tylko zmiana objętości związana ze zmianą temperatury. Gazy mocno reagują na zmiany temperatury lub ciśnienia, natomiast zmiany objętości cieczy ze zmianą temperatury lub ciśnienia są dużo mniejsze. Przyjmując, że β jest współczynnikiem rozszerzalności objętościowej cieczy, to znaczy że

$$\beta = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta T},$$

możemy się przekonać, że β mało zależy od temperatury. Ciecze na ogół powiększają swoją objętość ze wzrostem temperatury, przy czym wzrost objętości jest zwykle około dziesięć razy większy niż dla ciał stałych.

Najpospolitsza z cieczy — woda — nie zachowuje się pod tym względem podobnie do innych cieczy. Na rys. 21-8 przedstawiliśmy krzywą rozszerzalności wody. Widać z niej, że powyżej 4°C objętość wody rośnie ze wzrostem temperatury, chociaż wzrost nie jest liniowy. Natomiast gdy temperatura jest obniżana od 4°C do 0°C , woda rozszerza się, zamiast się kurczyć. W żadnej innej pospolitej cieczy nie obserwuje się rozszerzania



Rys. 21-8. (a) Zmiany gęstości wody odpowiadające zmianom temperatury pod stałym ciśnieniem. (b) Zmiany na odcinku od 0°C do 10°C , przedstawione bardziej szczegółowo

ze zmniejszeniem temperatury; zdarza się to w substancjach podobnych do gumy i w niektórych ciałach krystalicznych (w ograniczonym przedziale temperatur). Największą gęstość*, równą 1000 kg/m^3 , czyli $1,000 \text{ g/cm}^3$, ma woda w temperaturze 4°C .

Pytania

1. Czy temperatura jest pojęciem mikroskopowym, czy makroskopowym?
2. Czy istnieją wielkości fizyczne inne niż temperatura, które mają tendencję do wyrównywania się, gdy dwa różne układy zostają zetknięte ze sobą?
3. Podaj rozsądne wytłumaczenie następującego efektu: W izolowanym i pustym zamkniętym naczyniu umieszczono kawałek lodu i termometr, w taki sposób że nie dotykają do siebie, a mimo to wskazania termometru obniżają się z biegiem czasu.
4. Czy można temperaturę przypisywać próżni?
5. Czy nasze „odczuwanie temperatury” zawiera również odczucie jej kierunku; inaczej mówiąc, czy „cieplejsze” koniecznie znaczy „o wyższej temperaturze”, czy też jest to dowolna konwencja? Warto zauważyć, że Celsjusz początkowo wybrał punkt wrzenia jako 0°C , a punkt zamarzania jako 100°C .
6. Na rysunku 21-1 przedstawiono aparat, przy pomocy którego realizowany jest punkt potrójny wody. Jak należałoby zmodyfikować ten aparat w celu realizacji punktu zamarzania wody?
7. Wymyślić metodę pomiaru temperatury: (a) Słońca, (b) górnej warstwy atmosfery ziemskiej, (c) małego robaczka, (d) Księżyca, (e) dna oceanu oraz (f) ciekłego helu.
8. Czy do pomiarów wzorcowym termometrem gazowym o stałej objętości jakiś gaz nadaje się lepiej niż inne gazy? Jakie właściwości gazu są tu pożądane?
9. Wymienić przyczyny tego, że nie powinno się używać termometru wodnego (rurka szklana z wodą) jako miernika temperatury. Czy termometr rtęciowy o takiej budowie stanowi ulepszenie?
10. Czy można wyjaśnić, dlaczego słupek rtęci w termometrze rtęciowym, po wsunięciu takiego termometru w płomień, najpierw opada, a następnie podnosi się?
11. Co jest wspólnego w konwencjach określających temperaturę w skali Celsjusza i w skali Kelvina?
12. Rozważmy skale Celsjusza, Fahrenheita i Kelvina. Czy któraś z nich wyróżnia się jako „skala naturalna”? Przedyskutuj to.
13. Jaki jest wymiar współczynnika rozszerzalności liniowej? Czy wartość α zależy od użytej jednostki długości? Czy wartość liczbową α zmienia się, jeżeli zamiast $^\circ\text{C}$ użyjemy $^\circ\text{F}$ jako jednostki temperatury? Jeżeli tak, to o ile?
14. Metalowa kula przechodzi swobodnie przez metalowy pierścień, natomiast gdy zostanie podgrzana, utkwí w pierścieniu. Co będzie, jeżeli podgrzejemy pierścień zamiast kuli?
15. W popularnym termostacie w roli czujnika jest używany pasek bimetaliczny, składający się z dwóch pasków z różnych metali, znitowanych razem. Wyjaśnić sposób działania tego urządzenia.
16. Dwa paski, jeden z żelaza a drugi z cynku zetknięto płaszczyznami i znitowano razem tak, że tworzą prosty pręt, który wygina się po ogrzaniu. Dlaczego wewnątrz krzywizny będzie żelazo?
17. Wyjaśnić, jak można zapewnić stałość chodu zegara wahadłowego bez względu na temperaturę, przymocowując na dolnym końcu wahadła rurkę z rtęcią (patrz zadanie 32).
18. Wyjaśnić, dlaczego niektóre substancje podobne do gumy zmniejszają swoje rozmiary ze wzrostem temperatury? (patrz pytanie 25, rozdział 25).
19. Wyjaśnić, dlaczego dostrzegalne rozszerzenie cieczy w kolbie nie pokrywa się z rzeczywistym rozszerzeniem tej cieczy?
20. Dlaczego ciecze mają zwykle znacznie większy współczynnik rozszerzalności objętościowej niż substancje stałe?

* Pierwotnie chciano, by względne rozmiary metra i kilograma nawiązywały do tej właśnie jednostkowej gęstości wody. Dokładne pomiary wykazują jednak, że międzynarodowe wzorce jednostek masy i długości nie odpowiadają ściśle tej wartości. Maksymalna gęstość wody wynosi w rzeczywistości $999,973 \text{ kg/m}^3$, w temperaturze $3,98^\circ\text{C}$. We wszystkich innych temperaturach jej gęstość jest mniejsza. Takie zachowanie wody jest przyczyną, że zamarzanie jezior zaczyna się od ich powierzchni.

21. Czy zmiana objętości ciała, wywołana zmianą temperatury, zależy od tego, czy we wnętrzu ciała jest wydrążenie? Zakładamy, że nie ma dodatkowych czynników, które mogłyby komplikować problem. Rozważmy to na przykładzie pełnej kuli i kuli wydrążonej.

22. Jakie pojawiają się trudności, jeżeli określi się temperaturę, przyjmując jako cechę termometryczną gęstość wody?

23. Wyjaśnić, dlaczego jezioro zamarza najpierw na powierzchni?

24. Co przyczynia się do pęknięcia rur wodociągowych zimą?

25. Jakie wnioski dotyczące zależności temperatury punktu topnienia lodu od ciśnienia można wyciągnąć z tego, że lód pływa po wodzie?

Zadania

Paragraf 21-3

1. *Termometr oporowy* jest termometrem, w którym cechą termometryczną jest opór elektryczny. Możemy przyjąć, że temperatury, w kelwinach, mierzone takim termometrem są wprost proporcjonalne do oporu R , w omach. Przekonano się, że pewien termometr oporowy umieszczony w wodzie o temperaturze punktu potrójnego (273,16 K) ma opór $R = 90,35 \Omega$. Jaką temperaturę wskaże termometr, w którym jego opór wynosi $96,28 \Omega$?

Odp.: 291,1 K.

2. Z codziennych obserwacji wiemy, że przedmioty gorące ochładzają się, a przedmioty zimne nagrzewają do temperatury otoczenia. Jeżeli różnica ΔT temperatury otoczenia i temperatury przedmiotu nie jest zbyt duża, to szybkość stygnięcia, a także szybkość nagrzewania jest w przybliżeniu proporcjonalna do różnicy temperatur przedmiotu i otoczenia, tzn.

$$\frac{d\Delta T}{dt} = -K\Delta T,$$

gdzie K jest stałą. Mamy tu znak „minus”, ponieważ ΔT maleje z upływem czasu, jeżeli ΔT jest dodatnie, a rośnie w przeciwnym przypadku. Fakt ten jest znany jako *prawo stygnięcia Newtona*. (a) Od jakich czynników zależy K ? Jaki jest jego wymiar? (b) Wykazać, że jeżeli w pewnej chwili $t = 0$, różnica temperatur jest równa ΔT_0 , to po upływie czasu t jest ona równa

$$\Delta T = \Delta T_0 e^{-Kt}.$$

3. Termometr rtęciowy został na kilka minut zanurzony we wrzącej wodzie, a następnie wyjęty. Odczyty temperatury w różnych chwilach czasu po wyjęciu są następujące:

t, s	$T, ^\circ C$	t, s	$T, ^\circ C$	t, s	$T, ^\circ C$	t, s	$T, ^\circ C$
0	98,4	25	65,1	100	50,3	700	26,5
5	76,1	30	63,9	150	43,7	1000	26,1
10	71,1	40	61,6	200	38,8	1400	26,0
15	67,7	50	59,4	300	32,7	2000	26,0
20	66,4	70	55,4	500	27,8	3000	26,0

Wykreśl zależność K od czasu, przy założeniu, że można tu stosować prawo stygnięcia Newtona (patrz zadanie 2). W jakim zakresie jest tu uzasadnione założenie o stosowalności prawa stygnięcia Newtona?

Paragraf 21-5

4. Temperatura gazu doskonałego w punkcie wrzenia wody wynosi 373,15 K. Jaka jest graniczna wartość stosunku ciśnienia tego gazu w punkcie wrzenia wody, do ciśnienia w punkcie potrójnym, jeżeli objętość gazu nie zmienia się?

5. Załóżmy, że ciśnienie w kolbie termometru gazowego o stałej objętości, w temperaturze 273,16 K równej temperaturze w punkcie potrójnym wody, wynosi p_{tr} , a ciśnienie w temperaturze pokojowej p . Mamy trzy termometry tego rodzaju; w pierwszym znajduje się tlen, dla którego $p_{tr} = 20$ cm Hg; w drugim również tlen, lecz o ciśnieniu $p_{tr} = 40$ cm Hg, a w trzecim wodór, o ciśnieniu $p_{tr} = 30$ cm Hg.

Dla tych trzech termometrów zmierzono wartości p , otrzymując wyniki p_1 , p_2 i p_3 . (a) Przybliżone wartości temperatury pokojowej T zmierzone tymi termometrami wynoszą

$$T_1 = 273,16 \text{ K} \frac{p_1}{20 \text{ cm Hg}}; \quad T_2 = 273,16 \text{ K} \frac{p_2}{40 \text{ cm Hg}};$$

$$T_3 = 273,16 \frac{p_3}{30 \text{ cm Hg}}.$$

Które z następnych zdań są prawdziwe, a które fałszywe: (1) Przy zastosowanej metodzie pomiaru wszystkie trzy termometry dadzą tę samą wartość T . (2) Wyniki otrzymane przy użyciu dwóch termometrów zawierających tlen pokryją się ze sobą, natomiast nie pokryją się z wynikiem pomiaru termometrem zawierającym wodór. (3) Każdy z trzech termometrów da inną wartość T . (b) W przypadku gdyby wyniki dawane przez te termometry były różne, jak należy zmienić sposób posługiwania się nimi, żeby wszystkie trzy dawały tę samą wartość T .

Odp.: (a) (1) Fałszywe, (2) fałszywe, (3) prawdziwe; (b) Należy wziąć wartość graniczną przy $p_{tr} \rightarrow 0$.

Paragraf 21-6

6. (a) Temperatura powierzchni Słońca wynosi około 6000 K. Przeliczyć to na stopnie Fahrenheita. (b) Podać normalną temperaturę ciała ludzkiego (36,6°C) w skali Fahrenheita. (c) W części kontynentalnej Stanów Zjednoczonych Ameryki Północnej najwyższą oficjalnie zanotowaną była temperatura 134°F, w Death Valley w Kalifornii, a najniższą temperatura -70°F, w Rogers Pass w Montanie. Wyrazić te wartości w skali Celsjusza. (d) Przeliczyć temperaturę wrzenia tlenu pod ciśnieniem 1 atm, -183°C, na stopnie Fahrenheita. (e) Przy jakiej temperaturze w skali Fahrenheita jest już za ciepło w mieszkaniu?

7. W jakiej temperaturze następujące pary skal dają te same wskazania: (a) Fahrenheita i Celsjusza? (b) Fahrenheita i Kelvina? (c) Celsjusza i Kelvina?

Odp.: (a) -40°; (b) 575°; (c) w żadnej.

Paragraf 21-7

8. Do interpolacji temperatur na międzynarodowej praktycznej skali temperatur, w zakresie temperatur od 0°C do 660°C, jest używany platynowy termometr oporowy o określonej charakterystyce. Temperaturę T_c oblicza się ze wzoru na zmiany oporu w funkcji temperatury

$$R = R_0(1 + AT_c + BT_c^2),$$

gdzie R_0 , A i B są stałymi określonymi z pomiarów w punkcie topnienia lodu, w punkcie wrzenia wody i w punkcie topnienia siarki. (a) Znaleźć R_0 , A i B , jeżeli R w punkcie topnienia lodu jest równe 10,000 Ω , w punkcie wrzenia wody jest równe 13,946 Ω , a w punkcie topnienia siarki jest równe 24,817 Ω . (b) Wykonać wykres R w zależności od T_c w zakresie temperatur od 0°C do 660°C.

Paragraf 21-8

9. Wykonane ze szkła typu pyrex zwierciadło teleskopu obserwatorium Mount Palomar ma średnicę 5 m. Na Mount Palomar temperatura zmienia się od -10°C do 50°C. Obliczyć największą zmianę średnicy zwierciadła.

Odp.: 0,96 mm.

10. Okrągły otwór w płycie aluminiowej w temperaturze 0°C ma średnicę 2,540 cm. Jaka będzie ta średnica, jeżeli temperatura płyty zostanie podwyższona do 100°C?

11. Stalowe szyny kolejowe są układane w temperaturze wynoszącej 0°C. Typowy odcinek szyny ma wówczas długość 12,0 m. Jaką przerwę należy pozostawiać między odcinkami szyn, by w temperaturze 42°C jeszcze nie powstały naprężenia ściskające?

Odp.: 0,55 cm.

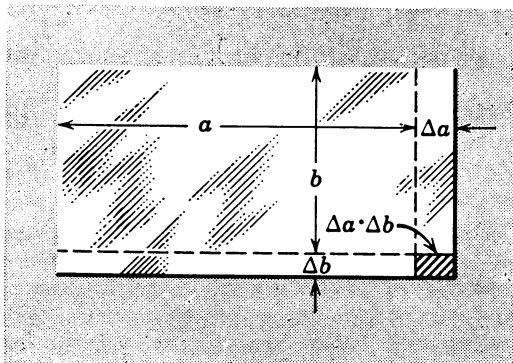
12. Średnica stalowego pręta w temperaturze 25°C wynosi 3,000 cm. Wewnętrzna średnica pierścienia mosiężnego w temperaturze 25°C wynosi 2,992 cm. W jakiej wspólnej temperaturze pierścień będzie się ślizgał po pręcie?

13. Wykazać, że jeżeli traktujemy α jako zmienną zależną od temperatury T , to

$$L = L_0 \left[1 + \int_{T_0}^T \alpha(T) dT \right],$$

gdzie L_0 jest długością w temperaturze początkowej T_0 .

14. Pole powierzchni A prostokątnej płyty wynosi ab . Jej współczynnik rozszerzalności liniowej wynosi α . Po podniesieniu temperatury o ΔT bok a wydłuża się o Δa , natomiast bok b o Δb . Wykazać, że jeżeli pominiemy małą wielkość $\Delta a \cdot \Delta b / ab$ (patrz rys. 21-9), to $\Delta A = 2\alpha A \Delta T$.



Rys. 21-9. Zadanie 14

15. Szklana szyba w temperaturze 10°C ma wymiary 20 cm na 30 cm (dokładnie). O ile wzrośnie jej powierzchnia przy wzroście temperatury do 40°C ?

Odp.: $0,32 \text{ cm}^2$.

16. Sprawdzić, że jeżeli pominiemy wielkości bardzo małe, zmiana objętości całego ciała stałego przy rozszerzaniu spowodowanym wzrostem temperatury o ΔT będzie opisana wzorem $\Delta V = 3\alpha V \Delta T$, gdzie α jest współczynnikiem rozszerzalności liniowej.

17. Znaleźć zmianę objętości kuli aluminiowej o promieniu 10,0 cm, gdy ogrzewa się ona od $0,00^\circ\text{C}$ do 100°C .

Odp.: 29 cm^3 .

18. Gdy temperatura miedzianej monety zostanie podwyższona o 100°C , jej średnica zwiększy się o 0,18%. Podać, z dokładnością do dwóch miejsc znaczących, procentowy przyrost: (a) górnej lub dolnej powierzchni, (b) grubości, (c) objętości oraz (d) masy monety. (e) Jaki jest współczynnik rozszerzalności liniowej?

19. Gęstość jest to stosunek masy do objętości. Gdy objętość V zależy od temperatury, zależy od niej również gęstość ρ .

Wykazać, że zmiana gęstości $\Delta \rho$ ze zmianą temperatury opisana jest wzorem

$$\Delta \rho = -\beta \rho \Delta T,$$

w którym β jest współczynnikiem rozszerzalności objętościowej. Wyjaśnić pojawienie się znaku „minus”.

20. Wykazać, że jeśli ciśnienie jest stałe, a temperatura cieczy w barometrze zmienia się o ΔT , to wysokość h zmienia się o $\Delta h = \beta h \Delta T$, gdzie β jest współczynnikiem rozszerzalności objętościowej.

21. (a) Wykazać, że jeżeli długości dwóch prętów wykonanych z różnych ciał stałych, w pewnej temperaturze początkowej są odwrotnie proporcjonalne do ich współczynnika rozszerzalności liniowej, to różnica ich długości będzie stała we wszystkich temperaturach. (b) Jakie powinny być długości pręta stalowego i pręta mosiężnego w temperaturze 0°C , żeby w dowolnej temperaturze różnica ich długości wynosiła 0,30 m?

Odp.: (b) stalowy, 71 cm; mosiężny, 41 cm.

22. Rozważmy termometr rtęciowy. Załóżmy, że stałe pole przekroju poprzecznego kapilary wynosi A_0 oraz że V_0 jest objętością zbiorniczka rtęci w temperaturze $0,00^\circ\text{C}$. Wykazać, że jeżeli rtęć całkowicie wypełnia zbiorniczek w $0,00^\circ\text{C}$, to długość słupa rtęci w kapilarze w temperaturze $t^\circ\text{C}$ wynosi

$$l = \frac{V_0}{A_0} (\beta - 3\alpha) t,$$

to znaczy jest proporcjonalna do temperatury, przy czym β jest współczynnikiem rozszerzalności objętościowej rtęci, a α współczynnikiem rozszerzalności liniowej szkła.

23. Wyobraźmy sobie aluminiowy kubeczek o pojemności 0,1 l wypełniony rtęcią w temperaturze 0°C. Ile rtęci wyleje się i czy w ogóle się wyleje z kubeczka, gdy temperatura wzrośnie do 18°C? (Współczynnik rozszerzalności objętościowej rtęci wynosi $1,8 \cdot 10^{-4}/\text{K}$.)

Odp.: 70 mm³.

24. Wahadło zegarowe wykonane z inwaru ma w temperaturze 20°C okres wahań 0,500 s. Jaką poprawkę trzeba uwzględnić przy odczycie czasu po 30 dniach chodu zegara, jeżeli jest on używany w klimacie, gdzie średnia temperatura wynosi 30°C?

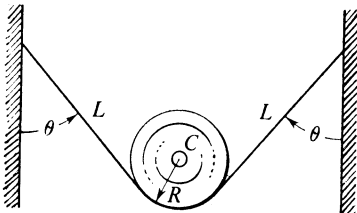
25. (a) Sprawdzić, że zmiana momentu bezwładności I ciała sztywnego ze zmianą temperatury jest opisana wzorem $\Delta I = 2\alpha I \Delta T$. (b) Sprawdzić, że okres wahań t wahadła fizycznego zmienia się z temperaturą według wzoru $\Delta t = \frac{1}{2} \alpha t \Delta T$.

26. Mamy jednorodny cylinder mosiężny o masie $M = 0,50$ kg i promieniu $R = 0,030$ m. Cylinder został umieszczony w łożyskach i wprowadzony w ruch obrotowy wokół swej osi symetrii z prędkością kątową $\omega = 60$ rad/s. Tarcie w łożyskach pomijamy. (a) Jaki jest moment pędu cylindra? Jaką pracę trzeba wykonać, żeby uzyskać taką szybkość obrotów, jeżeli początkowo cylinder był nieruchomy? Po osiągnięciu takiego stanu ruchu cylinder zostaje ogrzany (bez kontaktu mechanicznego) od temperatury pokojowej 20°C do 100°C. Przyjąć, że średni współczynnik rozszerzalności liniowej miedzi jest równy $\alpha = 2,0 \times 10^{-5}/\text{K}$. Obliczyć względne zmiany (jeśli w ogóle coś się zmieni): (b) prędkości kątowej, (c) momentu pędu oraz (d) energii kinetycznej ruchu obrotowego cylindra.

27. Pionowa rurka szklana o długości 1,0 m jest do połowy napełniona cieczą o temperaturze 20°C. O ile zmieni się wysokość słupa cieczy, gdy rurkę ogrzejemy do 30°C. Przyjąć $\alpha_{szkla} = 1,0 \cdot 10^{-5}/\text{K}$ oraz $\beta_{cieczy} = 4 \cdot 10^{-5}/\text{K}$.

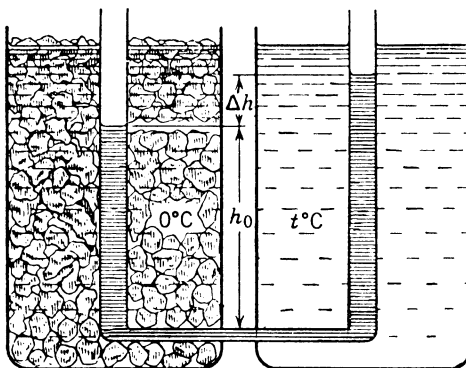
Odp.: Wzrośnie o 0,1 mm.

28. Pełny walec aluminiowy zawieszono na giętym pasku stalowym przymocowanym na jednakowych wysokościach do przeciwległych ścian, jak pokazano na rysunku 21-10. Chcemy, by oś C walca nie przesunęła się podczas termicznego rozszerzania i kurczenia się walca i paska. Kąt $\theta = 50^\circ$ pozostaje praktycznie niezmieniony przy zmianach temperatury. Znajdź promień R walca w temperaturze $T = 290$ K, jeśli w tej temperaturze $L = 2,5$ m. (Zaniedbaj ciężar paska.)



Rys. 21-10. Zadanie 28

29. Dwie pionowe rurki szklane napełnione cieczą są połączone na dole poziomą kapilarą. Jedną rurkę umieszczono w mieszaninie lodu z wodą, pozostających w równowadze (0,0°C), a drugą w kąpielu z gorącej wody (t). Różnica wysokości cieczy w obu rurkach wynosi Δh , a wysokość słupa cieczy w temperaturze 0,0°C wynosi h_0 . (a) Pokazać, jak można posłużyć się tym urządzeniem (rys. 21-11), użytym



Rys. 21-11. Zadanie 29

po raz pierwszy przez Dulonga i Petita w 1816 roku do zmierzenia β — prawdziwego współczynnika rozszerzalności objętościowej cieczy (a nie współczynnika rozszerzalności cieczy względem szkła). (b) Obliczyć β , jeżeli $t = 16,0^\circ\text{C}$, $h_0 = 126\text{ cm}$ oraz $\Delta h = 1,50\text{ cm}$.

Odp.: (b) $7,44 \cdot 10^{-4}/\text{K}$.

30. Sześcian aluminiowy o krawędzi 20 cm pływa w rtęci. O ile zanurzy się sześcian, gdy temperatura wzrośnie od 270 K do 320 K? (Współczynnik rozszerzalności objętościowej rtęci wynosi $1,8 \cdot 10^{-4}/\text{K}$.)

31. Odległość między wieżami głównego przęsła mostu Golden Gate Bridge w San Francisco wynosi 1280 m. Zwis liny w połowie drogi między wieżami w temperaturze 50°F wynosi 143 m. Przyjąć dla liny $\alpha = 6,5 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{F}$ i obliczyć: (a) zmianę długości liny oraz (b) zmianę wielkości zwisu, przy zmianie temperatury od -20°F do 110°F . Założyć, że wieże nie wyginają się.

Odp.: (a) 1,13 m, (b) 1,96 m.

32. Rurka szklana prawie wypełniona rtęcią jest przymocowana do dolnego końca żelaznego pręta wahadła o długości 100 cm. Na jakiej wysokości w rurce musi znajdować się poziom rtęci, żeby środek masy tego wahadła nie podnosił się ani nie opadał przy zmianach temperatury? (Pole przekroju poprzecznego rurki jest takie samo jak żelaznego pręta. Zaniedbaj masę szkła. Żelazo ma gęstość $7,87 \cdot 10^3\text{ kg/m}^3$ i współczynnik rozszerzalności liniowej $12 \cdot 10^{-6}/\text{K}$. Współczynnik rozszerzalności objętościowej rtęci wynosi $18 \cdot 10^{-5}/\text{K}$.)